



MANCAIS MAGNÉTICOS SUPERCONDUTORES UTILIZANDO FITAS DE SEGUNDA GERAÇÃO

Felipe Sass

Dissertação de Mestrado 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 Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientadores: Rubens de Andrade Júnior
Guilherme Gonçalves Sotelo

Rio de Janeiro
Março de 2011

MANCAIS MAGNÉTICOS SUPERCONDUTORES UTILIZANDO FITAS DE
SEGUNDA GERAÇÃO

Felipe Sass

DISSERTAÇÃO 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 MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA
ELÉTRICA.

Examinada por:



Prof. Rubens de Andrade Júnior, D.Sc.



Prof. Guilherme Gonçalves Sotelo, D.Sc.



Prof. Antonio Carlos Ferreira, D.Sc.



Prof. Alexander Polasek, D.Sc..



Prof. Antonio Carlos Oliveira Bruno, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MARÇO DE 2011

Sass, Felipe

Mancais Magnéticos Supercondutores Utilizando Fitas de Segunda Geração/Felipe Sass. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2011.

XVI, 81 p.: il.; 29, 7cm.

Orientadores: Rubens de Andrade Júnior

Guilherme Gonçalves Sotelo

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Elétrica, 2011.

Referências Bibliográficas: p. 62 – 66.

1. Bobinas Supercondutoras. 2. Fitas Supercondutoras de Segunda Geração. 3. Magnetos Supercondutores. I. Andrade Júnior, Rubens de *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

“Uma longa viagem começa com um passo, senão tiver começado com um arrasto, porque de criança se vai longe (...).”
Provérbio Chinês

Agradecimentos

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) pelo suporte financeiro. Agradeço também ao Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) pela parceria, sem a qual muitos dos resultados apresentados neste trabalho não seriam possíveis. Desta parceria, gostaria de agradecer especialmente ao técnico Rodrigo Dias e aos engenheiros Alexander Polasek e Márcio Antônio Sens pelo apoio técnico, interesse e sugestões ao longo do desenvolvimento do trabalho.

À minha família, que me ensinou a andar, a falar, a pensar e, acima de tudo, a nunca desistir. Agradeço por todo o carinho, amor e apoio nas horas fáceis e nas difíceis. Eles tornaram tudo possível. Aos meus amigos, que estiveram presentes não só nos momentos de alegria, mas sempre que precisei. Aos companheiros da escola, da faculdade e da vida, que são como irmãos na luta por um mundo melhor. Eles também tornaram tudo possível.

Aos meus professores, em especial aos meus orientadores Rubens e Guilherme, agradeço pela paciência infinita, pelo interesse e boa vontade de sempre.

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

MANCAIS MAGNÉTICOS SUPERCONDUTORES UTILIZANDO FITAS DE SEGUNDA GERAÇÃO

Felipe Sass

Março/2011

Orientadores: Rubens de Andrade Júnior
Guilherme Gonçalves Sotelo

Programa: Engenharia Elétrica

Fitas supercondutoras de segunda geração (2G) têm sido utilizadas em diversas aplicações. Este trabalho apresenta um estudo preliminar dos mancais magnéticos supercondutores (MMS) utilizando fitas 2G. Uma bobina supercondutora com enrolamento de dupla camada foi construída para testar a fita 2G na tecnologia de levitação. A bobina foi projetada através de simulações com o método dos elementos finitos (MEF). A fita 2G pode ser usada em dois tipos de MMS: lineares (para veículos de levitação magnética), ou rotativos (para “flyweels”). Em ambas as aplicações a fita pode ser conectada em laço fechado (para levitadores passivos), ou controlando a corrente nos terminais (para aplicações em que deseja controlar a altura de levitação). Um MMS rotativo foi construído para investigar a força de levitação entre a bobina supercondutora e um ímã permanente cilíndrico, mostrando o potencial promissor desta aplicação.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

MAGNETIC SUPERCONDUCTING BEARINGS USING SECOND GENERATION WIRE

Felipe Sass

March/2011

Advisors: Rubens de Andrade Júnior
Guilherme Gonçalves Sotelo

Department: Electrical Engineering

Second generation (2G) superconductor wires have been used for several applications. This work presents a preliminary study of superconducting magnetic bearings (SMB) using 2G wires. A double pancake superconducting coil was implemented to test the 2G wire in levitation technology. The coil was projected by simulations with the Finite Element Method (FEM). The 2G wire can be used for two types of SMB: linear (for MagLev vehicles), or rotational (for flywheels). In both applications the wire can be connected as a closed loop coil (for passive levitators), or as an opened coil (for applications where a controlled levitation gap is desired). A rotational SMB was made to investigate the levitation force between the superconducting coil and a permanent magnet cylinder showing promising potential of this application.

Sumário

Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xiii
Lista de Símbolos	xiv
Lista de Abreviaturas	xvi
1 Introdução	1
1.1 Motivação	2
1.2 Objetivo	2
1.3 Apresentação dos Capítulos	2
2 Teoria e Conceitos	3
2.1 Resistividade Nula	3
2.2 Efeito Meissner	4
2.3 Supercondutores do tipo I e do tipo II	6
2.4 Comprimento de Coerência e Profundidade de Penetração	8
2.5 Limites da Supercondutividade	10
2.6 Supercondutores de Alta Temperatura Crítica	12
2.7 Fitas Supercondutoras de Segunda Geração	15
2.8 Mancais Magnéticos Supercondutores	18
3 Aparatos Experimentais	20
3.1 Emendas	20
3.2 Bobinas Supercondutoras	24
3.2.1 Fita de Cobre	26
3.2.2 Bobinadeira	26
3.2.3 Bobinas com Fita Supercondutora 344C	31
3.3 Bancada para Medição de Tensão em função da Corrente	33
3.4 Bancada para Medição de Força	35
3.5 Sensor de Corrente Criogênico	37

4	Resultados e Discussões	41
4.1	Simulações	41
4.2	Resultados para Imposição de Corrente	44
4.3	Resultados para a Bobina Supercondutora Conectada em um Laço Fechado	49
4.4	Resultados para a Bobina 2	54
5	Conclusões e Trabalhos Futuros	56
5.1	Conclusões	56
5.2	Trabalhos Futuros	58
5.3	Considerações Finais	60
	Referências Bibliográficas	62
A	Especificações da fita 2G modelo 344C da AMSC.	67
B	Fluxograma para levantamento da característica da tensão com a corrente elétrica para materiais condutores e supercondutores uti- lizado no CEPEL.	69
C	Especificações das fitas 2G da SP.	77

Lista de Figuras

2.1	Ilustração comparando o comportamento da resistividade dos metais com a dos supercondutores metálicos.	4
2.2	Comportamento das linhas de fluxo em: (a), (b) e (c) um condutor perfeito; (d), (e) e (f) um supercondutor (Efeito Meissner).	5
2.3	Diagrama de fases: (a) supercondutores do tipo I e (b) supercondutores do tipo II.	6
2.4	Ilustração do comportamento de M em função de H para supercondutores dos tipos I e II.	7
2.5	Rede de Abrikosov de um supercondutor do tipo II.	8
2.6	Ilustração da fronteira entre a região normal e supercondutora, relacionando λ e ξ para os supercondutores (a) do tipo I e (b) do tipo II.	9
2.7	Ilustração de λ e ξ no interior de um supercondutor do tipo II no estado misto.	9
2.8	Diagrama de fases de um supercondutor em função do H externo e da constante κ	10
2.9	Ilustração dos limites teóricos e práticos dos supercondutores do tipo II.	11
2.10	Diagrama de H_{c2} (em preto) e H_{irr} (em vermelho) em função da temperatura.	14
2.11	Estrutura cristalina do YBCO ($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$): (a) $\delta = 0$, (b) $\delta = 0,5$ e (c) $\delta = 1$	15
2.12	Estrutura de camadas da fita 2G modelo 344C da AMSC.	17
2.13	Ilustração da seção transversal da fita 2G modelo 344C da AMSC.	18
2.14	Ilustração da levitação magnética supercondutora.	19
3.1	Marcação da AMSC indicando o lado do substrato nos supercondutores 344C.	21
3.2	(a) Solda de baixo ponto de fusão e (b) fluxo de solda.	21
3.3	Estação de solda com temperatura controlada do CEPTEL.	22

3.4	Vista lateral da emenda: (a) emenda direta e (b) emenda com tira auxiliar	23
3.5	Fotos do dispositivo para realizar emendas planas.	24
3.6	Fotos do dispositivo para realizar emendas curvas.	25
3.7	Ilustração do carretel projetado para a bobina supercondutora.	25
3.8	Laminadora do CEPTEL.	27
3.9	Fita de cobre obtida no processo de laminação.	27
3.10	Protótipo da bobinadeira construído em polietileno: (a) ilustração e (b) foto.	28
3.11	Corte do kapton.	29
3.12	Adaptação da bobinadeira para separar a fita 2G em dois carretéis.	30
3.13	Cruzamento da fita entre as duas camadas da bobina.	30
3.14	Bobina supercondutora parcialmente enrolada.	31
3.15	Bobina completa.	31
3.16	Bobina disponível no estande da empresa HTS-110 durante a ASC de 2010	32
3.17	Bobina 2	33
3.18	Diagrama do sistema para aquisição das curvas $V - I$	34
3.19	Interface gráfica do software para levantamento da curva $V - I$	35
3.20	Sistema de medição de força.	36
3.21	Fluxograma do sistema de medição de força.	37
3.22	Sensor de corrente.	38
3.23	Circuito de alimentação do sensor de corrente.	40
4.1	Fluxograma do método iterativo de refinamento de malha do programa Ansoft Maxwell SV.	42
4.2	Malha com 181.512 elementos gerada pelo programa Ansoft Maxwell SV durante uma das simulações pelo MEF.	43
4.3	Ilustração da Bobina: (a) seção transversal, (b) representação com simetria em torno do eixo de rotação z e (c) camadas que foram representadas no modelo utilizado.	44
4.4	Terminais de cobre soldados na Bobina 1.	45
4.5	Comparação dos resultados experimentais e simulados de força na direção z sobre o ímã para imposição de corrente na bobina supercondutora.	46
4.6	Linhas de fluxo magnético da bobina para diferentes situações: (a) $z=30$ mm e corrente de 20 A; (b) $z=30$ mm e corrente de 50 A ; (c) $z=20$ mm e corrente de 50 A	47

4.7	Resultados de uma simulação mostrando o módulo da densidade de fluxo magnético sobre a bobina supercondutora em função da posição radial para uma corrente imposta de 50 A.	48
4.8	Força medida ao mover o ímã permanente da posição inicial ($z=100$ mm) até a posição final ($z=20$ mm) com corrente constante aplicada na bobina.	48
4.9	Curva $V \times I$ medida em uma emenda com 35 mm de fitas 2G sobrepostas. A resistência da emenda é de aproximadamente 63 n Ω	49
4.10	Ensaio de ZFC: o ímã foi deslocado de $z=100$ mm até $z=20$ mm, de onde retornou para a posição inicial.	50
4.11	Decaimento da força de repulsão entre o ímã e a bobina.	52
4.12	Bobina sendo desenrolada: (a) ponto onde a solda que une as camadas da fita derreteu e (b) ponto onde a fita delaminou.	53
4.13	Bancada para medição da corrente induzida na bobina.	54
4.14	Forma de onda da corrente quando um ímã é aproximado manualmente Bobina 2 e em seguida retirado.	55
5.1	Mancal magnético supercondutor construído no LASUP com fitas 2G de 12 mm de largura empilhadas.	58
5.2	Ilustração de um bloco supercondutor construído com fitas 2G empilhadas.	59
5.3	Ilustração de uma bobina supercondutora para a aplicação de mancais magnéticos.	60
5.4	Ilustração de uma bobina supercondutora de dupla camada para a aplicação de mancais magnéticos.	60
5.5	Ilustração de um mancal magnético supercondutor híbrido.	61

Lista de Tabelas

2.1	Descoberta de novos materiais supercondutores e suas temperaturas críticas.	13
3.1	Guia de tempo e temperatura de soldagem das fitas 344C.	22
3.2	Resistência da emenda da fita 344C para diferentes configurações. . .	23
4.1	Indutância medida com medidor de impedância complexa da MIDSUN.	51

Lista de Símbolos

B	Densidade de Fluxo Magnético, p. 6
F_L	Força de Lorentz, p. 11
F_P	Força de Aprisionamento, p. 11
H	Intensidade de Campo Magnético, p. 4
H_c	Intensidade de Campo Crítica, p. 4
H_{c1}	Campo Crítico Inferior dos Supercondutores do tipo II, p. 6
H_{c2}	Campo Crítico Superior dos Supercondutores do tipo II, p. 6
H_{irr}	Intensidade de Campo Magnético Irreversível, p. 12
I	Corrente, p. 33
I_c	Corrente Crítica, p. 16
J	Densidade de corrente, p. 4
J_c	Densidade de Corrente Crítica, p. 11
J_d	Densidade de corrente máxima sem destruir os pares de Cooper (Depairing Current), p. 4
J_e	Densidade de Corrente de Engenharia, p. 17
L	Indutância da Bobina, p. 50
M	Magnetização, p. 6
Q	Fator de qualidade, p. 50
R	Resistência da Emenda, p. 50
T	Temperatura, p. 4
T_c	Temperatura Crítica, p. 4

V	Tensão, p. 33
W	Energia Armazenada no Campo Magnético de um Indutor, p. 50
X_L	Reatância Indutiva da Bobina, p. 50
η	Razão entre H_{c2}^{\parallel} e H_{c2}^{\perp} , p. 14
η_s	Densidade de Superelétrons, p. 8
κ	Constante de Ginzburg-Landau, p. 10
λ	Profundidade de Penetração, p. 8
μ_0	Permeabilidade Magnética do Vácuo, p. 6
ϕ_0	Fluxo Magnético Quantizado de um Fluxóide., p. 7
ρ	Raio em um sistema de coordenadas cilíndricas, p. 43
τ	Constante de tempo da Bobina, p. 50
θ	Ângulo em um sistema de coordenadas cilíndricas, p. 43
ξ	Comprimento de Coerência, p. 8
d	Distância entre os terminais de tensão da amostra, p. 34
e	Carga Elementar, p. 7
h	Constante de Plank, p. 7
i	Corrente Aplicada na Bobina, p. 50
z	Altura em um sistema de coordenadas cilíndricas, p. 43
H_{c2}^{\parallel}	Intensidade de Campo Crítico Paralelo ao Plano a-b, p. 14
H_{c2}^{\perp}	Intensidade de Campo Crítico Perpendicular ao Plano a-b, p. 14
T_c^{EF}	Temperatura Crítica dos Elos Fracos, p. 14

Lista de Abreviaturas

2G	Segunda Geração de Fitas Supercondutoras, p. 1
AMSC	American Superconductors, p. 16
ASC	“Applied Superconductivity Conference”, p. 32
BCS	Teoria microscópica da supercondutividade proposta por J. Bardeen, L. N. Cooper e J. R. Schrieffer, p. 12
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica / Eletrobas, p. 20
FC	Supercondutor Resfriado na Presença de Campo Magnético (“Field Cooled”), p. 5
HTS	Supercondutores de Alta temperatura Crítica (“High Temperature Superconductors”), p. 12
LASUP	Laboratório de Aplicações de Supercondutores, p. 2
LTS	Supercondutores de Baixa Temperatura Crítica (“Low Temperature Superconductors”), p. 12
MEF	Método dos elementos finitos, p. 41
MagLev	Veículo de Levitação Magnética, p. 16
SMES	Armazenador de Energia Magnética Supercondutor (“Superconducting Magnetic Energy Storage”), p. 16
SP	SuperPower, p. 16
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro, p. 2
YBCO	Sigla do supercondutor conhecido como <i>ítrio-bário-cobre</i> , p. 13
ZFC	Supercondutor resfriado na Ausência de Campo Magnético (“Zero Field Cooled”), p. 5

Capítulo 1

Introdução

O desenvolvimento tecnológico está atrelado não apenas à detenção do conhecimento, como também à inserção deste conhecimento na indústria. Neste processo, determinadas áreas de pesquisa são estudadas até a exaustão, fazendo com que o surgimento de idéias originais, que representem uma evolução tecnológica em nível de mercado, sature. No entanto, quando os avanços tecnológicos em determinada área atingem este regime permanente, existem fatores que atuam como verdadeiros pontos de desequilíbrio, abrindo novas frentes de pesquisa e, ao mesmo tempo, incentivando o aprimoramento de aplicações já existentes. A descoberta de novos materiais é um destes fatores.

Desde que o mundo passou a ter conhecimento do fenômeno da supercondutividade, foram descobertos diversos materiais supercondutores. Na década de 1960, aplicações foram desenvolvidas utilizando principalmente o Nb-Ti (nióbio-titânio), um supercondutor que precisa ser refrigerado com hélio líquido. Com a descoberta dos supercondutores de alta temperatura crítica em 1986, surgiu a possibilidade de substituir o hélio pelo nitrogênio líquido, reduzindo consideravelmente os custos de refrigeração. Entre os materiais supercondutores mais recentes e mais promissores estão as fitas supercondutoras de segunda geração (2G), que utilizam a tecnologia de filmes finos. Além de possuírem propriedades supercondutoras melhores que a maioria dos materiais supercondutores, as fitas 2G estão sendo fabricadas em escala industrial, enquanto os supercondutores maciços continuam sendo produzidos através de processos semi-artesanais. No entanto, o processo de substituição do Nb-Ti e de outros materiais pelas fitas 2G em aplicações conhecidas não é uma tarefa trivial, uma vez que as fitas degradam facilmente, principalmente quando submetidas a esforços mecânicos.

Neste trabalho, será abordada uma nova aplicação das fitas 2G que visa testar o potencial deste material para uso em mancais magnéticos. Assim, foi construída uma bobina supercondutora e um mancal rotativo onde diversos resultados foram avaliados, como por exemplo, a densidade de fluxo magnético, a força de levitação,

a corrente que circula na bobina e a viabilidade da utilização das fitas de segunda geração em mancais magnéticos.

1.1 Motivação

O Laboratório de Aplicação de Supercondutores (LASUP) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) possui experiência com a aplicação de mancais magnéticos, em especial os que utilizam blocos supercondutores maciços. Pode-se dizer que a grande inspiração deste trabalho foi aliar esta tecnologia promissora com a experiência adquirida pelo LASUP na área de mancais magnéticos e, possivelmente, abrir novos horizontes de pesquisa.

1.2 Objetivo

Hoje em dia é possível comprar fitas supercondutoras de segunda geração com correntes críticas elevadas (~ 100 A para uma fita com 4 mm de largura 0.1 mm de espessura) e dimensões reduzidas de diversos fabricantes. No entanto, ao contrário do que se possa imaginar, a construção de um dispositivo simples, como uma bobina, requer uma série de cuidados especiais que precisam ser levados em conta no projeto. O objetivo principal deste trabalho é trazer para o LASUP o conhecimento necessário para a utilização das fitas 2G.

A longo prazo, este trabalho tem a pretensão de ser o primeiro passo dentro da UFRJ para um futuro em que se possa falar de supercondutividade e máquinas, supercondutividade e filtros, chaves e outros tópicos da eletrônica de potência em um mesmo trabalho.

1.3 Apresentação dos Capítulos

Esta dissertação está dividida da seguinte maneira: o presente capítulo é dedicado à introdução do trabalho proposto e a apresentação do mesmo. No segundo capítulo serão apresentadas as principais propriedades dos materiais supercondutores e algumas das teorias e conceitos relevantes para este trabalho. Os aparatos experimentais utilizados durante os ensaios estão descritos no terceiro capítulo. Em seguida, o quarto capítulo apresenta e discute os resultados obtidos experimentalmente e por simulações. Finalmente, no quinto e último capítulo, serão discutidas as conclusões deste trabalho bem como sugestões de trabalhos a serem realizados futuramente visando o aprimoramento dos resultados obtidos.

Capítulo 2

Teoria e Conceitos

Neste capítulo será feita uma breve apresentação da supercondutividade de forma fenomenológica, que servirá de base para que o leitor possa compreender o potencial da utilização de fitas supercondutoras de segunda geração em mancais magnéticos e outras aplicações.

2.1 Resistividade Nula

A corrente elétrica que flui em um material condutor é devida aos elétrons de condução, ou seja, elétrons que estão fracamente ligados a estrutura atômica e necessitam de pouca energia para se moverem de um potencial elétrico mais elevado para um menos elevado. Os metais, que são conhecidos por serem bons condutores de calor e eletricidade, possuem uma estrutura cristalina que facilita o movimento dos elétrons. Em uma estrutura cristalina perfeita os elétrons poderiam se mover sem perder energia. No entanto, devido às impurezas no material e à vibração dos átomos, os elétrons encontram barreiras que dificultam o seu movimento. Estas barreiras recebem o nome de resistência elétrica [1].

O processo de resfriar o material condutor reduz a agitação térmica dos átomos, o que reduz as chances de colisão dos elétrons de condução. Desta forma, a resistência elétrica dos metais diminui com a temperatura.

Em 1911, ao investigar o comportamento elétrico de metais em baixa temperatura (até 2 K), o físico holandês Heike Kamerlingh Onnes percebeu que a resistividade do mercúrio caía abruptamente a zero¹ quando a temperatura do metal era inferior a 4,2 K [2, 3]. A este fenômeno deu-se o nome de supercondutividade.

Quando um material transita para o estado supercondutor, os elétrons de condução agrupam-se em pares com spins e momentos opostos. Este acoplamento de elétrons recebe o nome de Par de Cooper [4, 5], também conhecido como superelê-

¹Neste trabalho, sempre que se falar em resistência nula ou igual a zero, entende-se um valor não mensurável com os equipamentos mais precisos.

tron, e é capaz de se mover na rede cristalina do supercondutor sem perder energia. Os superelétrons podem ser rompidos, basicamente, por meio de três grandezas que fornecem energia que facilitam a quebra da ligação entre os elétrons dos pares de Cooper. São elas: a intensidade de campo magnético (H), a temperatura (T) e a densidade de corrente (J).

Uma das primeiras observações a respeito dos materiais supercondutores, foi a de que o fenômeno da supercondutividade ocorre sempre que o material é resfriado abaixo de determinada temperatura. Esta temperatura é conhecida como temperatura crítica (T_c). A Figura 2.1 mostra uma ilustração comparando o comportamento da resistividade dos metais com a dos supercondutores metálicos [6].

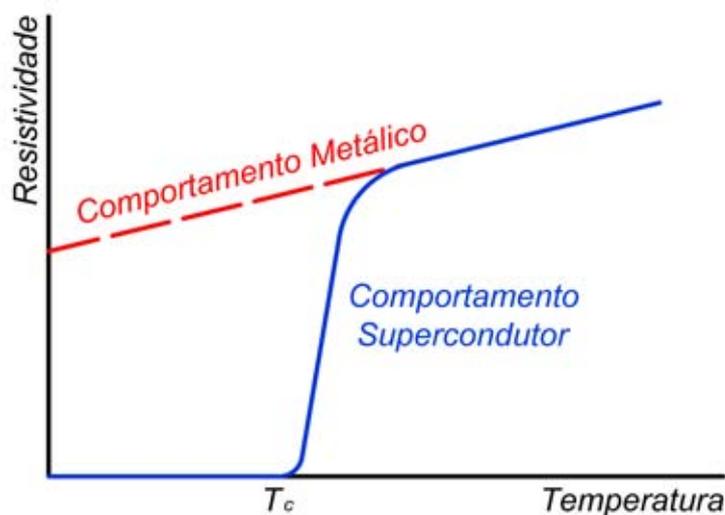


Figura 2.1: Ilustração comparando o comportamento da resistividade dos metais com a dos supercondutores metálicos [6].

Em 1914, Onnes observou que a presença de um campo magnético H externo poderia fazer com que o material permanecesse no estado normal, independentemente da temperatura da amostra. Este resultado deu margem para pesquisas e, em pouco tempo, se descobriu que além da T_c os supercondutores possuem uma intensidade de campo crítica (H_c) e uma densidade de corrente máxima sem destruir os pares de Cooper [7] (Depairing Current, J_d). A supercondutividade só é possível quando as três grandezas combinadas não fornecem a quantidade de energia necessária para separar os pares de Cooper. Na prática, existem outros fatores que limitam a utilização dos supercondutores, como será apresentado na seção 2.5.

2.2 Efeito Meissner

A resistividade nula não é a única característica do material supercondutor. Um condutor perfeito seria capaz de induzir correntes que anulem as variações de campo

magnético no seu interior, o que não ocorre com os materiais supercondutores. O supercondutor é um diamagneto perfeito, ou seja, expulsa todo e qualquer fluxo magnético do seu interior, independentemente ter sido resfriado na presença de campo magnético (“Field Cooled”, FC) ou de ter sido resfriado sem a presença de campo (“Zero Field Cooled”, ZFC). Esse fenômeno é conhecido como efeito Meissner [8] e pode ser melhor compreendido com o auxílio da Figura 2.2, onde os índices (a), (b) e (c) são para um condutor perfeito e os índices (d), (e) e (f) são para um supercondutor.

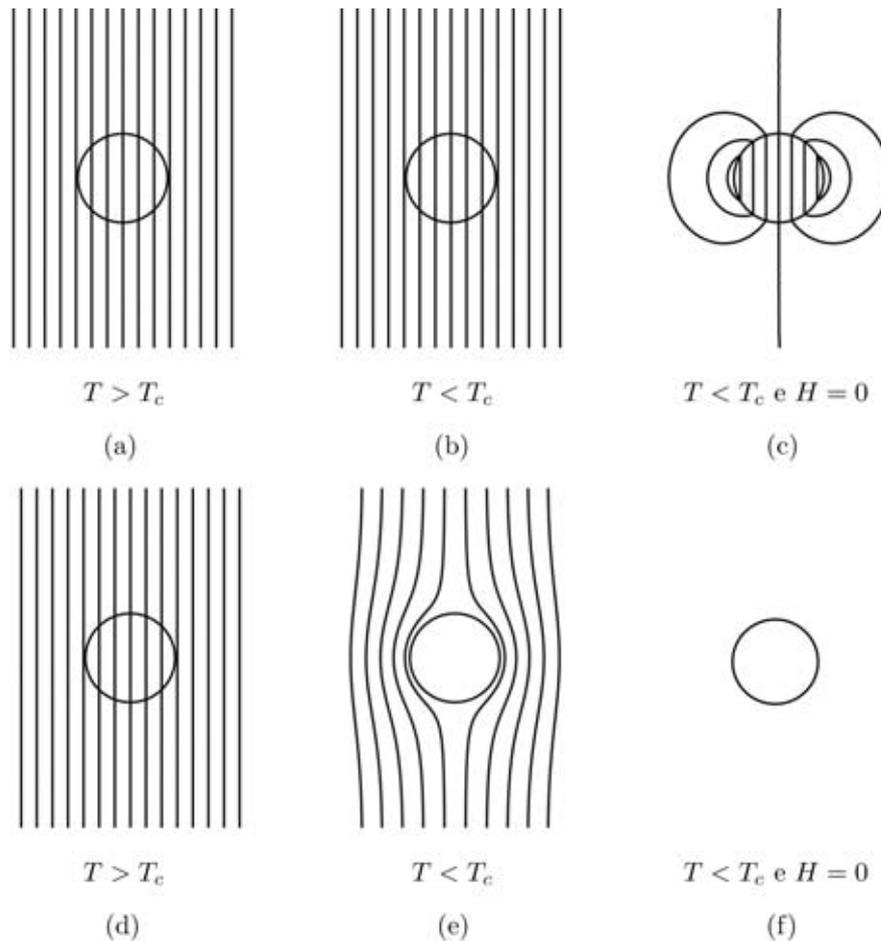


Figura 2.2: Comportamento das linhas de fluxo em: (a), (b) e (c) um condutor perfeito; (d), (e) e (f) um supercondutor (Efeito Meissner).

Na Figura 2.2.a o material se encontra na presença de campo. Na Figura 2.2.b é resfriado e então, na Figura 2.2.c, o campo externo é retirado, fazendo com que correntes sejam induzidas no condutor ideal de modo a impedir a variação de campo em seu interior. Ao contrário do condutor ideal, que aprisiona o campo magnético, o supercondutor apresenta o efeito Meissner. A Figura 2.2.d mostra um supercondutor que inicialmente está no estado normal e submetido a um campo externo. Na Figura 2.2.e o material é resfriado e expulsa todo campo magnético do seu interior (diamagnetismo perfeito). A Figura 2.2.f mostra o resultado quando o campo

magnético externo deixa de ser aplicado.

2.3 Supercondutores do tipo I e do tipo II

As propriedades de exclusão de fluxo magnético dos supercondutores permitem a classificação destes materiais em dois grupos: os supercondutores do tipo I, também conhecidos como supercondutores moles (“soft”), e os supercondutores do tipo II, também conhecidos como supercondutores duros (“hard”). Os supercondutores do tipo I apresentam efeito Meissner completo, de modo que o material sai do estado supercondutor quando o campo crítico é atingido. Na prática existem poucas aplicações para os supercondutores do tipo I, devido ao baixo valor do campo crítico H_c destes materiais. Os supercondutores do tipo II possuem dois campos críticos (H_{c1} e H_{c2}) e também apresentam o efeito Meissner completo para campos menores que o crítico H_{c1} , onde $H_{c1} < H_c$. No entanto, para campos entre H_{c1} e H_{c2} , o supercondutor do tipo II assume um estado entre o estado Meissner e o estado normal, conhecido como Estado Misto. A Figura 2.3 mostra o diagrama de fases dos dois tipos de supercondutores.

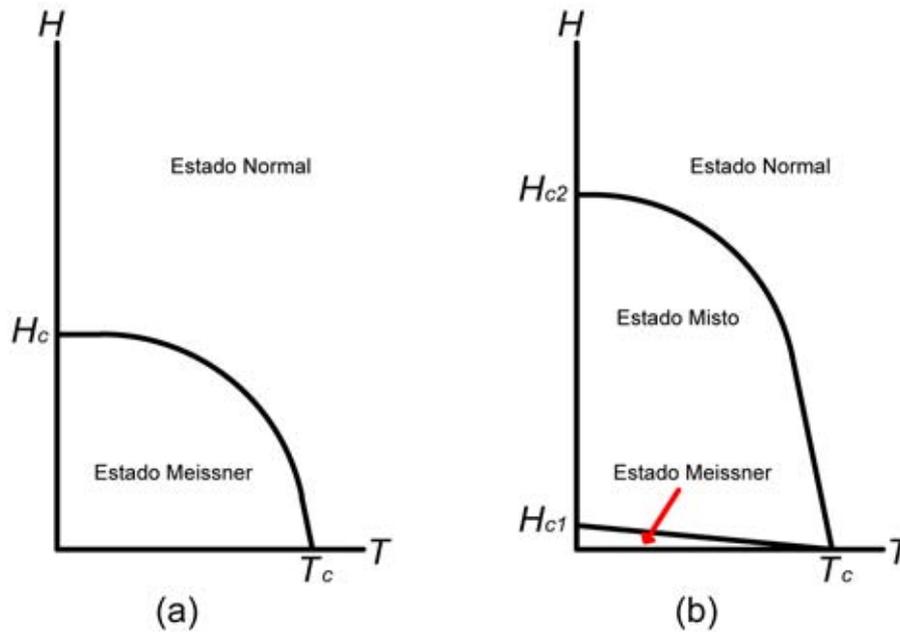


Figura 2.3: Diagrama de fases: (a) supercondutores do tipo I e (b) supercondutores do tipo II.

A densidade de fluxo magnético (B) no interior da amostra se relaciona com a magnetização (M) e com o campo magnético (H) de acordo com a equação abaixo:

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}), \quad (2.1)$$

onde μ_0 é a permeabilidade magnética do espaço livre.

Para que o efeito Meissner seja possível ($B = 0$), a intensidade de campo no interior da amostra deve ser anulada por uma magnetização $\vec{M} = -\vec{H}$. Assim como os supercondutores do tipo I, os supercondutores do tipo II apresentam efeito Meissner completo quando submetidos à campos de intensidade menor ou igual a H_{c1} . Quando a intensidade de campo possui valor intermediário aos dois campos críticos ($H_{c1} < H < H_{c2}$), o fluxo magnético penetra parcialmente no interior do material. Finalmente, se $H > H_{c2}$, os pares de Cooper são desfeitos e o material deixa de ser supercondutor. A Figura 2.4 ilustra a relação entre M e H para os supercondutores dos tipos I e II.

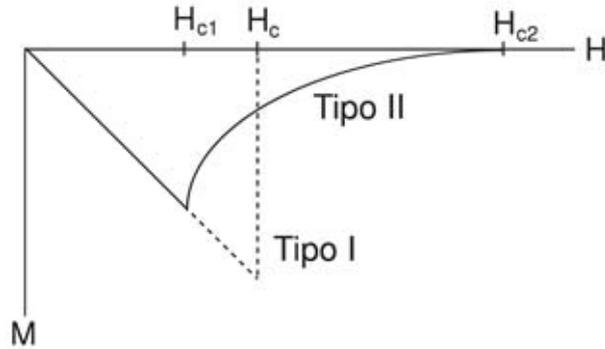


Figura 2.4: Ilustração do comportamento de M em função de H para supercondutores dos tipos I e II (adaptado de [9]).

O estado misto é caracterizado pelo fato de regiões normais e supercondutoras coexistirem no material. As regiões normais, também chamadas de fluxóides (ou vórtices), encontram-se distribuídas homoganeamente numa rede hexagonal conhecida como rede de Abrikosov [10] e ficam cercadas por regiões supercondutoras, como se pode ver na Figura 2.5. Os fluxóides apresentam um fluxo magnético quantizado (ϕ_0).

$$\phi_0 = \frac{h}{2 \cdot e} = 2.068 \times 10^{-15} \text{Wb}, \quad (2.2)$$

onde:

h - Constante de Plank

e - Carga Elementar.

Em um supercondutor do tipo II, a capacidade de transporte de corrente está diretamente associada com a capacidade de aprisionamento de fluxo pelos vórtices, uma vez que só é possível existir uma densidade de corrente \vec{J} no material se houver um rotacional da densidade de fluxo entre os vórtices ($\nabla \times \vec{B}$), como mostra a lei de Ampère para campos estáticos [11]:

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \cdot \vec{J}. \quad (2.3)$$

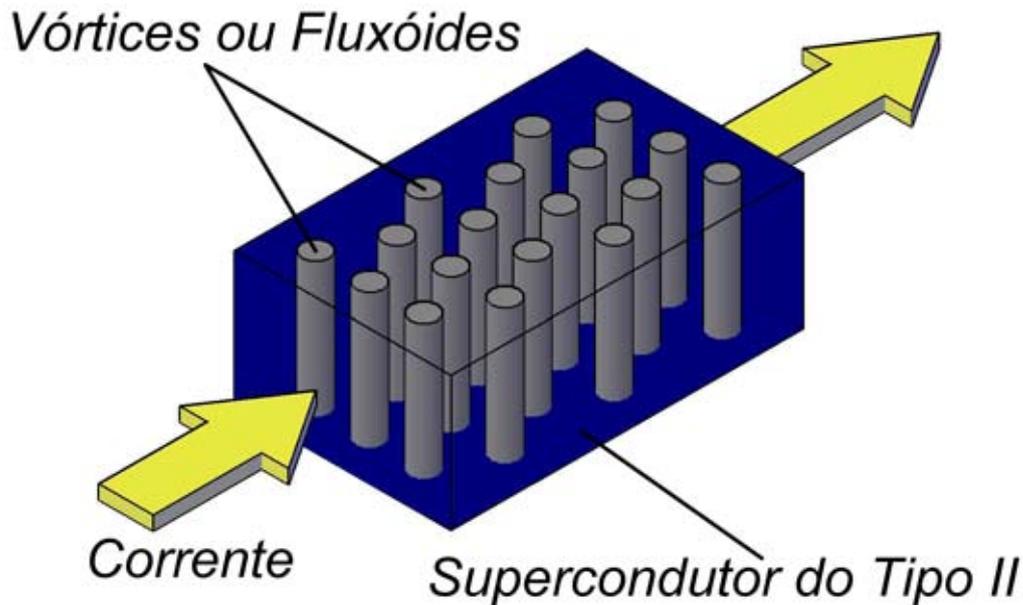


Figura 2.5: Rede de Abrikosov de um supercondutor do tipo II.

Em resumo, os centros de aprisionamento de fluxo (vórtices) são defeitos intrínsecos do material ou introduzidos no supercondutor do tipo II por dopagem, entre outros métodos, permitindo que o fluxo magnético penetre de forma quantizada no material e dando origem a uma nova intensidade de campo crítico (H_{c2}) com valor suficientemente grande para viabilizar uma série de aplicações práticas. Além disso, quanto maior a capacidade de aprisionamento de fluxo de um material, maior a capacidade de transporte de corrente, sendo J_d o limite teórico de densidade de corrente. Estas considerações sugerem que defeitos devem ser propositalmente inseridos na amostra supercondutora com o objetivo de melhorar suas propriedades.

2.4 Comprimento de Coerência e Profundidade de Penetração

O comprimento de coerência (ξ) e a profundidade de penetração (λ) são dois parâmetros que dependem de T e são importantes para a caracterização de supercondutores. A profundidade de penetração pode ser entendida como a distância média em que o fluxo magnético externo penetra em um material supercondutor devido às correntes de blindagem. Interpreta-se o comprimento de coerência como sendo a distância necessária para que a densidade de superelétrons (η_s) na fronteira entre as regiões normal e supercondutora suba de zero até o seu valor normal no interior do material [12]. Supercondutores do tipo I possuem $\xi > \lambda$, enquanto supercondutores do tipo II possuem $\xi < \lambda$, como está ilustrado na Figura 2.6.

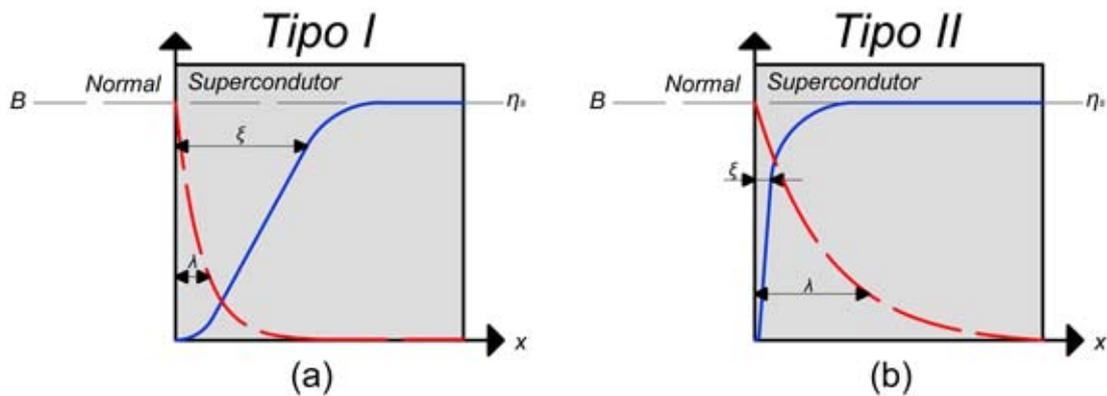


Figura 2.6: Ilustração da fronteira entre a região normal e supercondutora, relacionando λ e ξ para os supercondutores (a) do tipo I e (b) do tipo II.

Uma outra abordagem, diz que os fluxóides de um supercondutor do tipo II são tubos com raio de valor equivalente à $\lambda(T)$ por onde circulam correntes supercondutoras em volta de um núcleo não supercondutor de raio $\xi(T)$. Esta outra interpretação está ilustrada na Figura 2.7 [12].

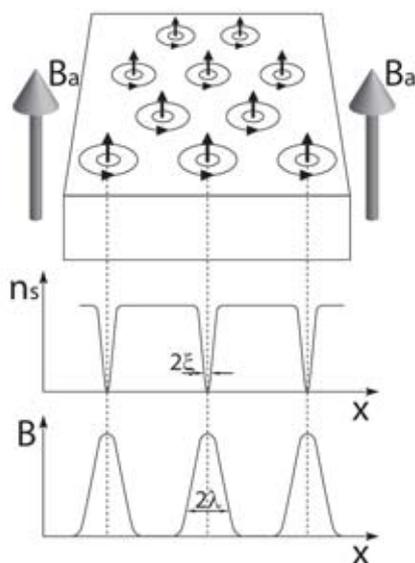


Figura 2.7: Ilustração de λ e ξ no interior de um supercondutor do tipo II no estado misto (figura extraída de [12]).

Em 1950, com a teoria de Ginzburg-Landau [13], surgiu uma nova forma de classificar os supercondutores em função dos parâmetros λ e ξ . Mas antes, é necessário compreender que existe uma energia de superfície na fronteira entre uma região normal e uma região supercondutora [14], de modo que a magnitude desta energia é diretamente proporcional à área da fronteira entre as regiões [12]. Os supercondutores do tipo I possuem energia de superfície positiva, enquanto que os supercondutores do tipo II possuem energia de superfície negativa [9].

A constante de Ginzburg-Landau (κ) é definida em função de λ e ξ :

$$\kappa = \frac{\lambda}{\xi} \quad (2.4)$$

O sinal da energia de superfície pode ser determinado comparando κ com a constante $\frac{1}{\sqrt{2}}$. Desta forma, se $\kappa < 0,707$, o supercondutor é classificado como sendo do tipo I. Por outro lado, se $\kappa > 0,707$, o supercondutor é classificado como sendo do tipo II. A Figura 2.8 mostra o diagrama de fases de um supercondutor em função do H externo e da constante κ [15].

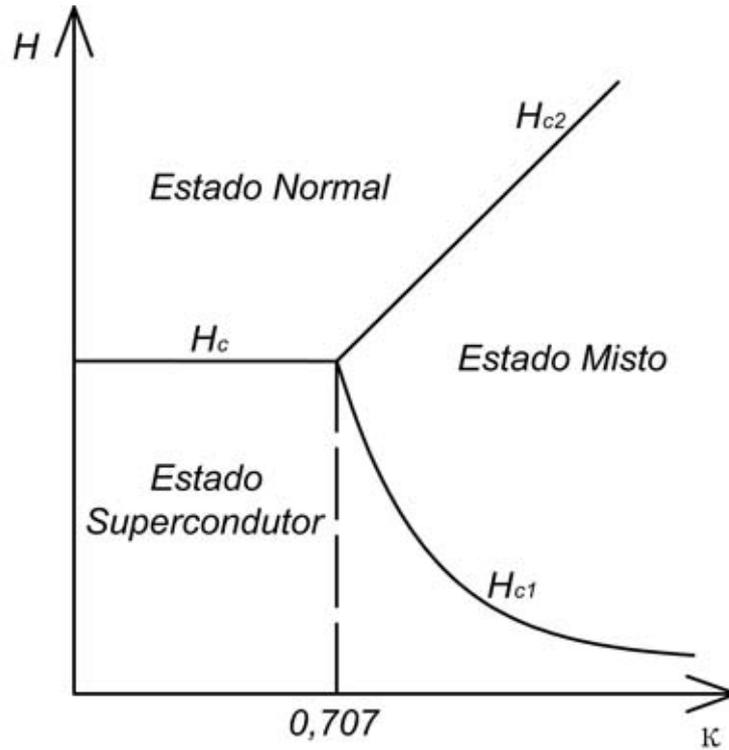


Figura 2.8: Diagrama de fases de um supercondutor em função do H externo e da constante κ [15].

2.5 Limites da Supercondutividade

Este tópico tem como objetivo organizar conceitos que foram apresentados ao longo do capítulo e apresentar os fatores teóricos e práticos que limitam a utilização dos supercondutores. É comum encontramos na literatura que um material supercondutor tem os limites da supercondutividade definidos por uma superfície que relaciona T_c , H_c e J_c e separa a região normal da região supercondutora [16]. Esta abordagem, apesar de ser bem aceita no meio acadêmico, não representa uma série de fenômenos que foram apresentados neste trabalho.

A Figura 2.9 ilustra a superfície que relaciona T_c , H_{c2} e J_d e separa a região normal da região supercondutora. Como já foi mencionado, qualquer uma destas três grandezas pode fornecer a energia necessária para separar os elétrons dos pares de Cooper, fazendo com que o material transite para o estado normal. Obviamente, esta energia pode ser fornecida parcialmente por cada uma das grandezas, de modo que a região onde o material se encontra no estado supercondutor não poderia ser representada por um cubo.

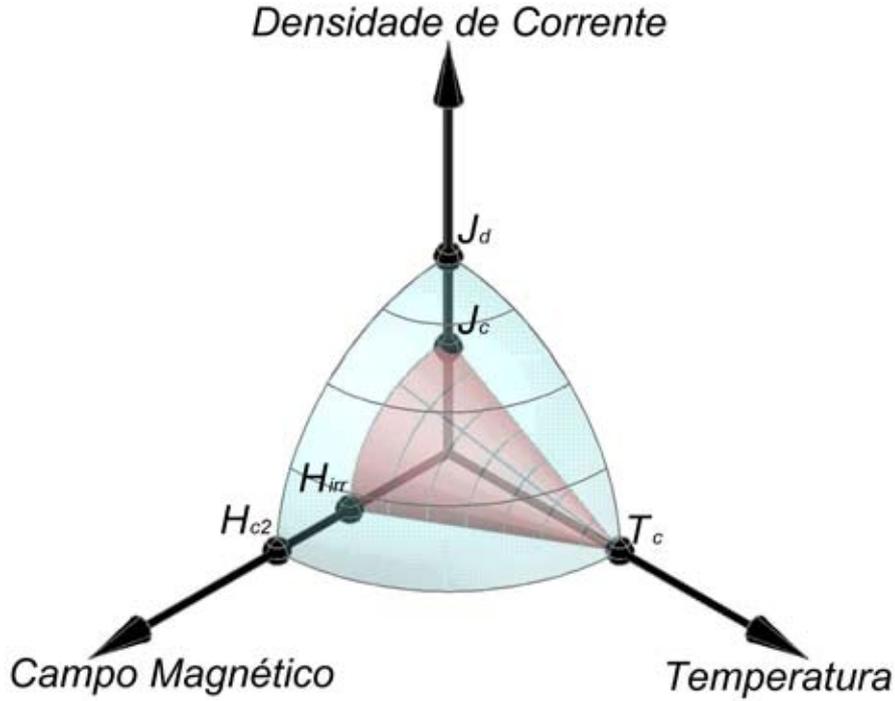


Figura 2.9: Ilustração dos limites teóricos e práticos dos supercondutores do tipo II.

Existem fenômenos que limitam a utilização dos supercondutores antes mesmo que os pares de Cooper sejam desfeitos. A densidade de corrente limite J_d , por exemplo, é um valor teórico estimado por [11]:

$$J_d = \frac{\phi_0}{\frac{3}{\sqrt{3}} \cdot \pi \cdot \mu_0 \cdot \lambda(T)^2 \cdot \xi(T)} \quad (2.5)$$

A densidade de corrente J_d só poderia ser atingida com um nível de aprisionamento de fluxo (“flux pinning”) altíssimo, que não se consegue atingir na prática [7]. Por outro lado, existe uma densidade de corrente crítica (J_c), que também depende da qualidade dos centros de aprisionamento da rede de vórtices, a partir da qual os fluxóides começam a se mover (“flux flow”) dissipando energia. Este fenômeno ocorre devido à força de Lorentz ($\vec{F}_L = \vec{J} \times \vec{B}$) a qual os vórtices estão submetidos [11]. Quando \vec{F}_L é maior que a força de aprisionamento (“pinning force”, \vec{F}_P), os vórtices movimentam-se fazendo com que o material tenha um comportamento resistivo, apesar de ainda se encontrar no estado supercondutor.

Outro parâmetro importante que pode ser estimado através da teoria de Ginzburg-Landau é H_{c2} [17]:

$$H_{c2}(T) = \frac{\phi_0}{2 \cdot \pi \cdot \mu_0 \cdot \xi(T)^2} \quad (2.6)$$

Na prática, o supercondutor deixa de ser útil na maioria das aplicações quando submetido a um $H < H_{c2}$. Este H é conhecido como intensidade de campo irreversível (H_{irr}), e representa o H em que ocorre uma mudança de fase na rede de vórtices do estado “sólido” (cristalino) para o “líquido” (desordenado), de modo que a capacidade de aprisionamento de fluxo é extinta e, conseqüentemente, a corrente crítica no material supercondutor não pode assumir valores diferentes de zero [18].

2.6 Supercondutores de Alta Temperatura Crítica

Durante muitos anos, desde a descoberta do fenômeno da supercondutividade em 1911, cientistas de todos os lugares do mundo se empenharam para descobrir novos materiais supercondutores. Em 1957, a teoria microscópica proposta por J. Bardeen, L. N. Cooper e J. R. Schrieffer (BCS) explicava o fenômeno para os supercondutores metálicos e alguns compostos cerâmicos, também conhecidos como supercondutores de baixa temperatura crítica (“Low Temperature Superconductors”, LTS). Baixas temperaturas de trabalho exigem equipamentos sofisticados de refrigeração. De maneira geral, os LTS utilizam o hélio líquido como fluido refrigerante.

Somente em 1986, com a descoberta do La-Ba-Cu-O, surgiram os supercondutores de alta temperatura crítica (“High Temperature Superconductors”, HTS) com valores de T_c acima de 30 K. A título de comparação, a Tabela 2.1 mostra o ano de descoberta e a temperatura crítica de alguns supercondutores.

A teoria BCS, que funcionava muito bem para os LTS, se mostrou ineficiente para explicar a formação dos pares de Cooper nos HTS. Ainda não existe uma teoria que seja capaz de explicar na íntegra o mecanismo da supercondutividade do ponto de vista quântico.

Supercondutores do tipo HTS possuem temperatura crítica elevada em relação aos demais supercondutores, tornando possível a refrigeração com nitrogênio líquido a 77K e reduzindo consideravelmente o custo de refrigeração. Alguns HTS possuem T_c menor que a temperatura do nitrogênio líquido, como é o caso do diboreto de magnésio (MgB_2) que possui $T_c = 39$ K, e podem ser refrigerados com gás hélio, que também possui custo de refrigeração menor que o do hélio líquido.

Os HTS mais utilizados são o $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ (Y-123), o $Bi_2Sr_2CaCu_2O_x$ (Bi-2212) e o $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_x$ (Bi-2223). Neste trabalho, o enfoque será no $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$,

Tabela 2.1: Descoberta de novos Materiais Supercondutores e suas temperaturas críticas (adaptada da referência [19, 20]).

Material	T_c (K)	Ano
Hg	4,1	1911
Pb	7,2	1913
Nb	9,2	1930
NbN _{0,96}	15,2	1950
Nb ₃ Sn	18,1	1954
NbTi	9,2	década de 1960
Nb ₃ (Al _{0,75} Ge _{0,25})	20-21	1966
Nb ₃ Ga	20,3	1971
Nb ₃ Ge	23,2	1973
Ba _x La _{5-x} Cu ₅ O _y	30-35	1986
(La _{0,9} Ba _{0,11}) ₂ Cu _{4-δ} (1 GPa)	52	1986
YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ}	92	1987
Bi ₂ Sr ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₁₀	110	1988
Tl ₂ Ba ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₁₀	125	1988
Tl ₂ Ba ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₁₀ (7 GPa)	131	1993
HgBa ₂ Ca ₂ Cu ₃ O _{8+δ}	133	1993
HgBa ₂ Ca ₂ Cu ₃ O _{8+δ} (25 GPa)	155	1993
Hg _{0,8} Pb _{0,2} Ba ₂ Ca ₂ Cu ₃ O _x	133	1994
HgBa ₂ Ca ₂ Cu ₃ O _{8+δ} (30 GPa)	164	1994
Hg _{0,8} Tl _{0,2} Ba ₂ Ca ₂ Cu ₃ O _{8,33} (30 GPa)	138	1995
MgB ₂	39	2001

que é conhecido como *ítrio-bário-cobre* (YBCO) e apresenta uma série de vantagens sobre os demais supercondutores. A Figura 2.10 relaciona as curvas de H_{c2} e H_{irr} em função da temperatura para diferentes supercondutores. Nota-se que na temperatura do nitrogênio líquido, o YBCO é único o que apresenta $\mu_0 \cdot H_{irr}$ aceitável para aplicações práticas (entre 5 e 7 T). O Bi-2223, por exemplo, apesar de possuir H_{c2} maior que o do YBCO, possui $\mu_0 \cdot H_{irr} \simeq 0,3$ T em 77 K. De fato, as aplicações são limitadas pelo valor de H_{irr} , onde J deixa de existir.

Os valores tanto de J_c como de H_{irr} podem ser aumentados melhorando o aprisionamento de fluxo. No caso do YBCO, o comprimento de coerência é tão pequeno ($\xi(0) \simeq 1,5$ nm) que mesmo defeitos com dimensões da ordem de grandeza do tamanho de um átomo podem aprisionar fluxo. Além disso, o YBCO possui $\lambda(0) \simeq 150$ nm e é facilmente classificado como um supercondutor do tipo II ($\kappa = \frac{\lambda}{\xi} = 100 > 0,707$).

A estrutura cristalina do YBCO é mostrada na Figura 2.11 e depende do teor de oxigênio da amostra. O valor máximo de T_c é de aproximadamente 92 K e ocorre quando $\delta = 0,06$ [21]. A quantidade de portadores de carga, responsáveis pelo controle das propriedades supercondutoras do material, também depende do teor de oxigênio. Uma das grandes dificuldades no preparo do YBCO é otimizar o teor de

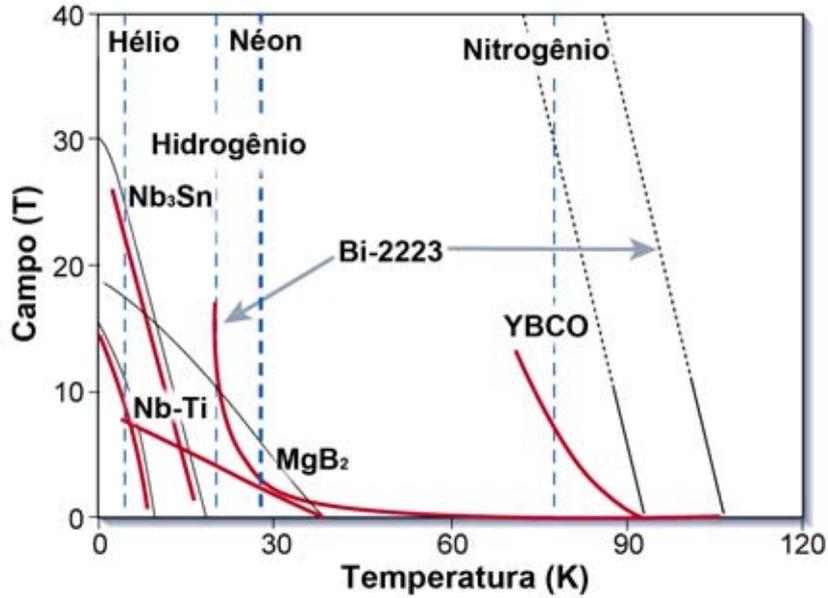


Figura 2.10: Diagrama de H_{c2} (em preto) e H_{irr} (em vermelho) em função da temperatura (adaptada da referência [11]).

O_2 em todo material, o que torna difícil garantir a homogeneidade da amostra [21]. Apenas para exemplificar, conforme o valor de δ varia de 0 até 1, a T_c do material varia de 92 K até 0 K, respectivamente [21].

Outra observação importante que pode ser feita a partir da Figura 2.11 é a de que o YBCO é um composto altamente anisotrópico. A anisotropia faz com que tanto o valor de H_{c2} com o de H_{irr} variem em função da direção. Desta forma, a relação entre os campos críticos paralelo (H_{c2}^{\parallel}) e perpendicular (H_{c2}^{\perp}) ao plano a-b é definida pela constante η [11]:

$$\eta = \frac{H_{c2}^{\parallel}}{H_{c2}^{\perp}} \quad (2.7)$$

Para o YBCO, o valor de η está entre 5 e 7. Este valor tende a ser maior em amostras texturizadas, onde as estruturas cristalinas do supercondutor estão alinhadas em uma mesma direção. Por outro lado, a densidade de corrente crítica na fronteira entre os grãos cai exponencialmente de acordo o nível de desorientação dos grão, de modo que as amostras de YBCO texturizadas possuem propriedades melhores que as amostras não texturizadas. A fronteira entre os grão é chamada de elo fraco (“weak links”) e não é supercondutoras [21]. A rigor, existe uma temperatura crítica referente aos elos fracos T_c^{EF} para que o transporte de corrente ocorra sem dissipação de energia [21], mas este assunto não será abordado neste trabalho devido a sua irrelevância nos estudos de fitas de segunda geração, como será comentado na seção 2.7.

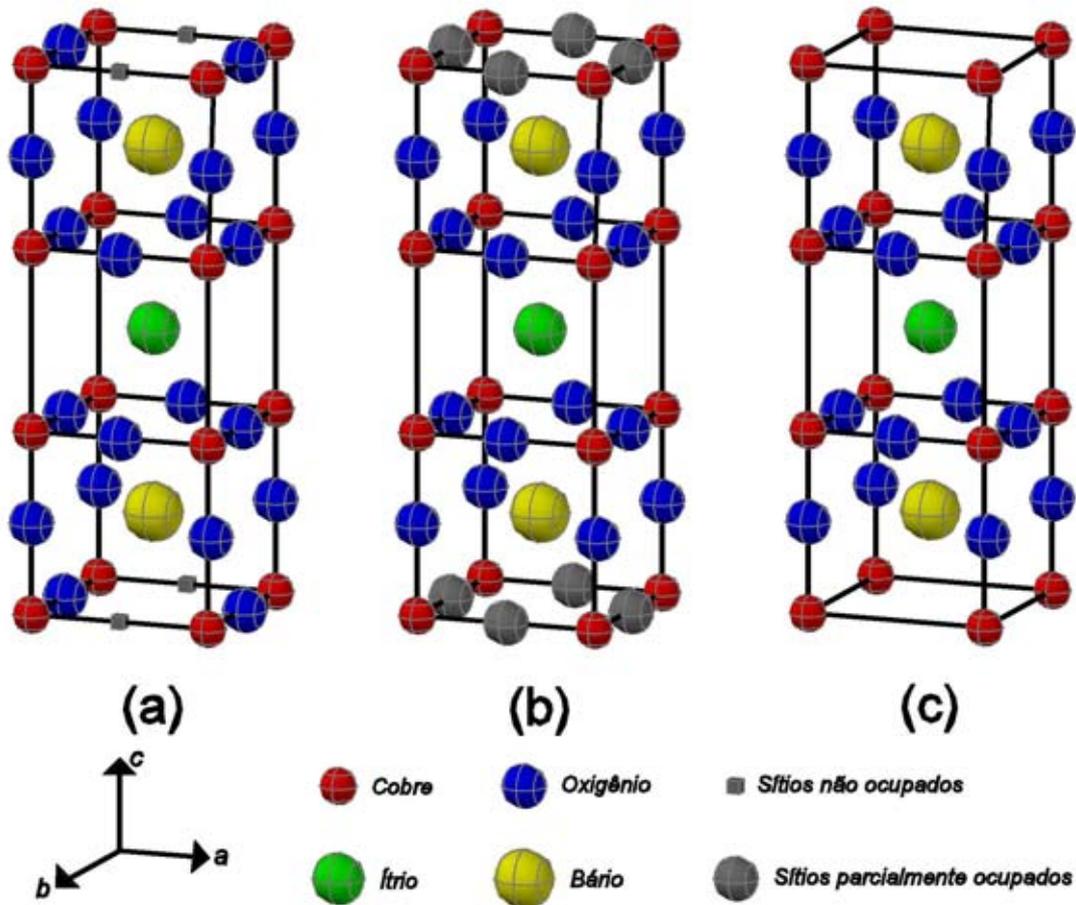


Figura 2.11: Estrutura cristalina do YBCO ($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$): (a) $\delta = 0$, (b) $\delta = 0,5$ e (c) $\delta = 1$ [21].

2.7 Fitas Supercondutoras de Segunda Geração

Antes da descoberta dos HTS, aplicações com supercondutores maciços (“bulks”) não eram consideradas viáveis. O surgimento da aplicação de levitação magnética de um ímã permanente fez com que os pesquisadores começassem a pensar no potencial destes materiais [22]. Algumas linhas de pesquisadores consideram que os supercondutores maciços apresentam vantagens em relação às fitas, além de já terem sido utilizados em diversas aplicações práticas [23]. No entanto, o processo de fabricação destes materiais sempre encontrou dificuldades em manter um padrão de qualidade de amostras, de modo que as amostras maciças são inhomogêneas e produzidas em pequena escala. Atualmente, quando se fala em primeira ou segunda geração de supercondutores, entende-se uma produção em escala industrial onde os supercondutores estão encapsulados na forma de fita. A primeira geração de fitas supercondutoras comerciais utiliza o supercondutor Bi-2223 e foi desenvolvida em escala industrial no período de 2000 à 2005, quando teve sua produção limitada principalmente por fatores econômicos, apesar deste material continuar sendo produzido.

A produção em escala das fitas de YBCO deu origem à segunda geração de supercondutores, que do ponto de vista econômico são bem mais atraentes que as fitas de primeira geração, onde se utiliza uma matriz de Ag que representa cerca de 70% do volume da fita [20]. Existem alguns fabricantes de fitas 2G, com destaque para a American Superconductors (AMSC) [24] e a SuperPower (SP) [25]. Segundo estes fabricantes, comprimentos da ordem de km de fitas 2G podem ser produzidos com grande homogeneidade. As fitas 2G já estão sendo utilizadas em diversos protótipos para uma série de aplicações, como cabos para a transmissão de energia elétrica [26], limitadores de corrente [27], veículos de levitação magnética (MagLev) [28], máquinas elétricas [29], eletromagnetos de alto campo [30], mancais magnéticos [31], o armazenador de energia magnética supercondutor (“superconducting magnetic energy storage”, SMES) [32] entre outras aplicações.

As fitas 2G possuem um grau de orientação bastante elevado entre as fronteiras dos grãos, fazendo com que este tipo de material se comporte de maneira muito semelhante a um monocristal [11]. Além disso, os defeitos que são introduzidos nas fitas 2G possuem dimensões da ordem de nm, aumentando consideravelmente a capacidade de aprisionamento de fluxo em relação à um supercondutor maciço, onde os defeitos possuem dimensões da ordem de μm .

Na segunda geração, as fitas possuem uma estrutura de camadas orientadas que são depositadas sob um substrato. A Figura 2.12 mostra as camadas da fita 2G modelo 344C da AMSC. São necessárias diversas camadas com diferentes funções para que a fita tenha estabilidade química, térmica, mecânica e elétrica. Algumas destas funções são [20]:

- O substrato serve de base para a formação de uma alta orientação dos grãos no recobrimento com supercondutor.
- A camada de prata fornece baixa resistividade de contato elétrico com a camada de HTS e proteção contra o ambiente externo.
- O YBCO contém dispersão de nanopontos de óxido de ítrio e cuprato de prata. Os nanopontos aumentam a capacidade de aprisionamento de vórtices e, conseqüentemente, a capacidade de transporte de corrente.
- A camada externa não é necessariamente de cobre. Esta camada, além de aumentar a resistência mecânica do conjunto, provê estabilidade térmica.

Vale a pena ressaltar que a camada de YBCO para a fita da Figura 2.12, possui apenas 1 μm de espessura. Esta mesma fita possui corrente crítica (I_c) de 84 A. O fato é que a área da seção que transporta corrente em um HTS é muito menor do que a área total da seção transversal do material [11], mas esta diferença é menor nos filmes finos que nos supercondutores maciços.

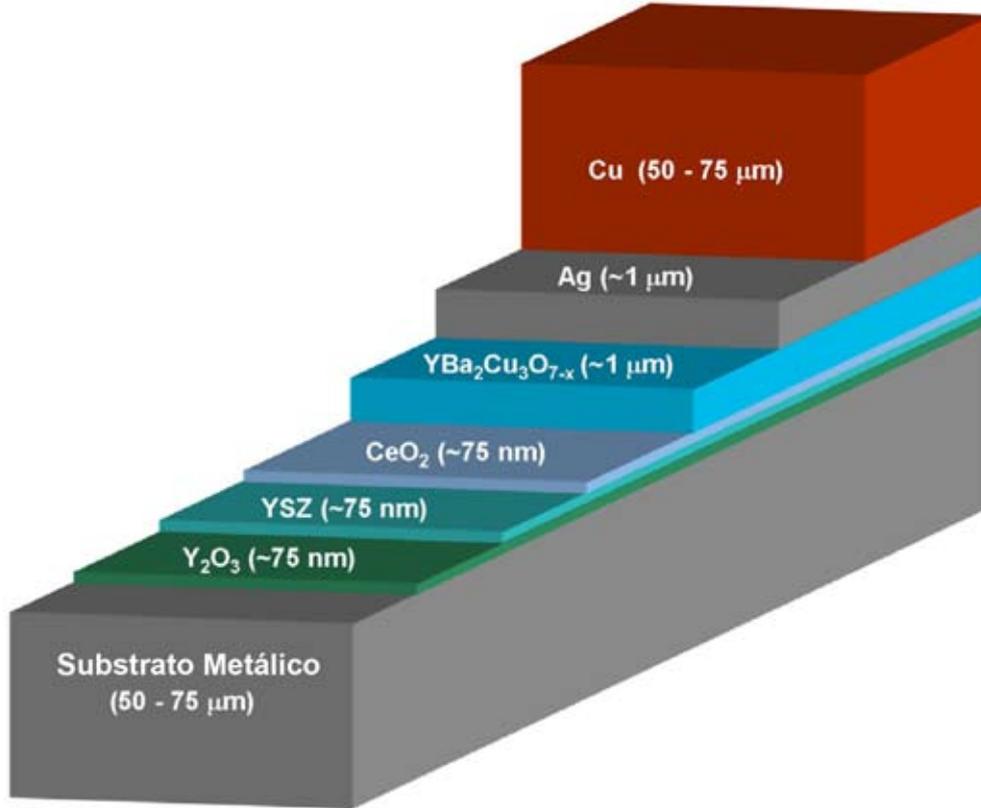


Figura 2.12: Estrutura de camadas da fita 2G modelo 344C da AMSC (adaptada da referência [33]).

As propriedades das fitas 2G são consideravelmente superiores à dos supercondutores maciços. Um bloco de YBCO de boa qualidade possui J_c de cerca de $8 \cdot 10^{10}$ A/m² a 4 K (0 T) e $1 \cdot 10^9$ A/m² a 77 K (0 T) [34]. Por outro lado, a camada de YBCO das fitas 2G superam $1,37 \cdot 10^{11}$ A/m² a 4 K (0 T) e $2 \cdot 10^{10}$ A/m² a 77 K (0 T) [35]. Para o YBCO, o valor de J_d é de aproximadamente $3 \cdot 10^{12}$ A/m² a 4 K, o que mostra o quanto estes materiais ainda podem evoluir. Na verdade, as fitas 2G estão evoluindo rapidamente: em 2007, falava-se em manter um determinado padrão de qualidade em comprimentos da ordem de centenas de metros de fita 2G [36]; em 2009 já estava se falando em milhares de metros.

Um conceito muito utilizado quando se trabalha com fitas supercondutoras é o de densidade de corrente de engenharia (J_e), que é definido como a razão entre o valor de corrente que é transmitida e a área da seção de toda a fita, e não apenas da camada supercondutora.

Neste trabalho, utilizou-se a fita 2G modelo 344C da AMSC (especificações técnicas no Apêndice A para a corrente nominal de 70 A). Nesta fita, as camadas externas de cobre estão acopladas às demais camadas por meio de um filete de solda, como se pode ver na Figura 2.13. O diâmetro mínimo de curvatura da fita é de 25 mm e ela vem estanhada para evitar problemas de contato devido à oxidação do cobre.



Figura 2.13: Ilustração da seção transversal da fita 2G modelo 344C da AMSC.

Existem ainda outras características importantes das fitas 2G que serão mencionadas ao longo do trabalho. O fato é que estes materiais podem ser projetados para cada tipo de aplicação. A título de exemplo, o substrato da fita 344C é ferromagnético, de modo que existem outros modelos mais apropriados para serem utilizadas em mancais magnéticos. Para limitadores de corrente de curto-circuito, é interessante escolher um modelo que substitua o revestimento de cobre por aço inoxidável. É possível também comprar fitas sem revestimento ou adesivadas com um material isolante (kapton). Além disso, alguns modelos são projetados para minimizar as perdas em corrente alternada. De certa forma, o mérito deste trabalho está em trazer este conhecimento para universidade, em especial para o LASUP, que até o momento tem experiência apenas com supercondutores maciços.

2.8 Mancais Magnéticos Supercondutores

Um mancal é um dispositivo que fornece suporte à determinada carga com o objetivo de obter o menor atrito possível em determinada direção de deslocamento ou sentido de rotação. O eixo de alguns motores, por exemplo, são sustentados por mancais de elementos rolantes (rolamentos) que permitem o movimento de rotação do eixo. No entanto, o atrito viscoso e a força de atrito nos pontos de contato entre o suporte e o eixo do motor são fatores que comprometem a eficiência do mancal, principalmente quando grandes velocidades angulares são atingidas. Existem diversas soluções que fornecem suporte mecânico aos mais diversos dispositivos. Alternativamente, os mancais magnéticos operam sem que haja qualquer tipo de contato físico entre o objeto que se move e o que está fixo, tendo seu princípio de funcionamento baseado na força de interação entre campos magnéticos e objetos ferromagnéticos.

Os mancais magnéticos supercondutores apresentam levitação passiva, de modo

que não é necessário exercer nenhum tipo de controle sobre estes dispositivos. A Figura 2.14 ilustra um ímã de Nd-Fe-B levitando devido às correntes que circulam no bloco supercondutor de YBCO. Estas correntes são induzidas no material supercondutor opondo-se à variação de campo magnético, enquanto a estabilidade lateral é obtida pela força de aprisionamento (“pinning force”) dos vórtices. O LASUP possui experiência com a levitação magnética supercondutora, aplicação onde existe um compromisso entre força de levitação e estabilidade lateral em função da distância entre o ímã e o supercondutor no instante em que este é resfriado.



Figura 2.14: Ilustração da levitação magnética supercondutora.

O estudo dos mancais magnéticos supercondutores utilizando fitas de segunda geração, assunto abordado neste trabalho, abre um novo leque de possibilidades nesta aplicação. Além de poderem ser utilizadas em mancais magnéticos passivos, as fitas 2G podem também ser utilizadas em mancais magnéticos ativos, onde a altura de levitação é controlada a partir da corrente imposta na fita.

Capítulo 3

Aparatos Experimentais

Este capítulo tem como objetivo apresentar os equipamentos utilizados durante o período de elaboração da dissertação. Alguns destes equipamentos foram utilizados em trabalhos anteriores e já pertenciam ao LASUP. Outros são propriedades do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica/Eletronbras (CEPEL), que nos deu suporte durante a realização de determinadas medições e experimentos. Além disso, alguns dispositivos foram desenvolvidos durante a realização do trabalho.

3.1 Emendas

A emenda de fitas supercondutoras de segunda geração é um ponto crítico na maioria dos dispositivos. Isto se deve ao fato de que, até o momento, não existe nenhum método capaz de criar uma conexão supercondutora entre dois pedaços deste material, ou seja, o melhor que se conseguiu até hoje são emendas resistivas, que inevitavelmente são um ponto de dissipação de energia e forte candidato ao “quench”¹. A AMSC possui um guia com os procedimentos para realizar emendas de qualidade [37, 38]. Um resumo destes procedimentos e cuidados pode ser visto a seguir:

- **Escolher o lado certo da fita 2G:** Como foi mostrado no Capítulo 2, as fitas supercondutoras da AMSC possuem uma estrutura em camadas onde uma das faces está mais perto do YBCO e a outra está mais perto do substrato. De modo a reduzir a resistência transversal entre as camadas de supercondutor das fitas, a emenda deve ser feita entre as faces que estão mais perto do YBCO. Para facilitar a identificação das faces, a AMSC faz uma marcação nas fitas, como pode ser visto na Figura 3.1.

¹Do inglês, “quench” é o termo utilizado quando a transição para o estado normal em um material supercondutor se propaga ao longo da amostra, devido ao aquecimento da mesma.



Figura 3.1: Marcação da AMSC indicando o lado do substrato nos supercondutores 344C.

- **Utilizar a solda adequada:** Novamente fazendo referência ao Capítulo 2, foi mostrado que a fita 344C possui uma fina camada lateral de solda unindo o cobre às demais camadas e protegendo o YBCO do ambiente externo (ver Figura 2.13). Assim, a emenda deve ser feita sem exceder o ponto de fusão desta solda, o que exige a utilização de uma solda de baixo ponto de fusão. Neste trabalho foi utilizada uma liga de índio e estanho (52%In-48%Sn) da Indium Corporation of America e o fluxo de solda sugerido pelo fabricante [39]. Estes materiais foram emprestados pelo CEPEL e podem ser vistos na Figura 3.2.



Figura 3.2: (a) Solda de baixo ponto de fusão e (b) fluxo de solda.

- **Temperatura Controlada:** O ponto de fusão da solda utilizada está entre 135 °C e 140 °C. Se a temperatura atingir 175 °C a fita supercondutora é delaminada. Além disso, as fitas 2G são sensíveis à temperatura e podem ter suas propriedades degradadas caso o processo não seja bem controlado. Para evitar estes problemas, utilizou-se uma estação de solda com temperatura controlada e resolução de 1 °C (modelo Weller WD2). Este equipamento pode

ser visto na Figura 3.3. A Tabela 3.1 [38] mostra o tempo máximo em que a fita pode ficar exposta a diferentes faixas de temperatura durante o processo de soldagem.

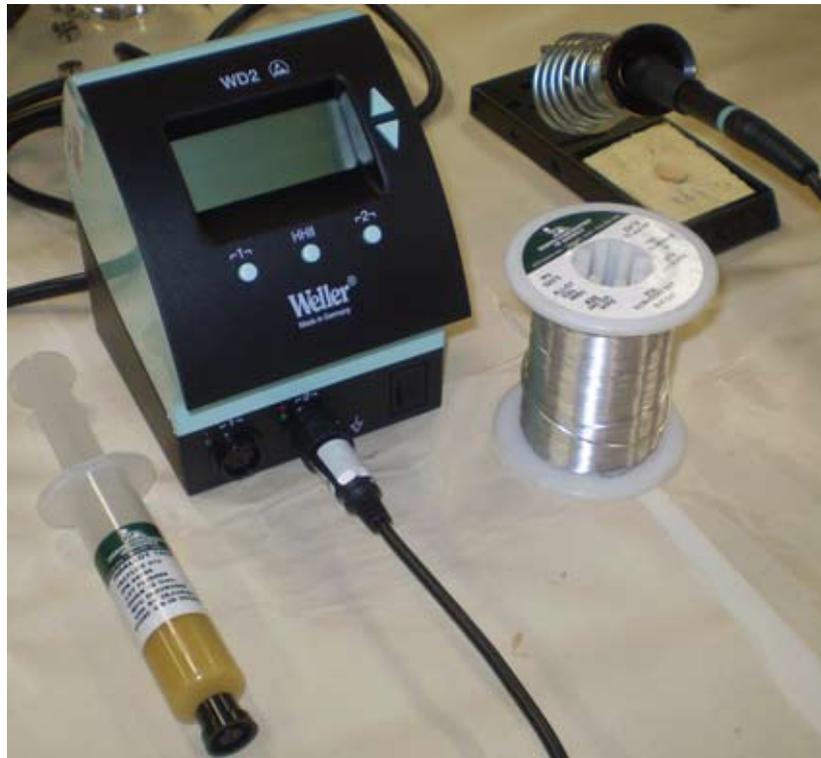


Figura 3.3: Estação de solda com temperatura controlada do CEPEL.

- **Camada de solda:** A Figura 3.4 mostra a vista lateral de dois tipos de emenda. Sempre que possível é preferível fazer uma emenda direta (Figura 3.4.a), mas em algumas configurações é necessário utilizar um pedaço de fita auxiliar (Figura 3.4.b). Pressionando as fitas durante o processo de soldagem é possível reduzir a espessura da camada de solda, fazendo com que a resistência caia para um valor residual devido a resistividade das camadas intermediárias aos supercondutores das fitas [40].
- **Comprimento de superposição:** O primeiro passo na confecção da emenda é estanhar (com solda de baixo ponto de fusão) os dois pedaços de fita 2G que serão emendados. Em seguida, estes pedaços são sobrepostos e novamente aquecidos. A resistência total da emenda depende do comprimento de super-

Tabela 3.1: Guia de tempo e temperatura de soldagem das fitas 344C [38].

Faixa de Temperatura (°C)	Tempo Máximo (minutos)
165 °C à 175 °C	3
155 °C à 165 °C	20
145 °C à 155 °C	60

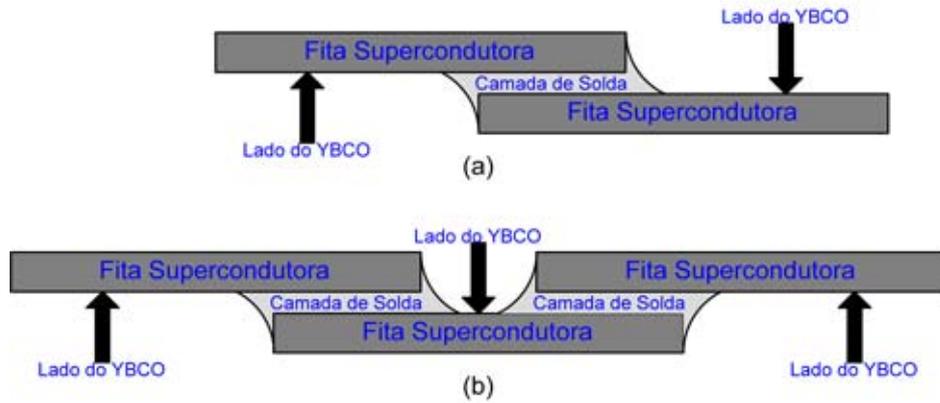


Figura 3.4: Vista lateral da emenda: (a) emenda direta e (b) emenda com tira auxiliar

posição das fitas e da espessura da camada de solda. A Tabela 3.2 [37] mostra as resistências de emendas de qualidade utilizando a fita 344C em diferentes configurações. Na prática, o menor valor de resistência de emenda que se consegue atingir está entre 10 nΩ e 20 nΩ.

Neste trabalho, foram construídos dois dispositivos para facilitar o processo de soldagem. O primeiro deles é voltado para emendas em superfícies planas e consiste em duas peças de alumínio fresadas, sendo uma um conector macho e a outra um conector fêmea. A peça com conector fêmea possui um trilho onde se deve colocar os pedaços de fita 2G estanhados que serão sobrepostos durante o processo de soldagem. O conector macho exercerá sobre as fitas e o conector fêmea uma pressão uniforme devido a um arranjo de molas. Para finalizar a emenda, todo o conjunto deve ser colocado em uma estufa ou forno com temperatura controlada. A Figura 3.5 mostra algumas fotografias deste dispositivo

A temperatura do forno-caixa onde onde foi realizada a emenda (emprestado pelo CEPTEL) foi monitorada com termopares espalhados em diversos pontos do forno, estando numa faixa de 140°C à 155°C. O tempo de duração do processo foi de aproximadamente 1 hora, levando em conta o tempo em que o forno leva para atingir a temperatura desejada (aproximadamente 40 minutos). Um dos pontos

Tabela 3.2: Resistência da emenda da fita 344C para diferentes configurações [37] .

Tipo de Emenda	Comprimento de Superposição das Fitas (mm)	Resistência (nΩ)
Emenda Direta	25	80
	50	40
	100	20
Emenda com Tira Auxiliar	25	160
	50	80
	100	40

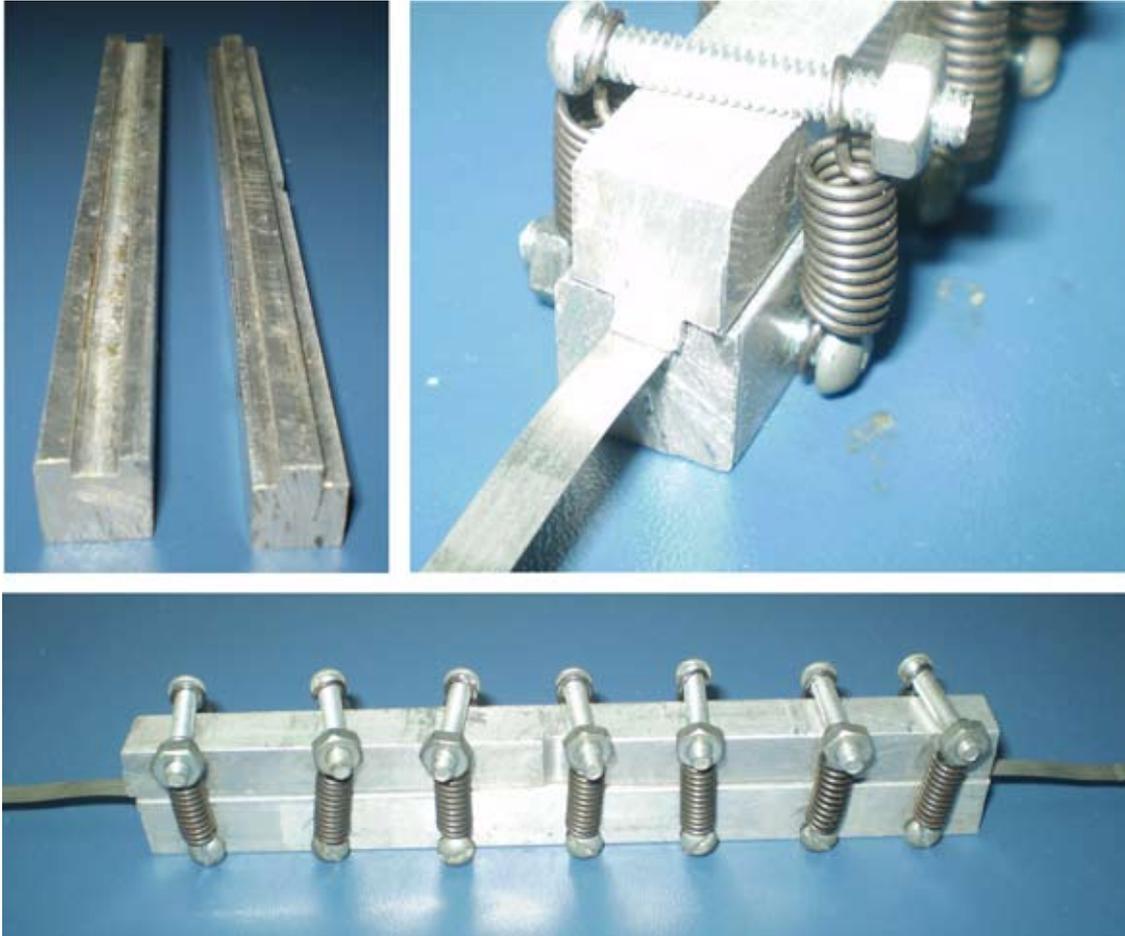


Figura 3.5: Fotos do dispositivo para realizar emendas planas.

críticos deste método é o fato de exigir que toda a fita 2G seja colocada no forno, e não apenas o pedaço onde será realizada a emenda. Idealmente, o dispositivo que pressiona as fitas deve possuir um sistema de aquecimento próprio e atingir a temperatura desejada o mais rápido possível.

Com o objetivo de preservar a emenda, é interessante que esta seja feita na posição em que será acomodada. O dispositivo mostrado na Figura 3.6 segue o mesmo princípio do dispositivo utilizado para realizar emendas planas, porém em uma superfície curva. Observa-se que este equipamento possui dois conectores machos, prevendo que serão realizadas emendas com tira auxiliar.

3.2 Bobinas Supercondutoras

O principal objeto de estudo deste trabalho é uma bobina supercondutora com fitas 2G da AMSC modelo 344C. A confecção desta bobina requer uma série de cuidados especiais para que as fitas não sejam mecanicamente danificadas. O primeiro passo no projeto de um dispositivo que ofereça suporte à esta montagem é determinar a forma como o carretel deve ser enrolado. Neste trabalho, adotou-se um

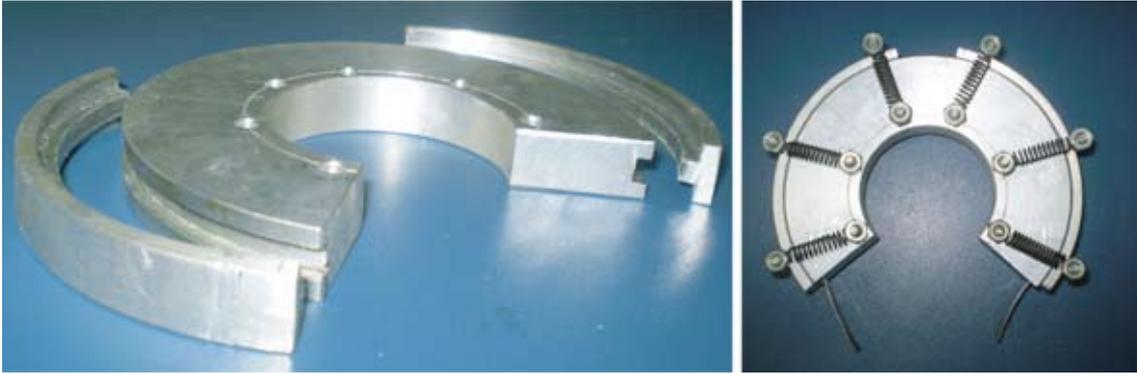


Figura 3.6: Fotos do dispositivo para realizar emendas curvas.

enrolamento de dupla camada, fazendo com que os terminais da bobina estivessem sempre expostos. A Figura 3.7 mostra uma ilustração do carretel projetado para a bobina supercondutora.

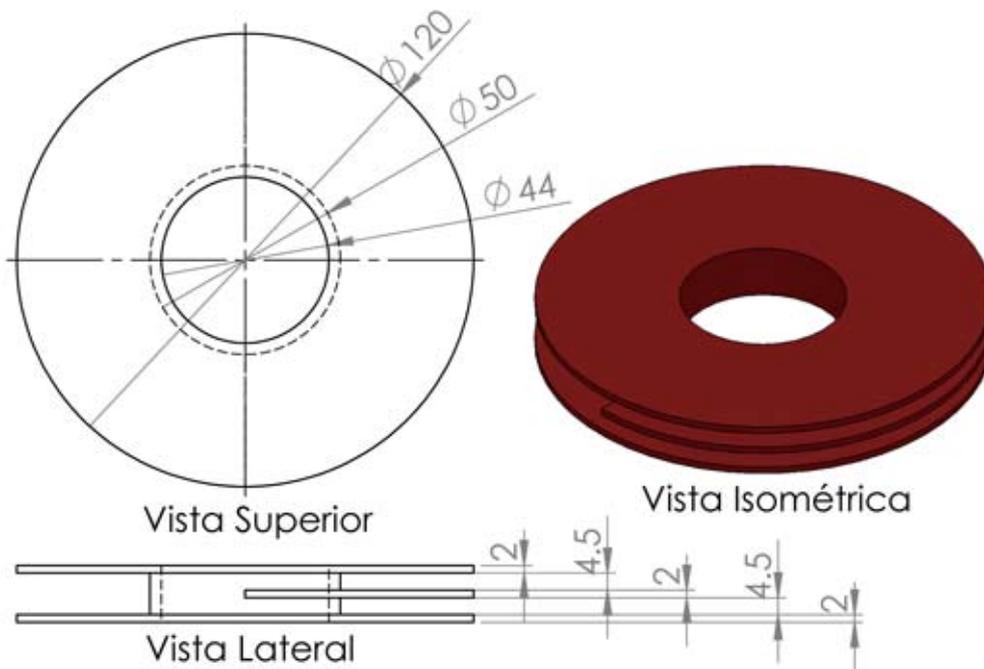


Figura 3.7: Ilustração do carretel projetado para a bobina supercondutora.

Nota-se na Figura 3.7, que o carretel possui uma parede intermediária para separar as duas camadas de enrolamento da bobina e mantê-las isoladas. Esta parede intermediária cobre apenas metade do perímetro do carretel, permitindo que a fita realize um cruzamento de uma camada para outra. O cruzamento deve ocorrer apenas uma vez e tornar possível que metade da fita seja enrolada em cada camada, deixando os terminais expostos e sem que seja necessário realizar nenhuma emenda. Este processo será melhor compreendido no tópico 3.2.2 deste capítulo, onde será descrito o dispositivo construído para dar suporte mecânico aos carretéis durante a bobinagem.

A escolha do material do carretel levou em conta a capacidade de suportar a temperatura do nitrogênio líquido, a impermeabilidade, resistência mecânica, dilatação térmica, facilidade de manuseio entre outros atributos. Os dois materiais que melhor atenderam às necessidades foram o UHMW, que é um polietileno de alta densidade molecular, e o G10, um laminado de fibra de vidro com resina epóxi. Por facilitar a construção da bobina, optou-se pelo G10, uma vez que este material permitiu colar a parede intermediária que separa as duas camadas da bobina com resina epóxi, que não adere ao UHMW.

3.2.1 Fita de Cobre

Devido à pouca robustez mecânica e ao preço elevado das fitas 2G, o processo de confecção da bobina foi testado com fitas de cobre com as mesmas dimensões da fita supercondutora. A fita de cobre foi obtida a partir de fio esmaltado de cobre processado na laminadora do CEPTEL. O processo de laminação faz com que o verniz se desfaça. O objetivo de construir uma bobina com fitas de cobre foi prever todas as dificuldades construtivas da bobina supercondutora e evitar que as fitas 2G fossem danificadas. Além disso, foram obtidas informações importantes para a simulação e projeto da bobina, como por exemplo, o fator de empilhamento e o comprimento de fita utilizado. A Figura 3.8 mostra a laminadora do CEPTEL.

A laminadora consiste em dois rolos maciços acionados por um motor que prensam o fio de cobre achatando-o. A distância entre os rolos foi ajustada para o valor mais próximo possível da altura da fita ($\simeq 0,19$ mm). O fio AWG 19 foi escolhido por possuir seção transversal de cobre com área aproximadamente igual à da fita ($0,19$ mm \times $4,4$ mm = $0,84$ mm²). Na prática, a velocidade com que o fio é puxado pela laminadora altera a largura da fita. O resultado do processo de laminação pode ser visto na Figura 3.9. Devido a limitações da máquina, a menor espessura de fita que se conseguiu produzir foi de cerca de $0,3$ mm.

O fator de empilhamento da bobina montada com fitas de cobre ficou em torno de 95%. O carretel da Figura 3.7 foi projetado com base nesta informação para uma bobina que utiliza 60 m de fita 2G e possui cerca de 120 espiras em cada camada.

3.2.2 Bobinadeira

Considerando a fragilidade mecânica das fitas supercondutoras, foi construído um dispositivo para auxiliar no processo de construção da bobina. Um aspecto importante do enrolamento é que as espiras precisam estar isoladas, caso contrário a indutância da bobina pode fazer com que a corrente encontre um caminho de menor impedância por entre as espiras. Esta isolação é feita com kapton [41], um material com rigidez dielétrica de 300 kV/mm e capaz de suportar a temperatura

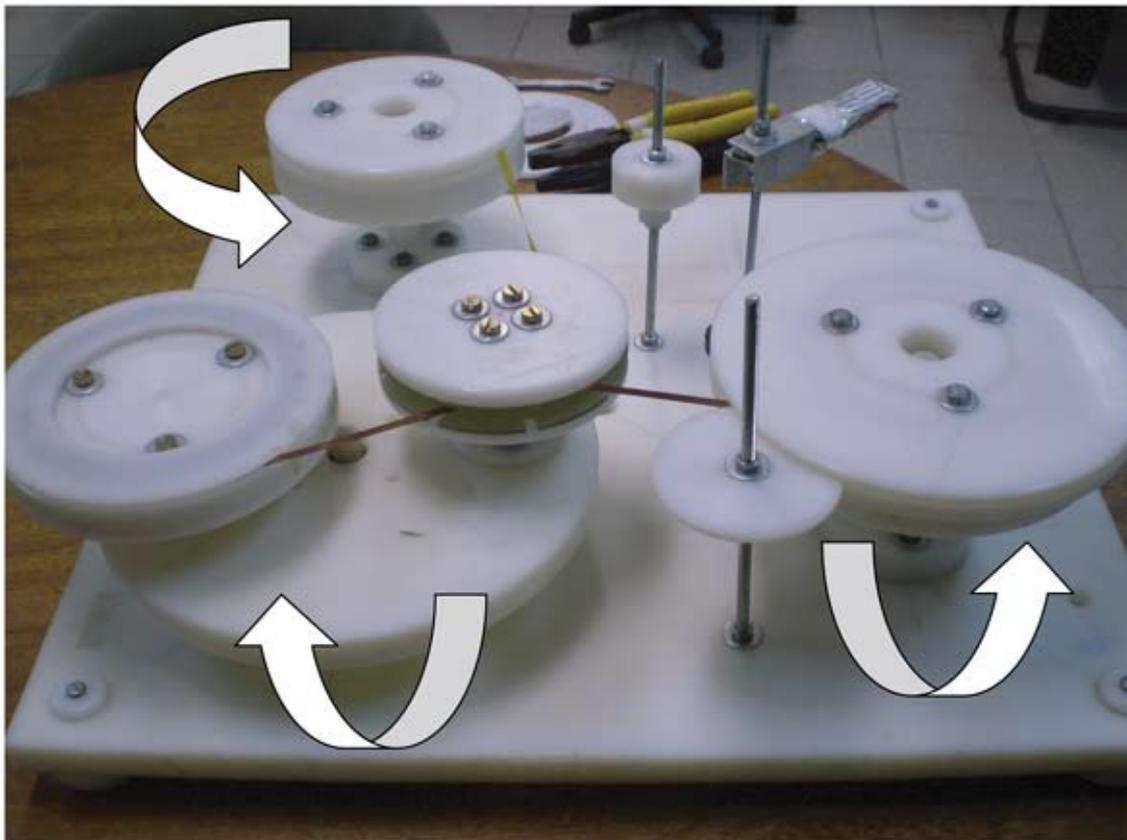
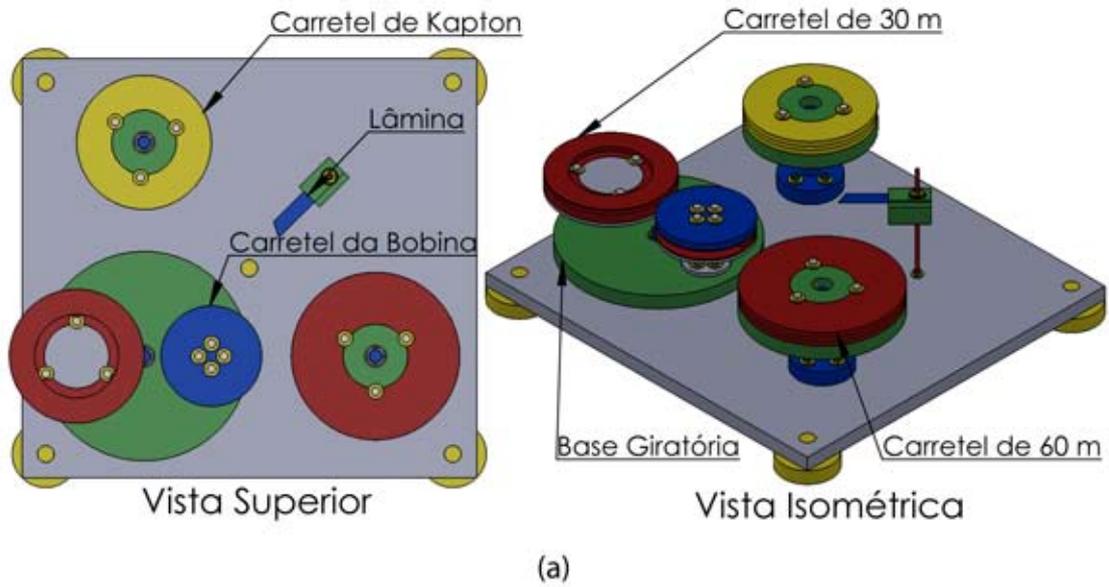


Figura 3.8: Laminadora do CEPEL.



Figura 3.9: Fita de cobre obtida no processo de laminação.

do nitrogênio líquido. A inserção da camada de $25\ \mu\text{m}$ de espessura de kapton entre as espiras da bobina foi prevista na bobinadeira projetada, que pode ser vista na Figura 3.10.



(b)

Figura 3.10: Protótipo da bobinadeira construído em polietileno: (a) ilustração e (b) foto.

Na Figura 3.10, a *Base Giratória*, o *Carretel de Kapton* e o *Carretel de 60 m* estão

apoiados em rolamentos e por isso possuem movimento de rotação. Por se tratar de um protótipo, a bobinadeira foi construída em polietileno, que é um material barato e fácil de usar. Obviamente, o polietileno, por se tratar de um material macio, poderia se deformar com facilidade causando folgas indesejadas à bobinadeira. Neste caso, o ideal seria utilizar aço inoxidável. No entanto, o dispositivo atendeu as necessidades do projeto.

Este equipamento foi adaptado para diversas etapas do processo de confecção da bobina. A primeira delas consiste em cortar o kapton, que originalmente estava em um rolo de 19 mm de largura, em tiras de largura ligeiramente maior que a da fita supercondutora. A *Lâmina* da bobinadeira foi inserida para realizar esta tarefa, como pode ser visto na Figura 3.11. Este método funcionou de maneira precária, devido às dificuldades em manter o kapton alinhado.

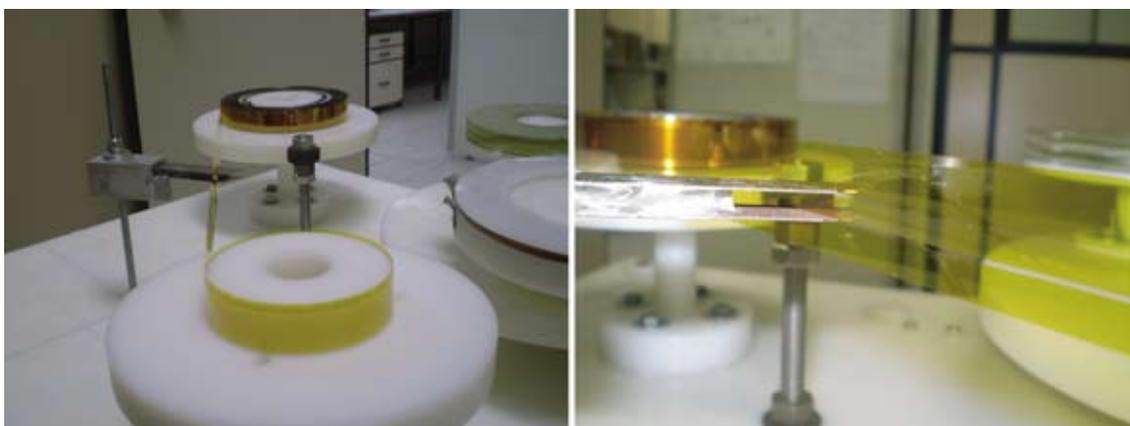


Figura 3.11: Corte do kapton.

Uma das grandes dificuldades em construir esta bobina é o fato de o enrolamento não ter início pelas extremidades da fita, mas sim pela meio. Desta forma, foi feita uma nova adaptação no equipamento para separar os 60 m de fita 2G em dois carretéis com 30 m cada. Inicialmente toda a fita estava no *Carretel de 60 m*. A Figura 3.12 mostra as hastes que foram inseridas para manter a fita bem esticada neste processo: H1 serve de apoio para a fita não curvar de maneira que possa danificá-la; H2 impede que as paredes do *Carretel de 60 m* venham a fletir e pressionar a fita; H3 é um freio para o rolamento do *Carretel de 60 m*, impedindo que este realize movimentos de rotação indesejados.

A próxima etapa tem por objetivo cruzar a fita entre as duas camadas da bobina, como pode ser visto na Figura 3.13 para a fita de cobre. Este cruzamento é um dos pontos críticos da bobina, pois a fita não suporta grandes tensões mecânicas (ver Apêndice A), exigindo que a transição de uma camada para outra se dê da maneira mais suave possível. O cruzamento foi testado com fita supercondutora antes de se iniciar o enrolamento da bobina e não foram identificados danos ao material ou

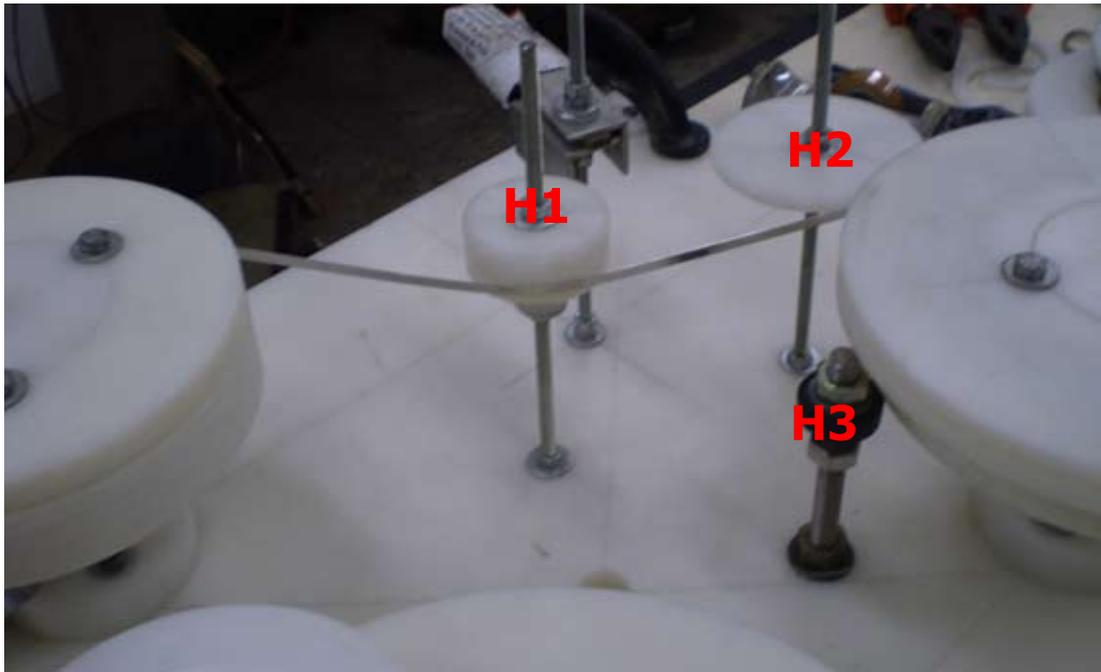


Figura 3.12: Adaptação da bobinadeira para separar a fita 2G em dois carretéis.

degradações das propriedades do supercondutor. No entanto, realizar o cruzamento com dois carretéis conectados é um processo bem mais delicado do que realizar esta tarefa com um pedaço pequeno de fita. No Capítulo 4 será discutida a possibilidade de o cruzamento ter reduzido a J_C da fita e ter se tornado uma região mais susceptível ao “quench”.

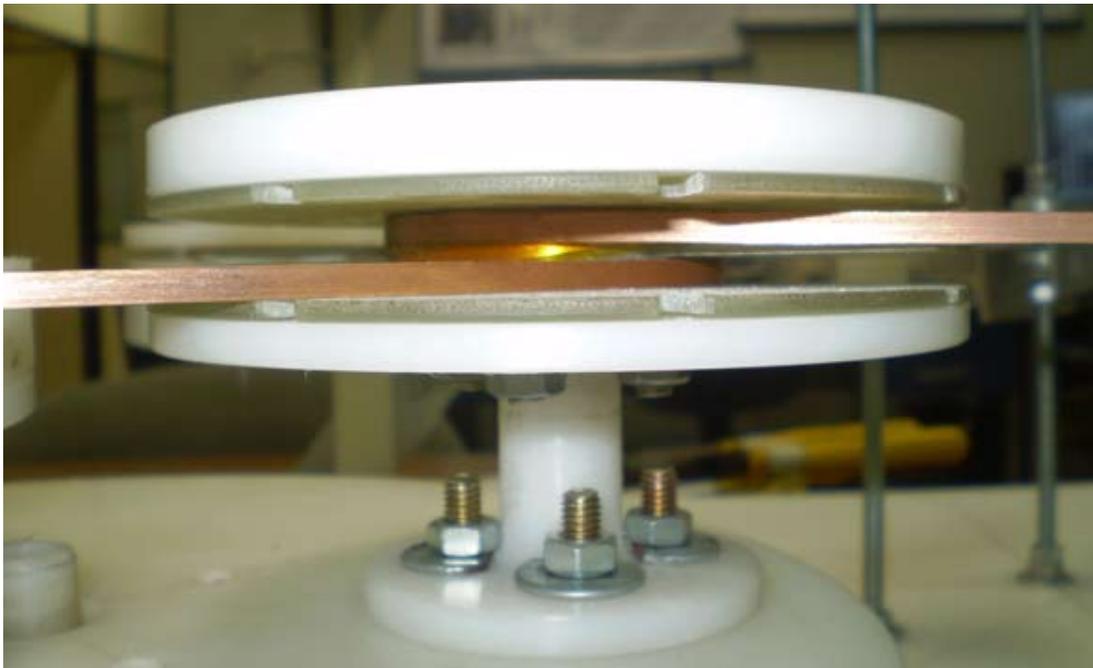


Figura 3.13: Cruzamento da fita entre as duas camadas da bobina.

Após colocar os carretéis em seus respectivos lugares, foi possível enrolar a pri-

meira metade da bobina. Rotacionando a *Base Giratória* e mantendo todos os carretéis esticados, inseriu-se uma camada de kapton entre cada espira de fita supercondutora, como se pode ver na Figura 3.14.

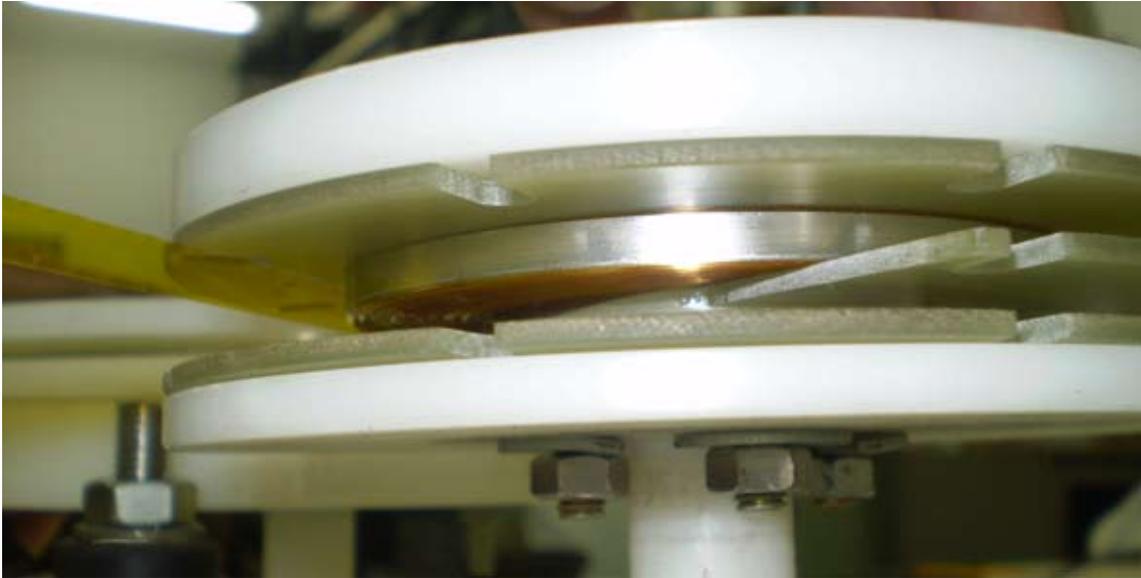


Figura 3.14: Bobina supercondutora parcialmente enrolada.

Uma vez terminado o enrolamento da primeira camada, o *Carretel de 30 m* foi posicionado no lugar do *Carretel de 60 m*. Com esta nova configuração do equipamento, todo o processo foi repetido para o enrolamento da segunda camada. A Figura 3.15 mostra o resultado final, onde se pode notar as ranhuras que foram fresadas no carretel da bobina para que se pudesse fazer uma amarração com kapton.



Figura 3.15: Bobina completa.

3.2.3 Bobinas com Fita Supercondutora 344C

Como foi mencionado, o principal objeto de estudo deste trabalho é a bobina supercondutora confeccionada de acordo com os procedimentos descritos na seção 3.2.2 (Bobina 1). Posteriormente, foi construída uma bobina menor que pôde ser enrolada

manualmente (Bobina 2). Os motivos que levaram à construção desta nova bobina serão melhor compreendidos no Capítulo 4. As principais características da Bobina 1 e da Bobina 2 serão descritas a seguir.

Bobina 1

Esta bobina foi construída com 60 m de fita 2G e possui 126 espiras em uma camada e 111 na outra. O raio externo da camada de 126 espiras é de 53,5 mm, o que resulta em um fator de empilhamento de aproximadamente 95%, onde o fator de empilhamento é definido pela razão entre a área da seção transversal das fitas do enrolamento e a área total da seção transversal do enrolamento. O espaço entre as espiras calculado é de cerca de 0,0113 mm.

Bobina 2

Esta bobina possui uma arquitetura diferente da Bobina 1. Ela é inspirada no modelo da empresa neozelandesa HTS-110 [42], apresentado durante a “Applied Superconductivity Conference” (ASC) de 2010, que pode ser visto na Figura 3.16.



Figura 3.16: Bobina disponível no estande da empresa HTS-110 durante a ASC de 2010

A parede intermediária que separa as duas camadas da bobina deixa de ser necessária se a bobina for resinada. Além disso, a resina aumenta a rigidez mecânica do conjunto. Seguindo esta linha, a Bobina 2 foi enrolada manualmente com 3,3 m de fita 2G, raios interno e externo de 25 mm e 27,5 mm, respectivamente. Cada camada possui 10 espiras. Como o número de espiras é relativamente pequeno, a espessura da fita no cruzamento altera consideravelmente o fator de empilhamento, que varia de cerca de 86%, considerando o raio interno de 25 mm, para aproximadamente 93%, para um raio interno efetivo de 25,2 mm. O espaço entre as espiras calculado é de cerca de 0,0167 mm. É natural que a Bobina 1 possua um fator de empilhamento

maior que o da Bobina 2, pois a bobinadeira oferece suporte mecânico para que o enrolamento seja realizado com mais firmeza. A Figura 3.17 mostra uma foto da Bobina 2.

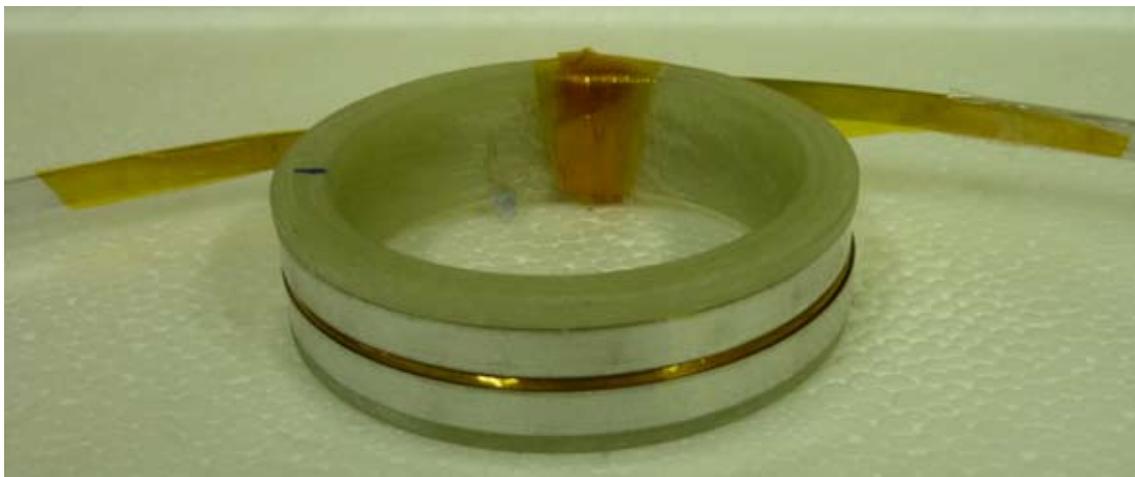


Figura 3.17: Bobina 2

Com o objetivo de aumentar a rigidez mecânica da Bobina 2, esta foi impregnada com resina epoxy. Comparando a impregnação com a amarração que foi feita com kapton na Bobina 1, pode-se dizer que o primeiro oferece melhor acabamento e robustez. Por outro lado, a amarração pode ser desfeita, permitindo que sejam realizadas investigações de possíveis defeitos na bobina. Esta possibilidade será melhor explorada no Capítulo 4.

3.3 Bancada para Medição de Tensão em função da Corrente

Com o objetivo de estimar a resistência das emendas, foi montada uma bancada para medir a curva de tensão (V) em função da corrente (I) das amostras estudadas. O método adotado foi a técnica de medida de quatro pontas, que não necessita de um bom contato ôhmico entre o eletrodo e a amostra. Estes ensaios foram realizados no CEPTEL. A Figura 3.18 mostra o diagrama do sistema para aquisição das curvas $V-I$, onde um computador controla a fonte de corrente contínua (modelo NLB 1400M-6,5 da FUG) e um pico-amperímetro (modelo 6487 da KEITHLEY) via interface GPIB.

A fonte de corrente é capaz de fornecer correntes na faixa ± 120 A com a tensão variando na faixa de $\pm 6,5$ V. O computador é responsável por informar à fonte qual o valor de corrente que deve ser imposta à amostra. De posse da informação, a fonte tenta aplicar a corrente de referência e retorna para o computador o valor real de corrente aplicado, sendo este medido internamente pela própria fonte. O computador

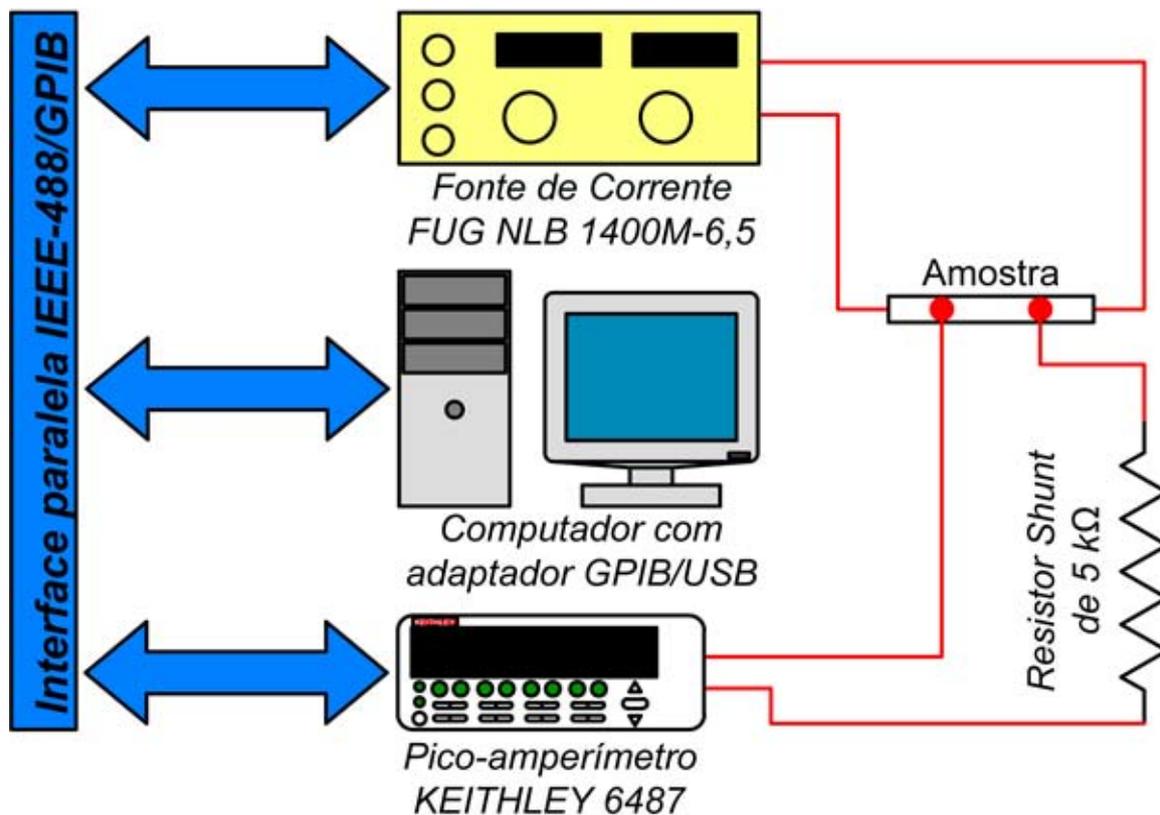


Figura 3.18: Diagrama do sistema para aquisição das curvas $V - I$.

compara o valor da corrente de referência com o valor medido, de modo que o resultado desta comparação deve atender a um critério de tolerância previamente estabelecido.

A tensão na amostra é obtida indiretamente a partir da corrente que passa pelo resistor shunt, medida com o pico-amperímetro de 5,5 dígitos. A menor escala deste equipamento é de 2 nA com resolução de 10 fA. Para esta escala e com um resistor shunt de 5 k Ω , o conjunto pico-amperímetro e resistor shunt se comporta com um voltímetro com fundo de escala de 10 μ V (2 nA \times 5 k Ω) e resolução de 50 pV (10 fA \times 5 k Ω). Este cálculo é feito pelo computador, que também se comunica com o pico-amperímetro.

Os terminais de tensão devem estar a uma distância definida (d). Neste trabalho, adotou-se o critério de 100 μ V/m para o campo elétrico crítico. Acima deste valor considera-se que o supercondutor está no estado dissipativo [43, 44]. Estas e outras informações fazem parte do arquivo de configurações do software de controle. O sistema foi implementado com Visual Basic usando a interface gráfica do Excel com base no fluxograma contido no Apêndice B [45]. A Figura 3.19 mostra a interface gráfica do software para levantamento da curva $V - I$.

A Figura 3.19 também mostra os resultados de um ensaio realizado com um padrão de resistência de 1 m Ω . A resistência medida é dada pela inclinação da curva

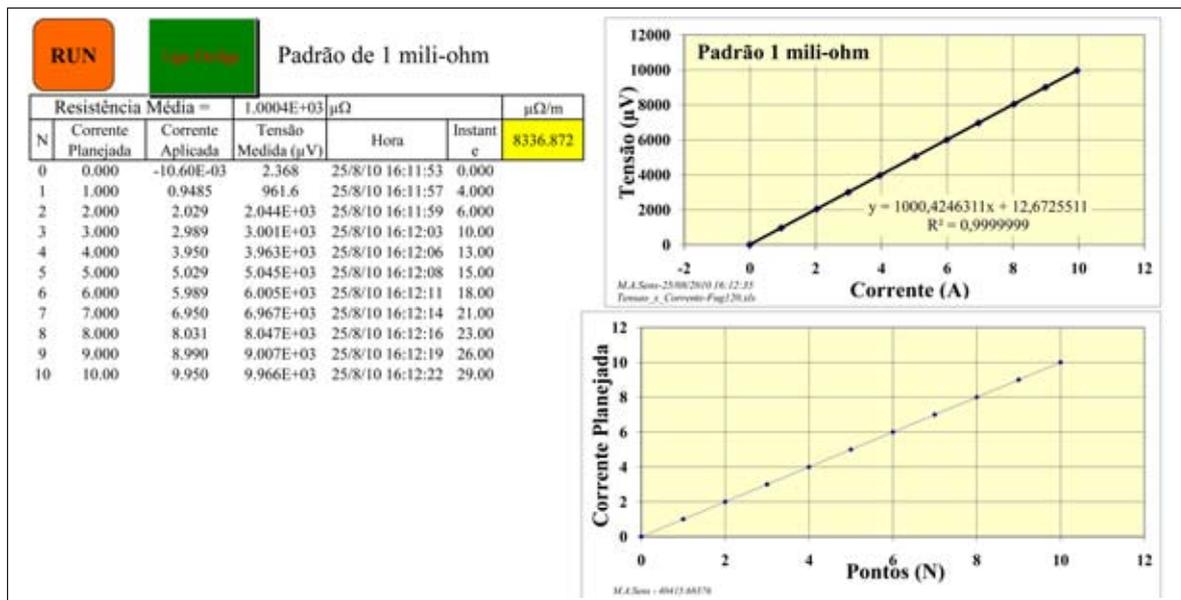


Figura 3.19: Interface gráfica do software para levantamento da curva $V - I$

$V - I$ e seu valor foi de 1,0004 mΩ, ou seja, bem próximo do valor esperado. O pico-amperímetro foi configurado pela interface GPIB para selecionar automaticamente a escala que melhor se adequa a cada medida.

Um fator importante que deve ser considerado durante as medições de tensão por corrente é o efeito termoelétrico, onde uma tensão surge em função de uma diferença de temperatura. O efeito termoelétrico acrescenta um termo DC às medições e deve ser descontado. No entanto, este termo DC não altera a inclinação da curva $V - I$ e logo não influencia o resultado das medidas de resistência. Outro fator muito mais crítico são as interferências eletromagnéticas, uma vez que as tensões que serão medidas são da ordem de nano-volts. Neste caso, devem ser empregadas técnicas usuais em instrumentação eletrônica para aumentar a confiabilidade dos resultados, como por exemplo, trançar os fios, utilizar filtros, realizar várias medições, aumentar o número de ciclos de integração (PLC), entre outras técnicas.

3.4 Bancada para Medição de Força

O sistema de medição de força utilizado pode ser visto na Figura 3.20. Este sistema foi utilizado em trabalhos anteriores para levantamento da força de levitação de mancais magnéticos construídos com blocos supercondutores maciços (bulks) de YBCO [9, 12]. Os ensaios foram automatizados com uma placa de aquisição de dados (modelo Advantech 1711) que se comunica com o computador através do programa Matlab/Simulink em tempo real. Dentro do ambiente gráfico do Simulink são produzidos os trens de pulso para controle em malha aberta do motor de passo, que movimenta verticalmente a guia linear, aproximando ou afastando o ímã de

Nd-Fe-B (neodímio-ferro-boro) da bobina supercondutora. A força de interação entre o ímã e a bobina é transduzida com a célula de carga (modelo SV50 da ALFA Instrumentos) em um sinal elétrico, que é amplificado por um circuito condicionador de sinal utilizando o amplificador operacional de instrumentação INA111. Este sinal é convertido pela placa de aquisição em um valor digital de 12 bits. Durante os ensaios, a bobina supercondutora foi fixada em um criostato construído em G10.

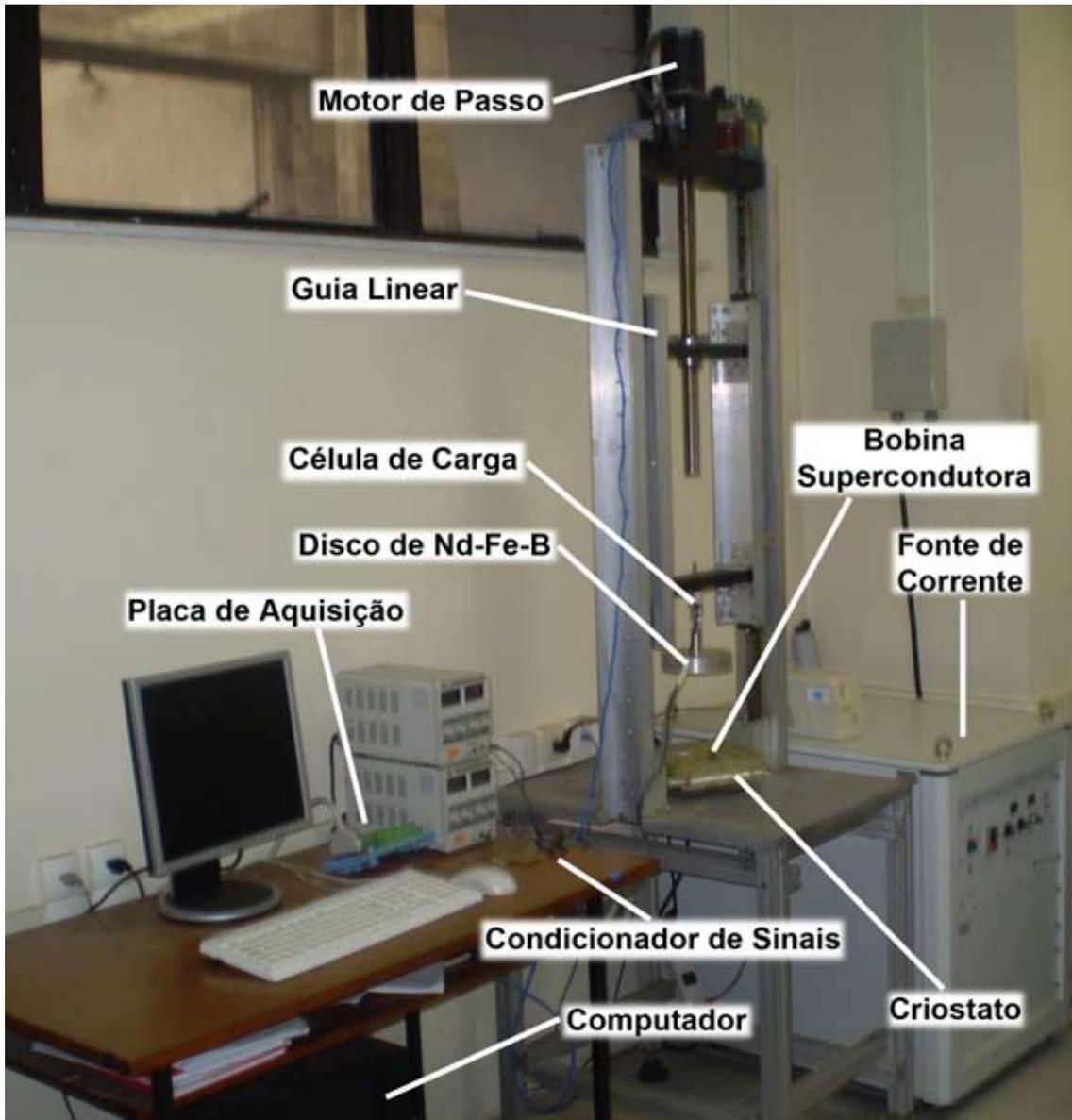


Figura 3.20: Sistema de medição de força.

Neste trabalho, acrescentou-se à bancada de medida de força uma fonte de corrente analógica, linear e bipolar (modelo 662 da Lakeshore) capaz de fornecer correntes elétricas na faixa de ± 70 A, regulando a tensão na faixa de ± 35 V. Esta fonte pode ser controlada por uma entrada analógica de ± 10 V, que foi implementada de 0 à 10 V utilizando o conversor digital/analógico (DAC) da placa de aquisição

em série com um circuito isolador de impedância óptico acoplado. A Figura 3.21 mostra o fluxograma do sistema de medição incluindo a fonte de corrente. Nota-se que o motor de passo não é acionado diretamente pela placa de aquisição, mas sim por um driver de potência que serve de interface entre os dois componentes. Posteriormente, acrescentar-se-á ainda um sensor de corrente criogênico, que será apresentado na seção 3.5.

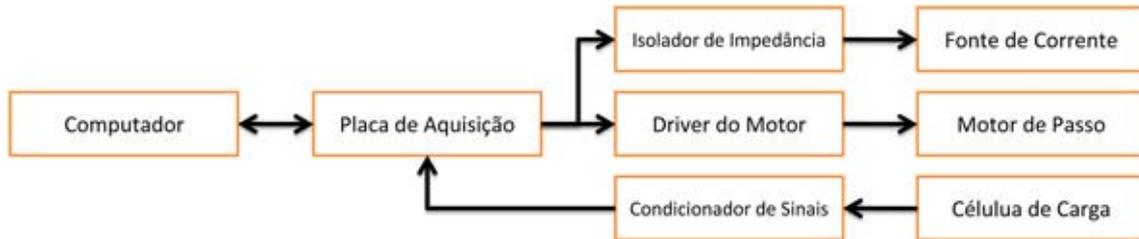


Figura 3.21: Fluxograma do sistema de medição de força.

O disco de Nd-Fe-B usado nos testes possui 75 mm de diâmetro, 20 mm de altura e está fixado em um invólucro de alumínio. A força coercitiva e o fluxo remanente deste ímã são de aproximadamente 998 kA/m e 1,198 T, respectivamente. Nestes ensaios, uma distância de 100 mm entre as faces do ímã e da bobina foi considerada suficiente para que a densidade de fluxo magnético originada pelo ímã fosse desprezível e para que se assumisse o resfriamento sem a presença de campo magnético (ZFC) sobre a bobina supercondutora.

3.5 Sensor de Corrente Criogênico

A corrente que circula na bobina pode ser medida utilizando um sensor de corrente de efeito hall. No entanto, a maioria dos sensores comerciais possuem uma eletrônica embutida para minimizar ruídos, e esta eletrônica costuma saturar em temperaturas acima da temperatura de ebulição do nitrogênio líquido (77 K). Desta forma, foi construído um sensor de corrente específico para as necessidades deste trabalho. O componente CYSJ1069 [46] é um sensor de campo de efeito hall que, de acordo com sua ficha técnica, não foi projetado para trabalhar em temperaturas inferiores à -40 °C. Apesar disso, uma vez que o CYSJ1069 é constituído de filmes finos depositados sobre um substrato mono-cristalino de Arseneto de Gálio (GaAs), sem nenhuma eletrônica interna, o LASUP realizou testes neste componente a 77 K [47, 48]. Como resultado, observou-se que o CYSJ1069 mantém sua linearidade na temperatura do nitrogênio líquido, porém apresenta sensibilidade diferente da que consta no manual, precisando ser recalibrado para esta nova temperatura.

Para enlaçar o fluxo da fita 2G, utilizou-se um núcleo ferromagnético com um pequeno gap onde deve ser encaixado o sensor de campo (CYSJ1069). Este núcleo

foi retirado de um sensor de corrente de efeito hall comercial danificado e pode ser visto na Figura 3.22. Para facilitar o manuseio, o sensor de campo foi soldado em uma placa de circuito impresso, uma vez que suas dimensões são $3,5 \text{ mm} \times 1,5 \text{ mm} \times 0,6 \text{ mm}$.

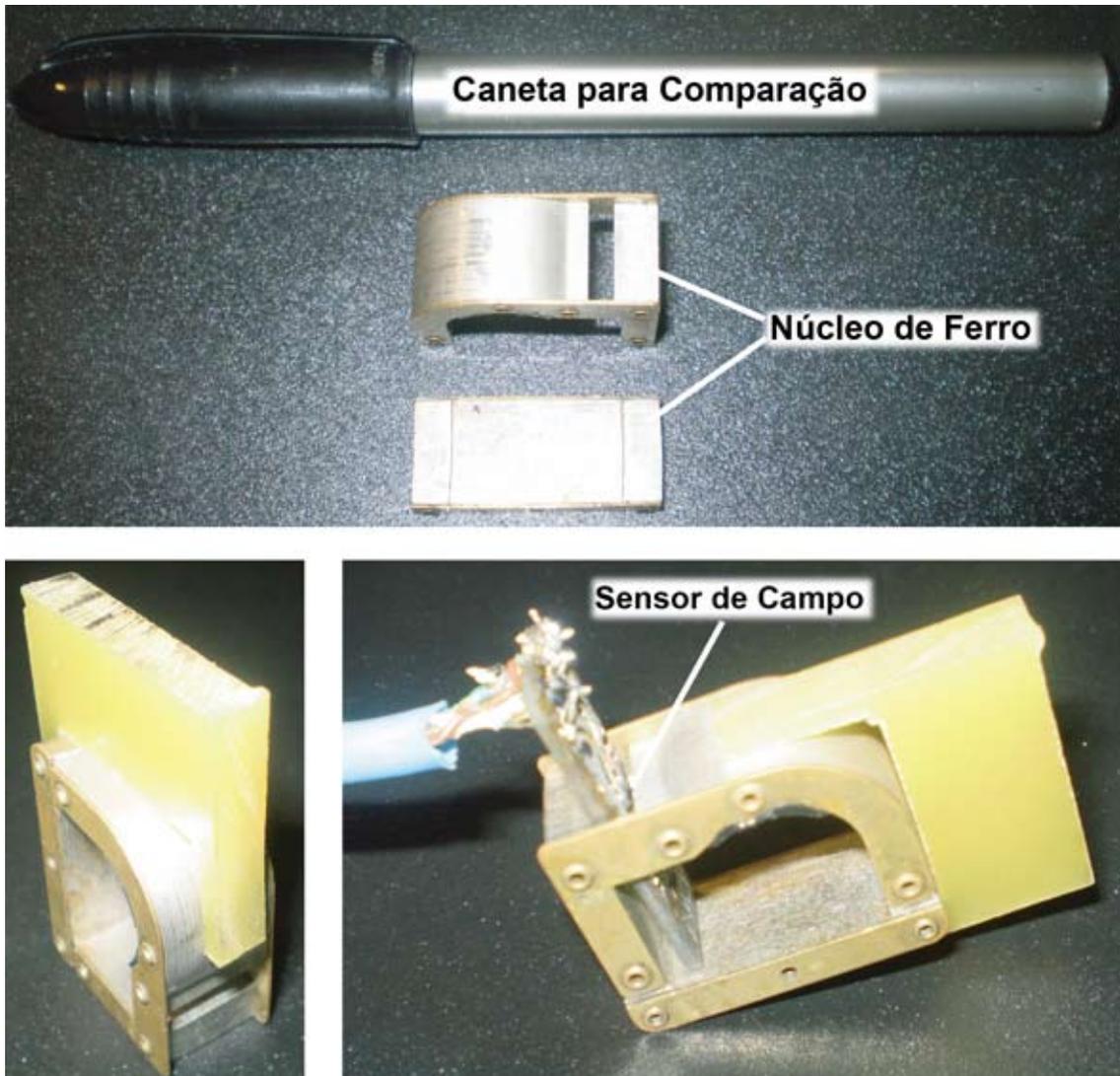


Figura 3.22: Sensor de corrente.

O fluxo magnético produzido pela fita supercondutora encontra no núcleo ferromagnético um caminho de menor relutância magnética. Desta forma, considerando a permeabilidade magnética do núcleo muito maior que a do ar, haverá uma concentração de linhas de fluxo no gap, que será basicamente a única relutância do circuito magnético. O sensor de corrente foi posicionado neste ponto de maior densidade de campo magnético, gerando um sinal de tensão proporcional ao campo a que está submetido, que é também proporcional à corrente que passa na fita supercondutora. Este sinal de tensão é amplificado com o amplificador operacional de instrumentação INA111 e convertido para um valor digital pela placa de aquisição. O INA111

é adequado para este tipo de aplicação por eliminar ruídos de modos diferenciais devido a um arranjo que utiliza 3 amplificadores operacionais integrados com outros componentes, melhorando significativamente a qualidade do sinal que chega à placa de aquisição.

A alimentação do sensor de corrente construído é a mesma que seria necessária para alimentar o sensor de campo utilizado. Para desempenhar esta função, montou-se uma fonte de corrente de 5 mA, cujo circuito pode ser visto na Figura 3.23. O funcionamento deste circuito pode ser entendido da seguinte maneira: a tensão na entrada inversora de um amplificador operacional é igual a tensão na entrada não inversora, de modo que a tensão no ponto B é igual a tensão no ponto A, ou seja, 5 V. Desta forma, a tensão sobre R1 é de 5 V, fazendo com que a corrente neste componente seja de 5 mA. O único caminho para esta corrente de 5 mA chegar até o resistor R1 é passando pelo transistor TIP122 e pelo resistor R2. Assim, a queda de tensão em R2 é também de 5 V (valor aproximado ao desconsiderar a corrente de base do transistor), o que implica que o ponto D esteja num potencial elétrico de 7 V em relação à terra. Seguindo o mesmo raciocínio, a tensão no ponto E deve ser a mesma que a no ponto D (7 V), resultando em uma tensão de 5 V sobre o resistor R3, por onde passará uma corrente de 5 mA, que retornará à terra passando pelo transistor TIP126 e pelo sensor de campo CYSJ1069. A impedância deste sensor está dentro das limitações do circuito de alimentação projetado.

O sensor de corrente foi calibrado no Simulink a partir das seguintes etapas:

1. Ligar a fonte e aplicar corrente nula;
2. Somar ao valor convertido um termo DC que torne o resultado da medição igual a zero;
3. Aplicar corrente de 70 A;
4. Ajustar o bloco de ganho linear de modo que o valor indicado seja igual a 70 A.

O sensor de corrente foi testado para diversos valores de corrente na faixa de 0 a 70 A, apresentado erro médio menor do que 200 mA e flutuações senoidais de até 300 mA de amplitude.

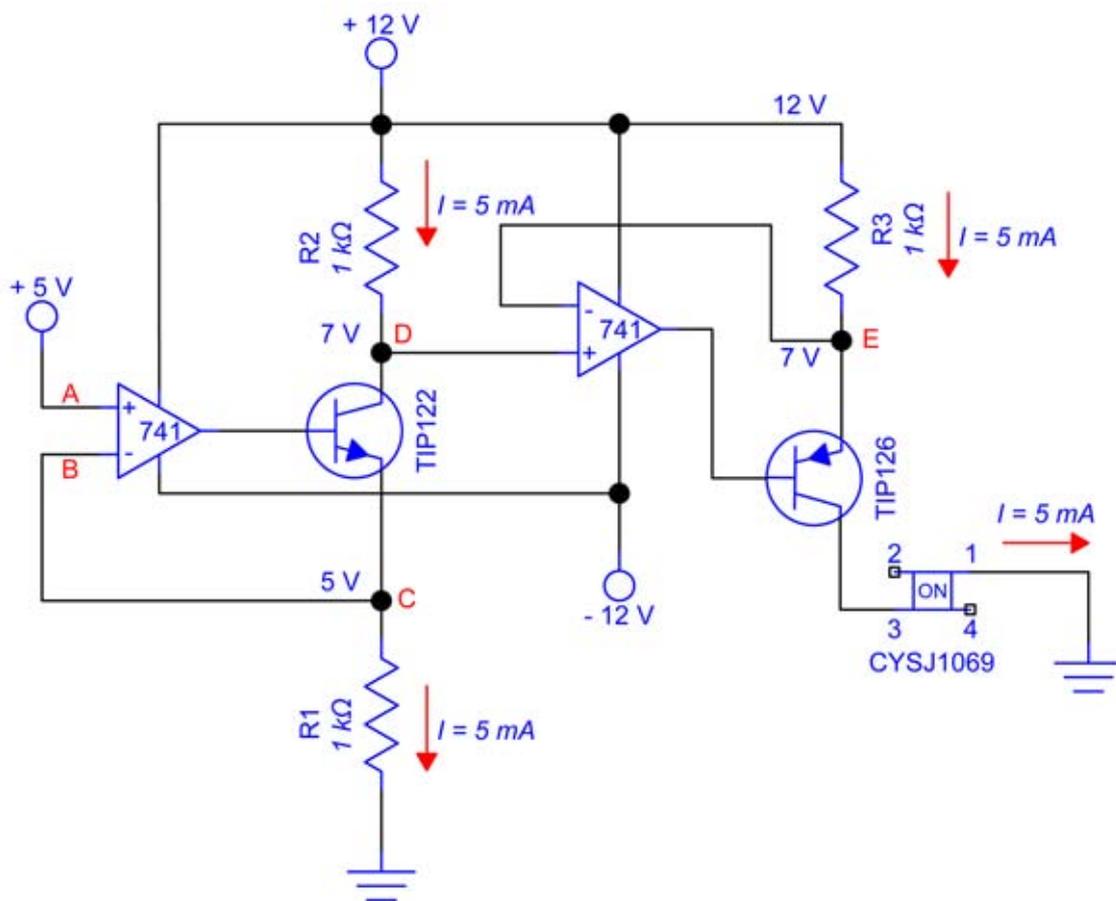


Figura 3.23: Circuito de alimentação do sensor de corrente.

Capítulo 4

Resultados e Discussões

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos por meio de simulações e experimentos. Observações, justificativas e hipóteses serão discutidas ao longo do texto, servindo de base para o desenvolvimento do pensamento crítico científico em relação aos resultados favoráveis e aos não favoráveis. Vale ressaltar que a maior parte dos resultados que serão apresentados neste capítulo encontram-se em [49] e foram apresentados na ASC de 2010.

4.1 Simulações

Neste capítulo serão feitas comparações entre os resultados de simulações e os experimentais. As simulações utilizaram o método dos elementos finitos (MEF), onde foi representada da seguinte forma a fita 2G (modelo 344C):

- Camadas de cobre com $68,5 \mu\text{m}$ de espessura;
- Camada de prata com $2 \mu\text{m}$ de espessura;
- Camada de YBCO com $1 \mu\text{m}$ de espessura;
- Substrato com $50 \mu\text{m}$ de espessura. Esta camada é composta por uma liga de níquel e tungstênio, porém foi representada como uma camada de níquel. Vale ressaltar que algumas das camadas apresentadas na Figura 2.12 (“buffer layers”) não foram incluídas no modelo.

O programa utilizado para realizar as simulações foi o Ansoft Maxwell SV (versão de estudante). A escolha deste programa foi devido ao seu método iterativo de refinamento de malha, como pode ser visto no fluxograma da Figura 4.1. Basicamente, a cada solução gerada, os resultados de nós adjacentes são comparados. Desta forma, o refinamento ocorre mais intensamente nas regiões que não atingiram

o erro percentual pré-determinado pelo usuário. Uma vez que, por exemplo, os resultados de campo convergem mais rápido que os resultados de força [50], é possível escolher o parâmetro que será analisado pelo critério de parada do programa.

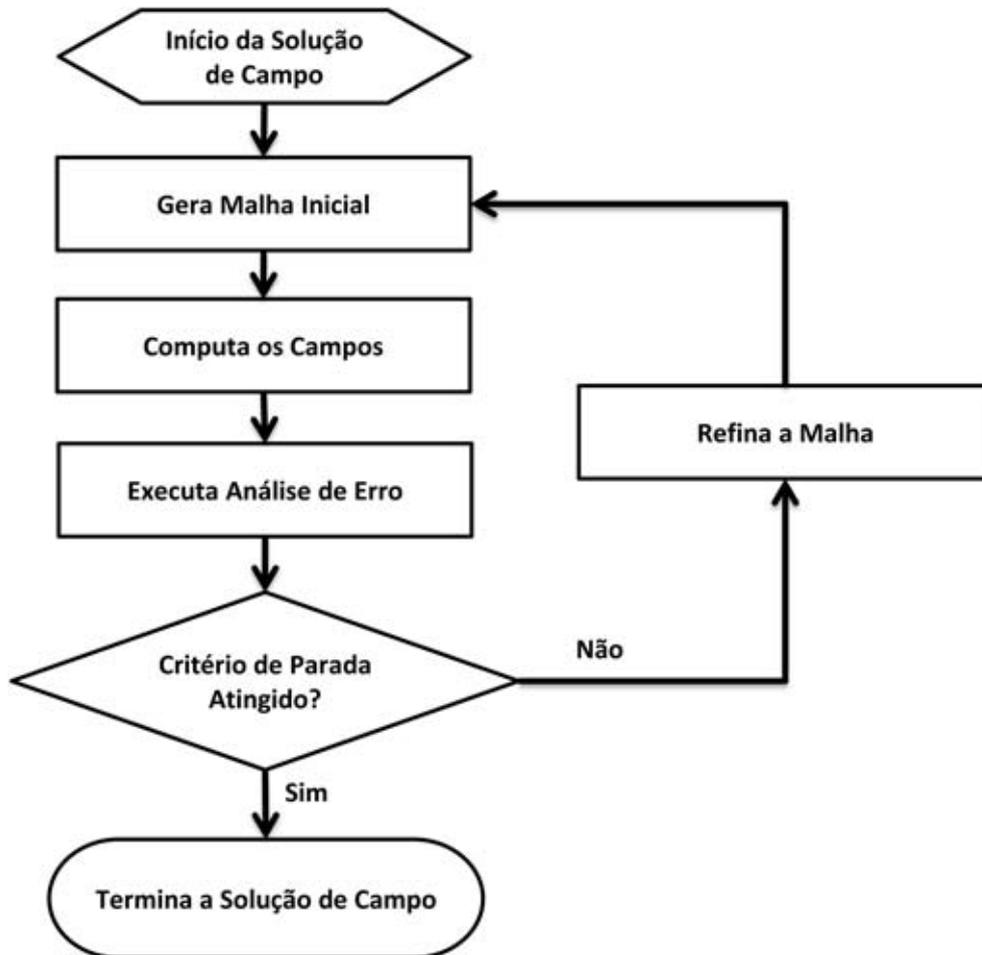


Figura 4.1: Fluxograma do método iterativo de refinamento de malha do programa Ansoft Maxwell SV.

Como a camada de YBCO possui apenas $1 \mu\text{m}$ de espessura e outras camadas possuem espessuras de mesma ordem de grandeza, a densidade de elementos nestes objetos deve ser muito maior que em outros objetos do modelo que não possuam dimensões tão reduzidas. Assim, o processo de refinamento de malha iterativo do Maxwell não apenas garante um bom resultado, dentro dos critérios escolhidos, como também reduz o tempo computacional, se comparado com uma malha criada manualmente que esteja excessivamente refinada. A Figura 4.2 mostra a malha gerada durante uma das simulações pelo MEF, onde se pode notar que a região perto da bobina está muito mais refinada que as demais regiões.

Neste trabalho, foi utilizado primeiramente o modelo de permeabilidade nula para os supercondutores, mas na prática esta consideração não afetou significativamente a distribuição das linhas de fluxo, devido à espessura de apenas $1 \mu\text{m}$ da camada supercondutora. Desta forma, com o objetivo de reduzir o tempo computa-

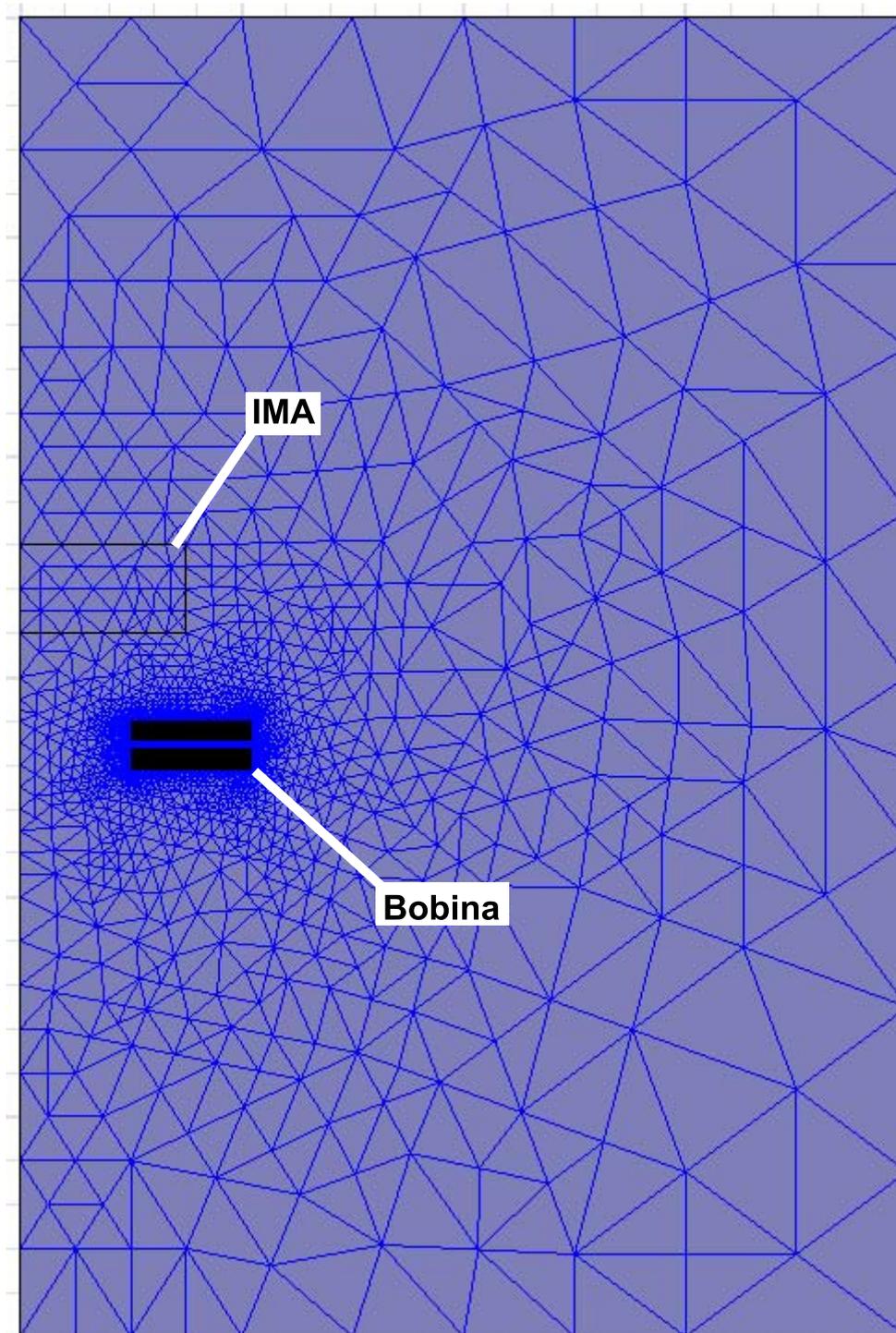


Figura 4.2: Malha com 181.512 elementos gerada pelo programa Ansoft Maxwell SV durante uma das simulações pelo MEF.

cional, o modelo de permeabilidade nula não foi adotado. As simulações foram úteis para estimar a indutância e a força de interação da bobina com o ímã para diferentes distâncias entre estes elementos (“gaps”) e diferentes correntes aplicadas. Todas as simulações foram magnetoestáticas com simetria em torno de um eixo de rotação (axissimétrico). A Figura 4.3 mostra como foi feita a representação da bobina em

coordenadas cilíndricas (z, ρ, θ) no simulador.

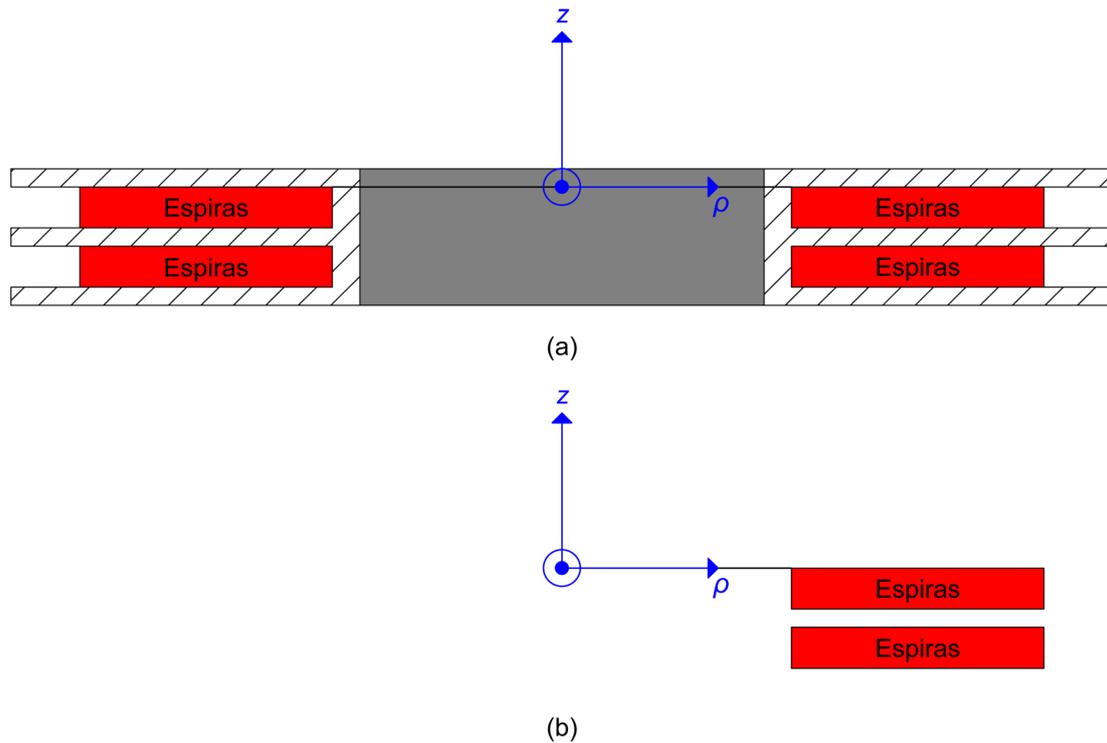


Figura 4.3: Ilustração da Bobina: (a) seção transversal, (b) representação com simetria em torno do eixo de rotação z e (c) camadas que foram representadas no modelo utilizado.

Um modelo mais simples, considerando a fita 2G como uma camada de níquel de 0,19 mm de espessura foi testado e obteve bons resultados de força de interação entre o ímã e a bobina, porém, a permeabilidade magnética do níquel alterou significativamente o valor de energia magnética armazenada, alterando também o valor da indutância simulada. Desta forma, este modelo não foi mais utilizado. Existem ainda modelos mais simples, como o modelo unidimensional que considera a fita 2G como uma linha [51], mas este modelo não apresenta aplicação neste trabalho.

4.2 Resultados para Imposição de Corrente

Este primeiro experimento foi realizado com a Bobina 1 (ver Figura 3.15) inserida no criostato do sistema de medida de força, que foi apresentado na Figura 3.20. Às extremidades desta bobina supercondutora foram soldados terminais de cobre, como mostrado na Figura 4.4. Estes terminais foram fixados ao criostato utilizando parafusos de aço inoxidável, dando maior rigidez mecânica ao conjunto e tornando possível conectar a fonte de corrente à bobina sem danificar a fita 2G. Além disso, os terminais de cobre garantem um bom contato elétrico com a fita.



Figura 4.4: Terminais de cobre soldados na Bobina 1.

Primeiramente, configurou-se o computador para controlar o sistema da seguinte maneira: com o ímã situado a uma distância fixa da bobina (z) foram adquiridas as medidas de força, transduzidas pela célula de carga, com a corrente fornecida pela fonte de corrente variando de 0 a 50 A numa taxa de 1 A/s. A fita 2G utilizada possui I_c nominal de 70 A, mas, devido ao campo magnético próprio da bobina e ao campo magnético do ímã, o YBCO encontra-se em um ponto de operação diferente do qual foi especificado, de modo que o I_c da fita nas condições do ensaio com imposição de corrente pôde ser menor que o nominal de 70 A. Na prática, mesmo operando com corrente máxima de 50 A, em alguns ensaios a bobina transitou para o estado normal (“quench”), o que tornou impossível a realização de ensaios com imposição de corrente para valores de z menores do que 20 mm. A Figura 4.5 mostra uma comparação dos resultados experimentais e simulados para a componente z da força entre o ímã e a bobina. A dependência linear da força com a corrente está de acordo com a expressão da força de Lorentz ($\vec{F}_L = \vec{J} \times \vec{B}$).

A força de repulsão entre o ímã e a bobina poderia aumentar consideravelmente aplicando-se correntes mais elevadas, diminuindo o valor de z ou utilizando uma configuração diferente de ímãs. Desta forma, a concordância dos resultados experimentais com os simulados mostra que o MEF é uma ferramenta poderosa que pode ser utilizada no projeto e otimização de mancais magnéticos. A Figura 4.6 mostra

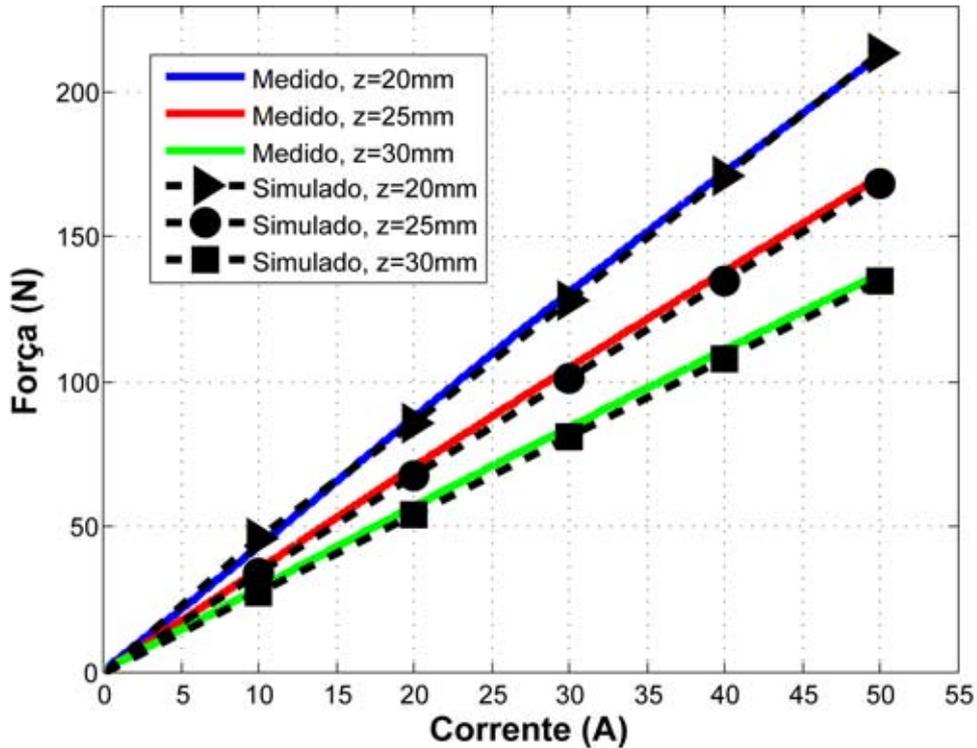


Figura 4.5: Comparação dos resultados experimentais e simulados de força na direção z sobre o ímã para imposição de corrente na bobina supercondutora.

como as linhas de fluxo da bobina cortam as espiras em diferentes direções. Como foi discutido no Capítulo 2, a alta anisotropia do YBCO faz com que o valor de J_c da bobina seja diferente nos diversos pontos ao longo da fita 2G, dependendo da intensidade e do ângulo em que o campo magnético atravessa cada região do enrolamento. A corrente crítica da bobina será determinada pelo ponto que possuir menor J_c , que se comportará como um elo fraco.

Outra informação que pode ser obtida por meio da simulação pelo MEF é a densidade de fluxo magnético produzida pela bobina. A Figura 4.7 apresenta os resultados do módulo da densidade de fluxo magnético em função da posição radial, para diferentes alturas (z), quando uma corrente de 50 A é imposta à bobina.

O segundo experimento com imposição de corrente consistiu em aplicar corrente constante na bobina enquanto o ímã é movido da posição inicial ($z=100$ mm) até a posição final ($z=20$ mm). Este movimento foi programado para ocorrer em passos de 1 mm, com intervalos de 1 s entre cada movimento, para que seja feita a aquisição de dados. A Figura 4.8 mostra a relação do tipo exponencial da força com a distância entre o ímã e a bobina (z).

Admitindo que a força de repulsão entre o ímã e a bobina se distribua de maneira uniforme no carretel, a bobina supercondutora esteve sujeita a uma pressão de até 36 kPa nos ensaios com imposição de corrente, ou seja, esforços eletromecânicos que poderiam danificar a fita 2G. Este é um dos motivos que faz com que seja comum

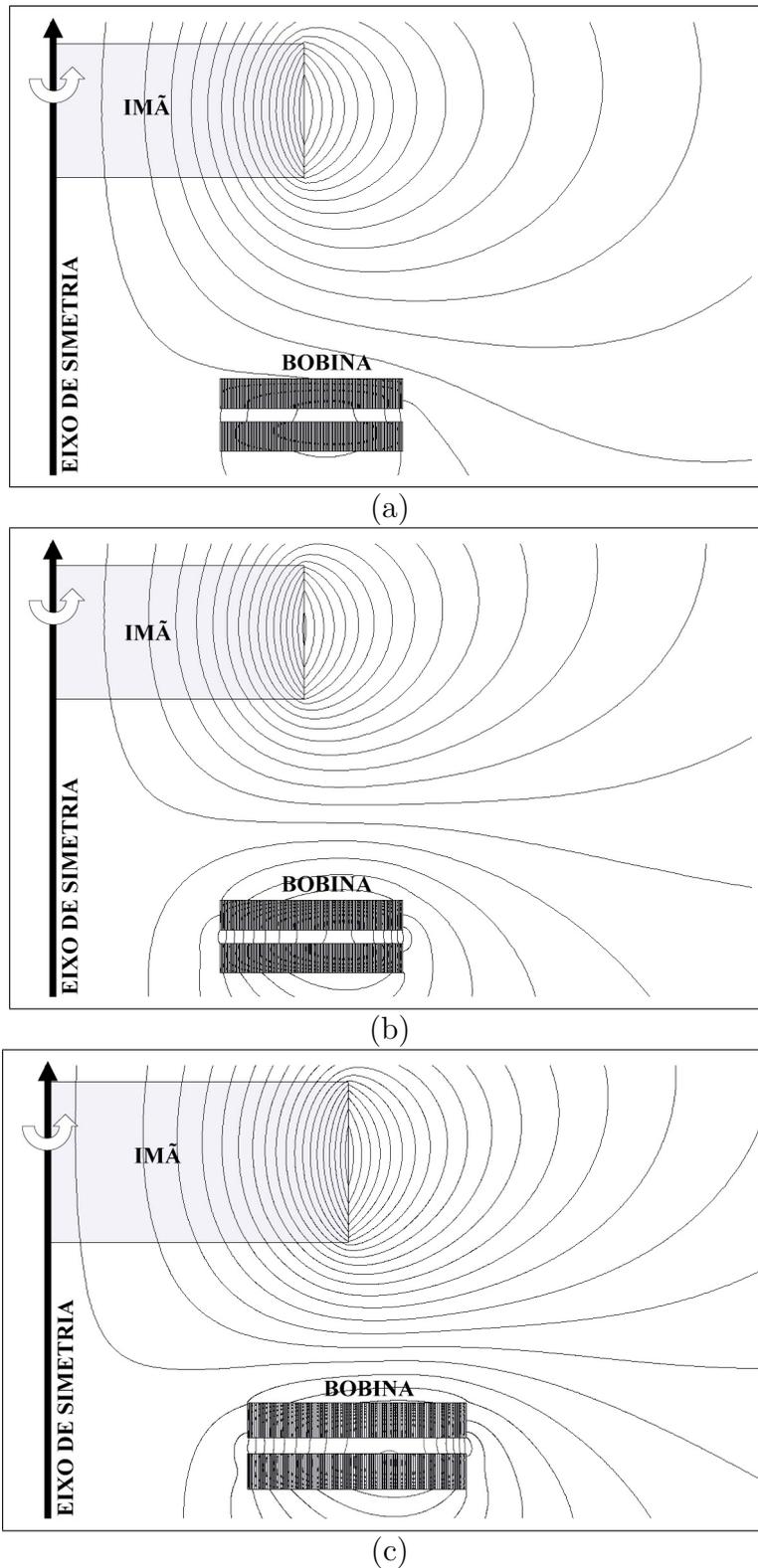


Figura 4.6: Linhas de fluxo magnético da bobina para diferentes situações: (a) $z=30$ mm e corrente de 20 A; (b) $z=30$ mm e corrente de 50 A ; (c) $z=20$ mm e corrente de 50 A .

impregnar este tipo de dispositivo com resina epóxi, como será melhor discutido ao longo deste capítulo.

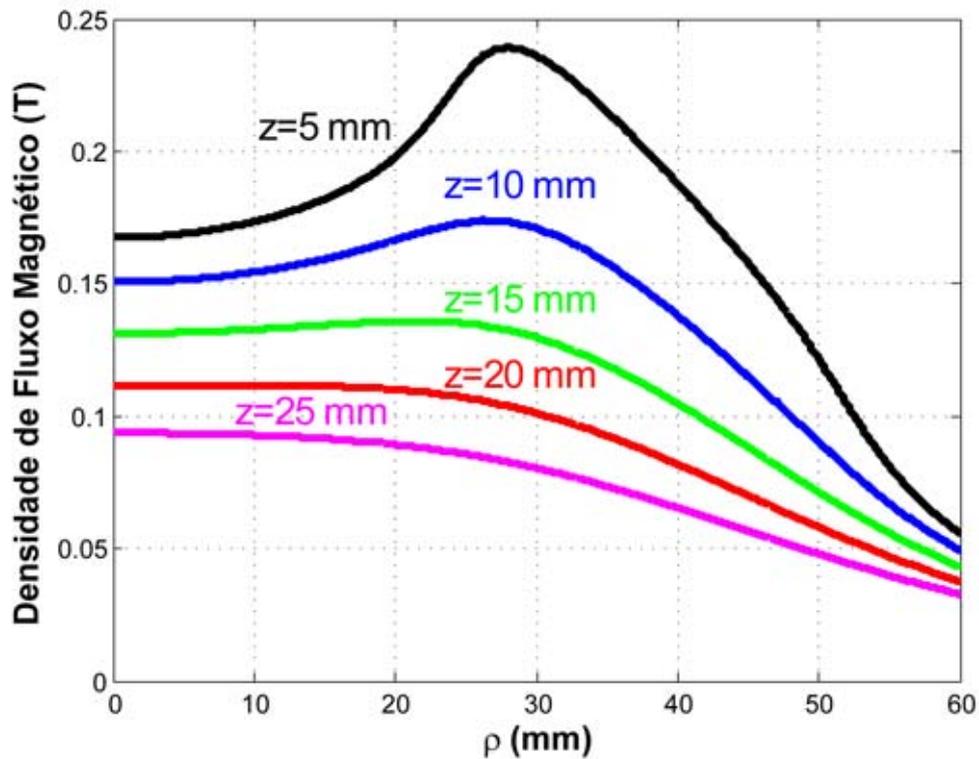


Figura 4.7: Resultados de uma simulação mostrando o módulo da densidade de fluxo magnético sobre a bobina supercondutora em função da posição radial para uma corrente imposta de 50 A.

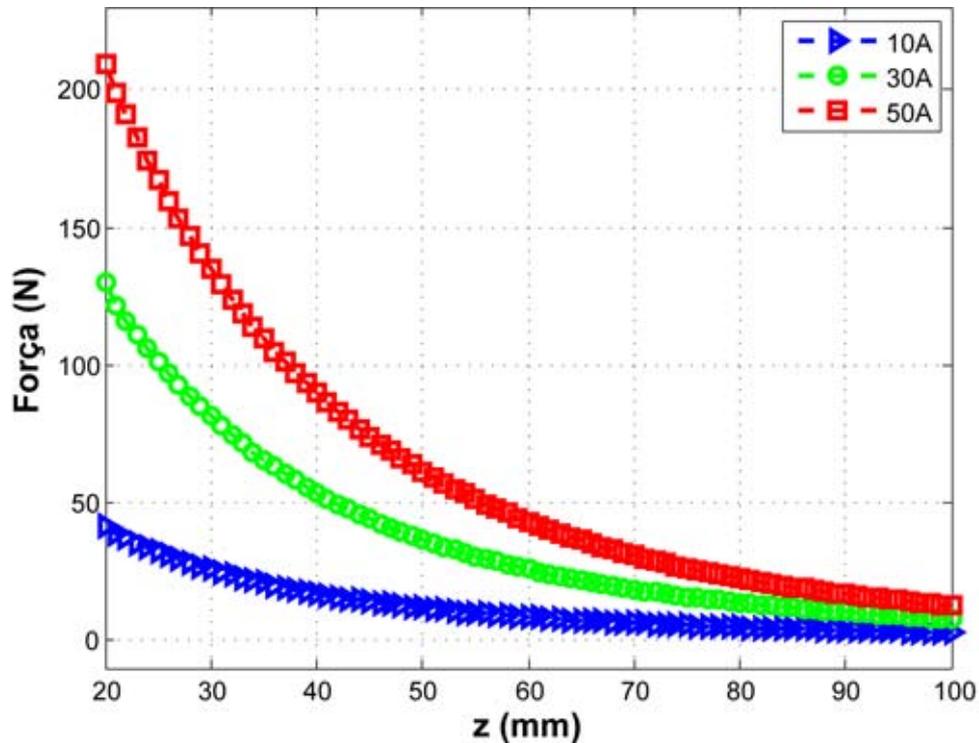


Figura 4.8: Força medida ao mover o ímã permanente da posição inicial ($z=100$ mm) até a posição final ($z=20$ mm) com corrente constante aplicada na bobina.

4.3 Resultados para a Bobina Supercondutora Conectada em um Laço Fechado

Os resultados apresentados nesta seção foram realizados com os terminais da bobina curto-circuitados, de modo que não foi necessário utilizar a fonte de corrente. A emenda realizada nos terminais da bobina foi feita com base nos procedimentos descritos no Capítulo 3. Para garantir a qualidade da emenda, foram realizadas medidas de V em função de I com o objetivo de verificar se sua resistência elétrica está de acordo com o valor esperado. A Figura 4.9 mostra uma curva de V vs I para uma emenda com 35 mm de fitas 2G sobrepostas, onde a inclinação da linha de tendência indica uma resistência de aproximadamente $63 \text{ n}\Omega$. Com base na Tabela 3.2, fazendo uma interpolação linear, a resistência esperada seria de aproximadamente $64 \text{ n}\Omega$.

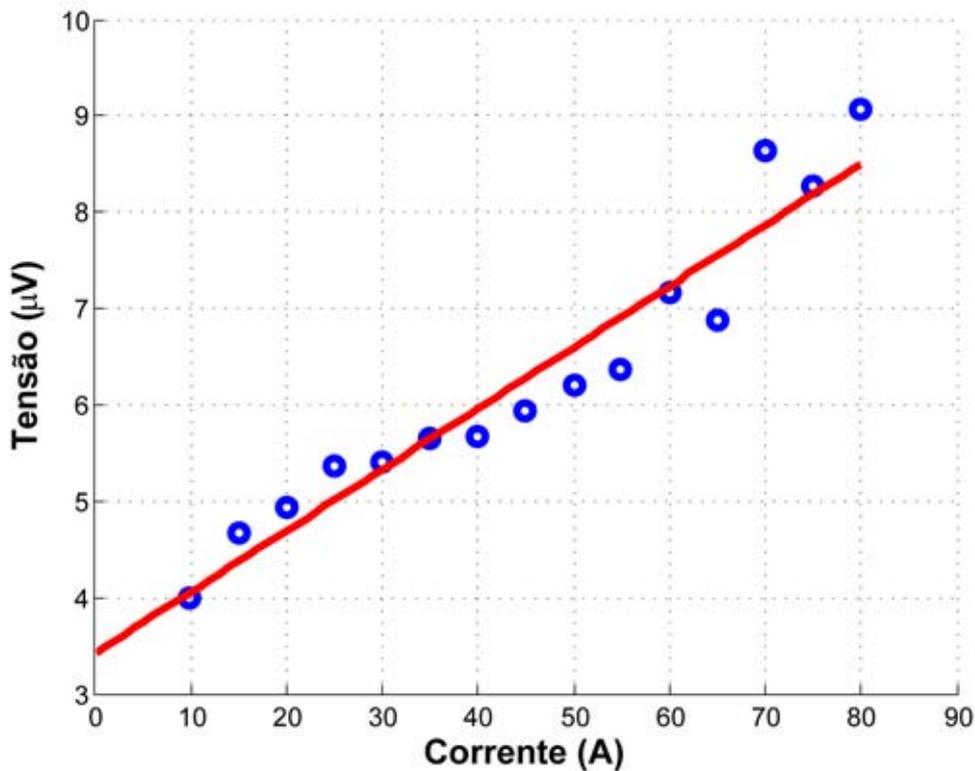


Figura 4.9: Curva $V \times I$ medida em uma emenda com 35 mm de fitas 2G sobrepostas. A resistência da emenda é de aproximadamente $63 \text{ n}\Omega$.

Os resultados obtidos com a emenda de teste serviram para validar o procedimento de confecção das emendas. No caso dos terminais da bobina, foi realizada uma emenda com tira auxiliar, ou seja, os terminais foram soldados à um pedaço adicional de fita 2G, sendo que a emenda em cada terminal foi feita com sobreposição de 70 mm de fita. Desta forma, a resistência esperada para esta emenda é de aproximadamente $64 \text{ n}\Omega$.

Uma vez realizada a emenda, foram realizados ensaios de força de repulsão entre o ímã e a bobina de acordo com o seguinte procedimento: inicialmente o ímã encontrava-se a uma distância de 100 mm da bobina, considerada suficiente para o ZFC. Em seguida o ímã foi movido até a posição onde $z=20$ mm e depois movido novamente até a posição inicial ($z=100$ mm). A movimentação do ímã foi realizada em passos de 1 mm, com 1 s de intervalo para a aquisição de dados entre cada passo. A Figura 4.10 mostra o valor da força vertical medida durante este ensaio. Este resultado se assemelha a outros obtidos com blocos supercondutores [52], ou seja, apresenta histerese na e valores negativos na força medida devido ao aprisionamento de fluxo.

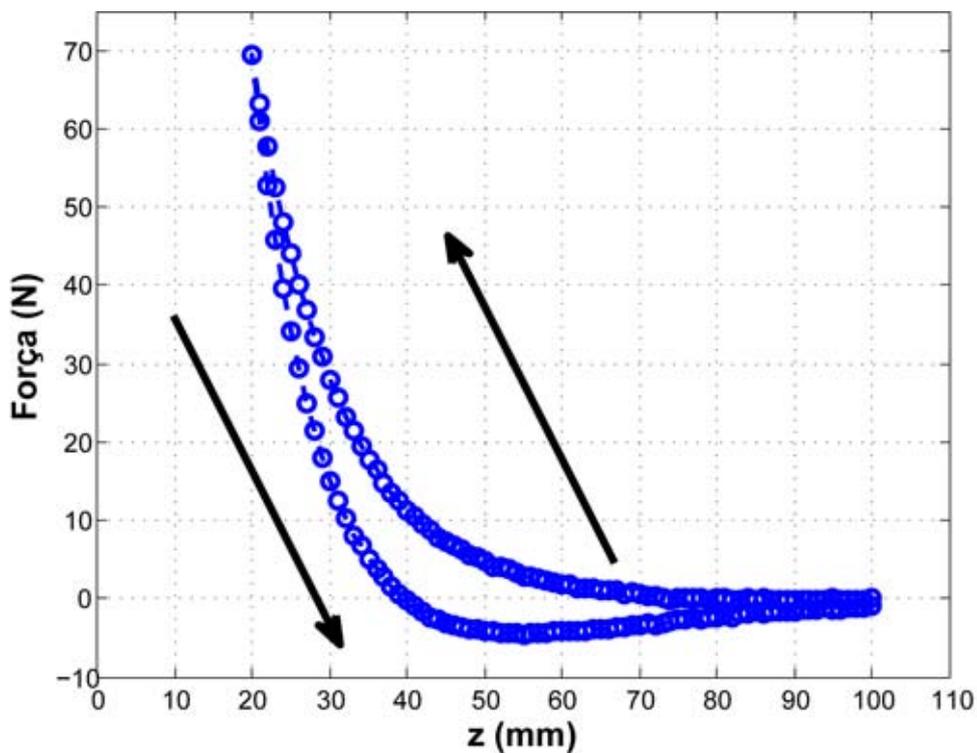


Figura 4.10: Ensaio de ZFC: o ímã foi deslocado de $z=100$ mm até $z=20$ mm, de onde retornou para a posição inicial.

Nos ensaios de ZFC, a pressão média sobre a bobina foi de 11,7 kPa. A força medida é devida as correntes induzidas na bobina. Além disso, a Figura 4.10 mostra o efeito da histerese, uma vez que a força seguiu um caminho diferente quando o ímã foi movido até a sua posição inicial. Este fenômeno é devido ao fluxo magnético aprisionado na bobina.

Como as fitas 2G são capazes de aprisionar fluxo magnético, seria esperado que a bobina apresentasse alguma estabilidade lateral, como ocorre com os supercondutores maciços (“bulks”). No entanto, no caso das fitas 344C, o substrato ferromagnético é atraído pelo ímã, sobrepondo o efeito do aprisionamento de fluxo. Outros fabricantes, como a SP [35], possuem fitas onde o substrato não é ferromagnético,

sendo mais indicadas para aplicações de mancais magnéticos.

A força de repulsão produzida pela corrente induzida diminui de acordo com a constante de tempo da bobina (τ), que depende da indutância da bobina (L) e da resistência da emenda (R):

$$\tau = \frac{L}{R}. \quad (4.1)$$

A indutância da bobina supercondutora foi, inicialmente, medida com um medidor de impedância complexa da MIDSUN e os resultados estão apresentados na Tabela 4.1. Cada método de medição de indutância é apropriado para uma determinada faixa do fator de qualidade (Q), definido por:

$$Q = \frac{X_L}{R}, \quad (4.2)$$

onde X_L é a reatância indutiva da bobina.

A dependência da indutância medida com a frequência de medição pode estar associada não apenas com o fator de qualidade, mas também com o fato de a bobina possuir várias camadas. No entanto, não seria correto considerar que a indutância da bobina é composta por uma série de indutores em paralelo, visto que estes indutores estão acoplados eletricamente ao longo de todo o enrolamento da bobina. Além disso, na temperatura do nitrogênio líquido (77 K), a camada de YBCO se encontra no estado supercondutor e, em corrente alternada, os supercondutores possuem uma resistência que varia com a frequência devido ao movimento de vórtices (“flux flow”). Estes fatores fizeram que com que os resultados da Tabela 4.1 ficassem inconsistentes e, por isso, não foram utilizados.

Tabela 4.1: Indutância medida com medidor de impedância complexa da MIDSUN.

Temperatura (K)	Frequência (kHz)	Indutância (mH)	Fator de Qualidade
296,75	1	2,610	2,781
	10	2,138	7,032
	100	1,892	6,155
77	1	2,068	29,31
	10	1,897	7,38
	100	1,348	4,192

O decaimento da corrente que circula na bobina quando os terminais da mesma estão curto-circuitados pode ser considerado um processo quasi-estático. Assim, a indutância em corrente contínua da bobina foi estimada por meio de simulações com o MEF. Esta simulação consiste em aplicar determinada corrente (i) na bobina e

calcular o total da energia armazenada no campo magnético do indutor (W). A indutância é obtida indiretamente pela expressão:

$$W = \frac{L \cdot i^2}{2}. \quad (4.3)$$

Outra vantagem em estimar a indutância por MEF é a possibilidade de trabalhar no ponto de operação desejado da curva de magnetização da bobina, enquanto a maioria dos medidores de impedância complexa realizam as medidas aplicando valores baixos de corrente (menores que 2 A).

Os resultados das simulações por MEF indicam que a bobina supercondutora possui indutância de aproximadamente 5,2 mH, resultando em uma constante de tempo (τ) de aproximadamente $8,125 \cdot 10^4$ s para um R de 64 n Ω . Com o objetivo de verificar o valor de τ , foi feita uma nova medição onde o ímã, inicialmente na posição $z=100$ mm, foi aproximado da bobina até que a força de repulsão atingisse o patamar de 60 N em $z = 22$ mm. Observou-se então o decaimento da força causado pelo R da bobina, conforme mostra a Figura 4.11.

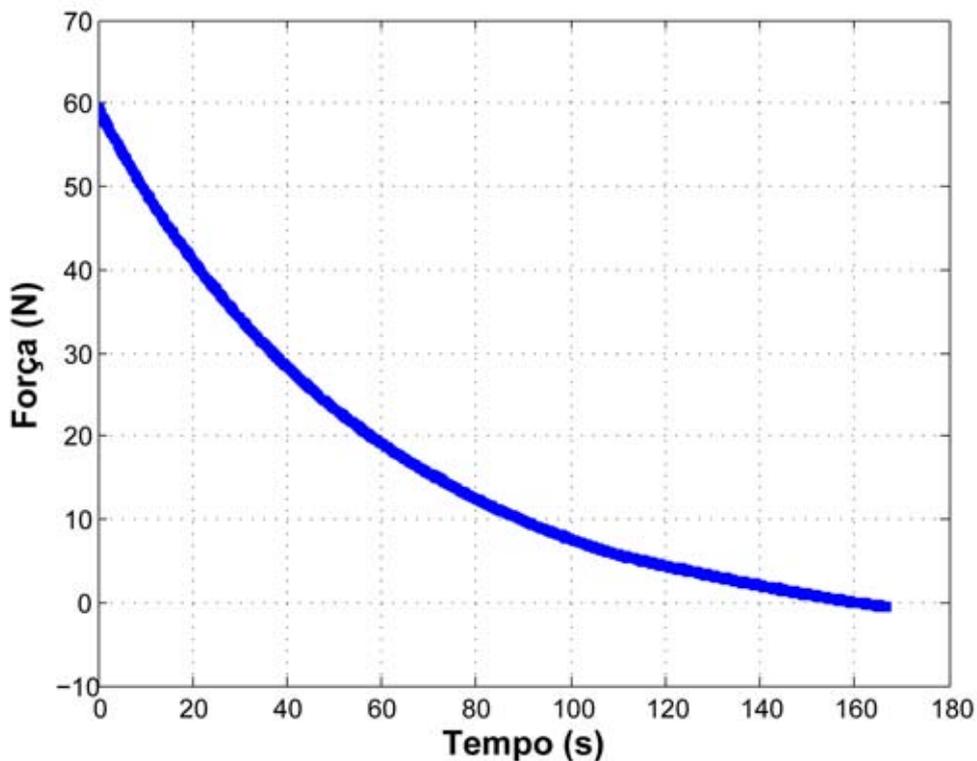


Figura 4.11: Decaimento da força de repulsão entre o ímã e a bobina.

Analisando a Figura 4.11, nota-se que τ ficou muito abaixo do esperado. Mais precisamente, a constante de tempo obtida por esta figura é de aproximadamente 50 s. Esta incoerência de resultados deu margem para a investigação de defeitos na bobina. Abrindo os terminais do enrolamento (cortando) foi possível verificar, a partir do levantamento de V em função de I , uma resistência de 100 $\mu\Omega$ com a fita 2G

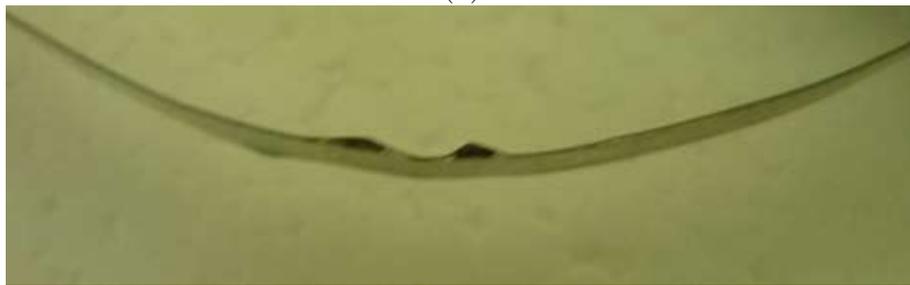
imersa em nitrogênio líquido, um valor elevado para uma bobina supercondutora. No entanto, é interessante notar que considerando esta resistência de defeito, a constante de tempo estimada fica bem próxima do valor medido, como mostra a equação abaixo:

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{5,2mH}{100\mu\Omega} = 52s. \quad (4.4)$$

Com o objetivo de localizar possíveis defeitos, o dispositivo que foi construído para enrolar a bobina foi desta vez utilizado para desenrolá-la. Curiosamente, a medida que as espiras foram sendo retiradas começaram a aparecer pontos de solda derretida (solda que une as camadas de cobre às camadas intermediárias, ver Figura 2.13), até que, bem perto do cruzamento central, encontrou-se um pedaço de fita 2G delaminada, como pode ser vistos na Figura 4.12.



(a)



(b)

Figura 4.12: Bobina sendo desenrolada: (a) ponto onde a solda que une as camadas da fita derreteu e (b) ponto onde a fita delaminou.

As principais possíveis causas do defeito são:

- Os esforços mecânicos durante o processo de bobinagem;
- Os esforços eletro-mecânicos durante os ensaios, uma vez que esta bobina não foi impregnada com resina epóxi;

- O “quench” que ocorreu durante os ensaios de imposição de corrente e sobreaqueceu pontualmente a bobina (“hot spot”);
- O processo de confecção da emenda no momento em que todo o conjunto foi colocado no forno (tempo de aquecimento).

Bobinas supercondutoras são dispositivos bastante delicados que são danificados com facilidade. Existem uma série de fatores que podem danificar a bobina e alguns deles são discutidos em [53]. Neste ponto do trabalho, decidiu-se construir uma nova bobina (Bobina 2), onde alguns destes fatores poderiam ser evitados.

4.4 Resultados para a Bobina 2

A Bobina 2 (ver Figura 3.17) foi projetada com base no MEF para ter indutância de aproximadamente $40 \mu\text{H}$. Desta forma, para uma emenda com tira auxiliar com 100 mm de sobreposição de fita 2G em cada terminal, cuja resistência seria de aproximadamente $40 \text{ n}\Omega$, espera-se um τ de cerca de 1000 s. A Figura 4.13 mostra como o sensor de corrente foi posicionado no criostato.

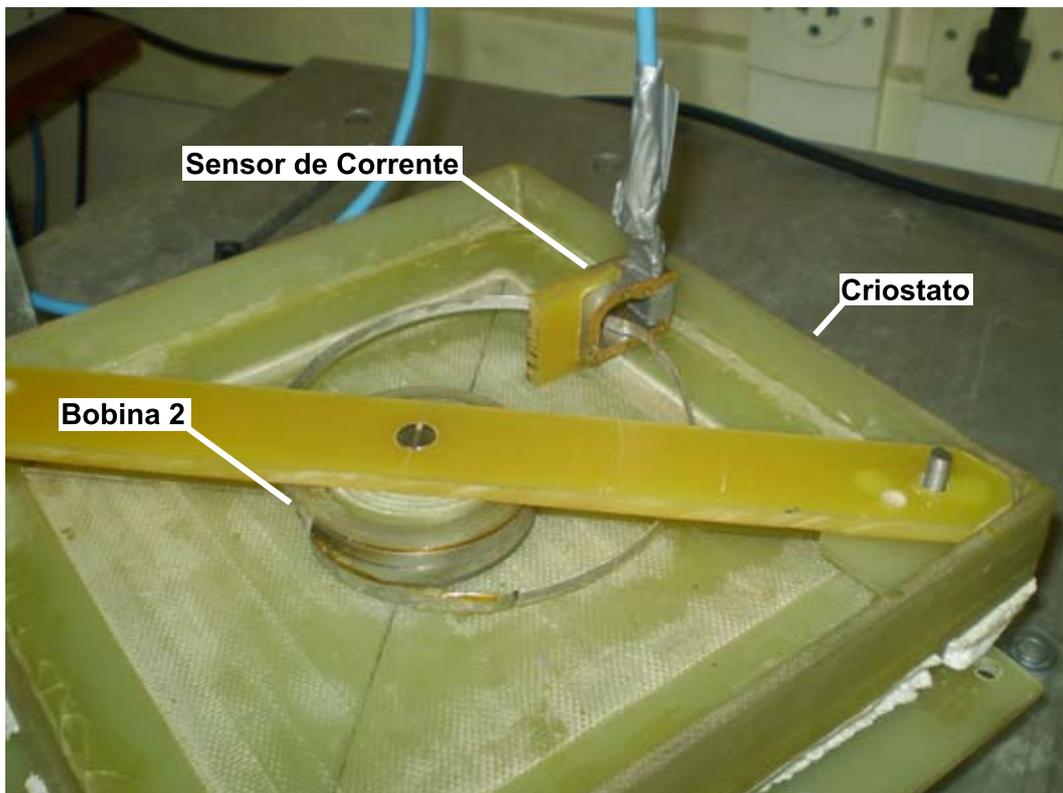


Figura 4.13: Bancada para medição da corrente induzida na bobina.

O ímã utilizado neste ensaio possui cerca de 15 mm de diâmetro e 10 mm de altura. A opção de utilizar um ímã menor foi no intuito de manter este componente

a uma distância suficientemente grande do sensor de corrente para não interferir nas medições. Neste ensaio, o ímã foi aproximado manualmente da Bobina 2 e em seguida retirado. A corrente induzida na bobina pode ser vista na Figura 4.14. Nota-se que ao aproximar o ímã da bobina (após 60 s de simulação), surgem correntes induzidas opondo-se a variação de campo magnético enlaçado pelas espiras. De maneira análoga, correntes são induzidas no sentido contrário ao anterior quando o ímã é afastado da bobina (após 100 s de simulação). O decaimento da corrente depende de resistência da emenda e da indutância da bobina.

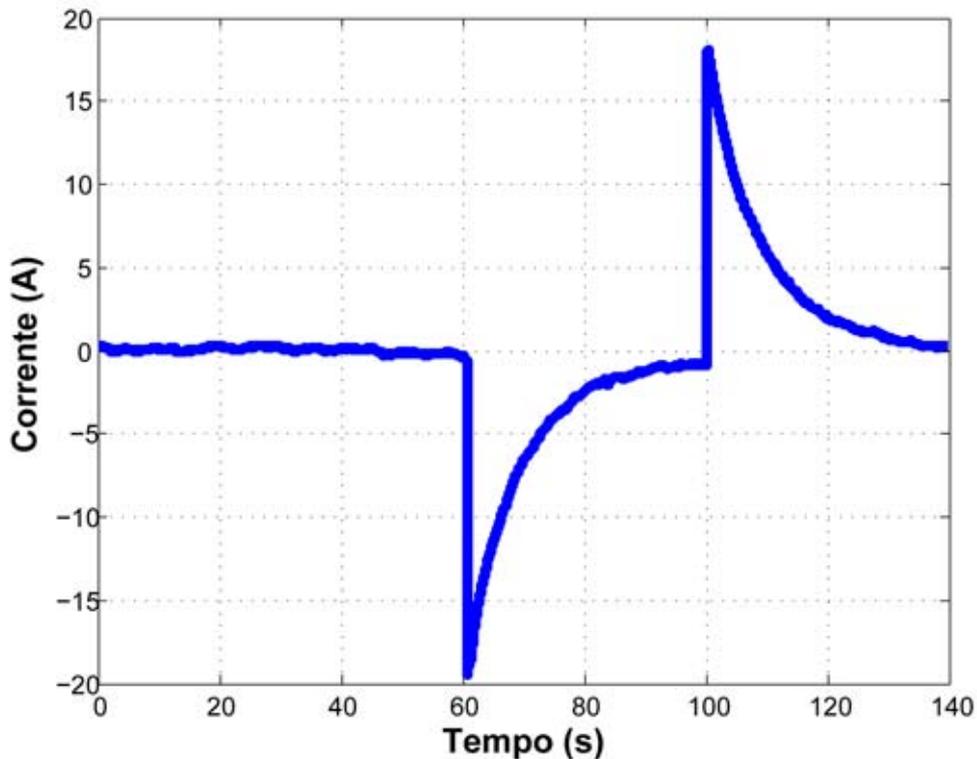


Figura 4.14: Forma de onda da corrente quando um ímã é aproximado manualmente Bobina 2 e em seguida retirado.

Novamente a constante de tempo foi menor do que a esperada (menos de 10 s). Desta vez a bobina não esteve sujeita a esforços eletro-mecânicos que poderiam danificá-la e também não foi alimentada por nenhuma fonte de corrente. Além disso, as correntes induzidas estão muito abaixo do valor de I_C . Como esta bobina foi impregnada com resina epoxy, não é possível desmontá-la para tentar localizar defeitos. Assim, continua sendo necessário identificar o fator que vêm danificando a bobina, de modo que, até que esta questão esteja esclarecida, é indicado construir protótipos pequenos, como a Bobina 2 que utiliza apenas 3,3 m de fita 2G.

Capítulo 5

Conclusões e Trabalhos Futuros

Este trabalho investigou a utilização de fitas supercondutoras de segunda geração em mancais magnéticos. Com o intuito de desenvolver a tecnologia necessária para trabalhar com estes materiais nas mais diversas aplicações, construiu-se uma bobina supercondutora, justificando o estudo da fita, das emendas e da bobina em si. Inicialmente, foram apresentados os principais conceitos da supercondutividade, desde a descoberta do fenômeno até o surgimento da tecnologia de filmes finos e a produção em escala industrial das fitas de segunda geração. Em seguida, a metodologia utilizada foi apresentada através da descrição dos aparatos experimentais e da forma como estes foram operados. Por fim, os resultados de simulações e experimentos foram comparados e discutidos, levando a conclusões e a novas possibilidades de trabalhos futuros, assuntos que serão abordados ao longo deste capítulo.

5.1 Conclusões

Do ponto de vista econômico, as fitas supercondutoras de segunda geração possuem grande potencial para redução de custos. Além disso, estes materiais apresentaram avanços significativos nos últimos anos, atingindo densidades de corrente críticas cada vez mais elevadas em comprimentos de fita cada vez maiores. Atualmente, para a aplicação em mancais magnéticos, os supercondutores maciços ainda são a opção mais economicamente viável, porém estes não possuem boas perspectivas de redução de custos ou de melhorias das propriedades supercondutoras. Desta forma, espera-se que os frutos referentes ao domínio das técnicas de trabalho com fitas de segunda geração possam ser colhidos no futuro.

O dispositivo construído para dar suporte ao processo de bobinagem mostrou-se uma ferramenta fundamental para enrolamentos que utilizam grandes comprimentos de fita, onde executar a tarefa manualmente poderia danificar a bobina. No entanto, este equipamento poderia ser melhorado, por exemplo, com a substituição do polietileno por um material mais apropriado e automatizando o processo de bobinagem

com o auxílio de motores.

O método utilizado na confecção das emendas não segue a risca o que foi proposto no manual do fabricante da fita 2G utilizada neste trabalho. Apesar disso, emendas de boa qualidade foram produzidas com o dispositivo de prensa e mola construído, muito embora não esteja descartada a hipótese de o tempo de exposição ao calor do forno ter degradado as propriedades da fita. Idealmente, a fita deve ser exposta ao calor durante o menor período de tempo possível, de modo que também existem melhorias que poderiam ser feitas no dispositivo destinado à confecção de emendas.

Nos ensaios com imposição de corrente verificou-se que a bobina supercondutora apresenta boa força de repulsão ao ímã (pressão no carretel de até 36 kPa nos ensaios realizados), mesmo com a fita operando abaixo de sua capacidade nominal. Neste tipo de aplicação, simulações com o MEF apresentam resultados compatíveis com os experimentos, não sendo necessário modelar a camada de YBCO das fitas como sendo um material supercondutor. Além disso, o MEF pode ser utilizado na otimização do mancal magnético com base nas soluções de campo, indutância e força.

Com a bobina supercondutora conectada num laço fechado, a constante de tempo do sistema ficou muito abaixo do valor esperado. Esta constatação deu margem para investigações que mostraram defeitos na fita 2G ao longo do enrolamento. As causas destes defeitos ainda não estão claras, apesar de algumas possibilidades terem sido descartadas, sendo as duas hipóteses mais plausíveis o tempo em que a bobina ficou no forno durante a confecção da emenda e possíveis esforços mecânicos durante o processo de bobinagem. A hipótese do “quench” ter danificado a bobina, apesar de também ser plausível, se tornou menos provável pelo fato de a Bobina 2 também ter sido danificada sem que ocorresse nenhum “quench”. Desta forma, acredita-se que a transição para o estado normal tenha ocorrido em função do defeito.

A bobina construída com fita 2G modelo 344C da AMSC não apresentou estabilidade lateral, como era esperado devido ao aprisionamento de fluxo. Posteriormente, verificou-se que o efeito do aprisionamento de fluxo é sobreposto pela força de atração do substrato ferromagnético pelo ímã. A partir desta observação, constatou-se que alguns modelos de fitas 2G não possuem o substrato ferromagnético, apresentando grande potencial para a aplicação em mancais magnéticos.

A pouca robustez das fitas supercondutoras de segunda geração, tanto do ponto de vista mecânico como térmico, é um fator dificultador que chega até mesmo a inviabilizar algumas aplicações. Além disso, a confecção de emendas supercondutoras, como as que são feitas em Nb-Ti e utilizadas no SMES, continuam sendo um desafio para os pesquisadores. Estas dificuldades representam um incentivo para o estudo e desenvolvimento das técnicas de trabalho com este material que vem sendo aprimorado rapidamente nos últimos anos e, apesar disso, ainda apresenta

boas perspectivas em relação a melhoria das propriedades supercondutoras.

5.2 Trabalhos Futuros

Este trabalho apresentou uma série de dispositivos e técnicas utilizadas para atender aos mais diversos objetivos, de modo que boa parte do que foi desenvolvido pode e terá que ser aperfeiçoado no decorrer dos próximos trabalhos. No entanto, uma nova aplicação onde as fitas supercondutoras são utilizadas como se fossem supercondutores maciços chama a atenção por sua originalidade. Esta aplicação é possível devido ao fato de as fitas 2G da SP utilizarem um material não ferromagnético como substrato. A Figura 5.1 mostra um ímã levitando com um mancal construído com fitas supercondutoras empilhadas. A fita utilizada foi a SF12050 da SP (especificações no Apêndice C), que não possui a camada externa de cobre.

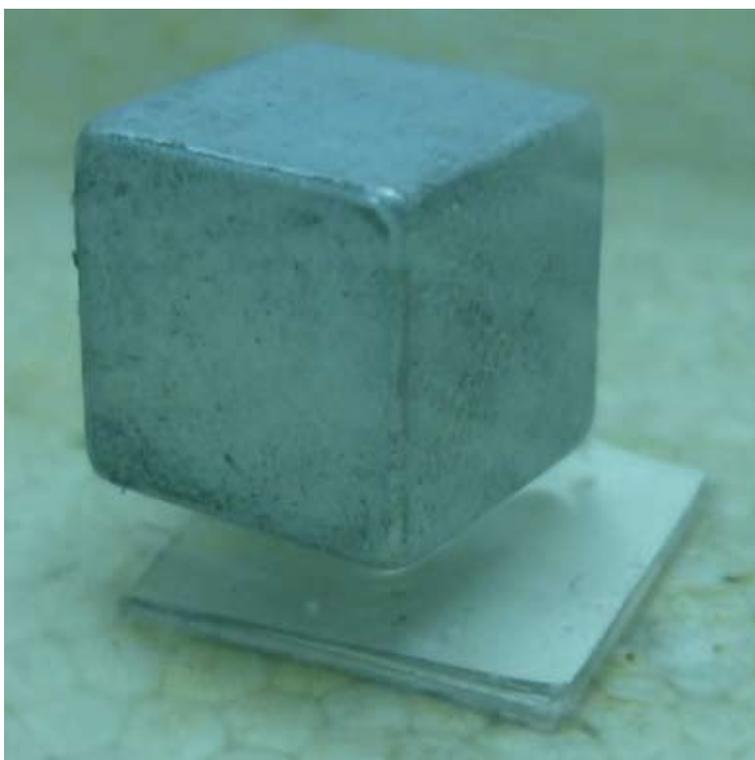


Figura 5.1: Mancal magnético supercondutor construído no LASUP com fitas 2G de 12 mm de largura empilhadas.

As avançadas técnicas de dopagem com dispersão de nano-pontos fazem com que as fitas 2G possuam densidade de corrente crítica pelo menos uma ordem de grandeza maior que a dos blocos maciços. Por outro lado, a camada de YBCO das fitas supercondutoras representa apenas uma pequena fração da área total da fita, fazendo com que a densidade de corrente de engenharia deste material possa ser menor que a dos blocos e, provavelmente, resultando em uma força de levitação por volume

de material também menor. No entanto, devido a degradação das propriedades supercondutoras do mancal construído com fitas empilhadas, não foi possível realizar nenhuma medida. Futuramente, pretende-se comparar a força de levitação de um supercondutor maciço com a de um bloco construído com fitas empilhadas, como o mostrado na Figura 5.2.

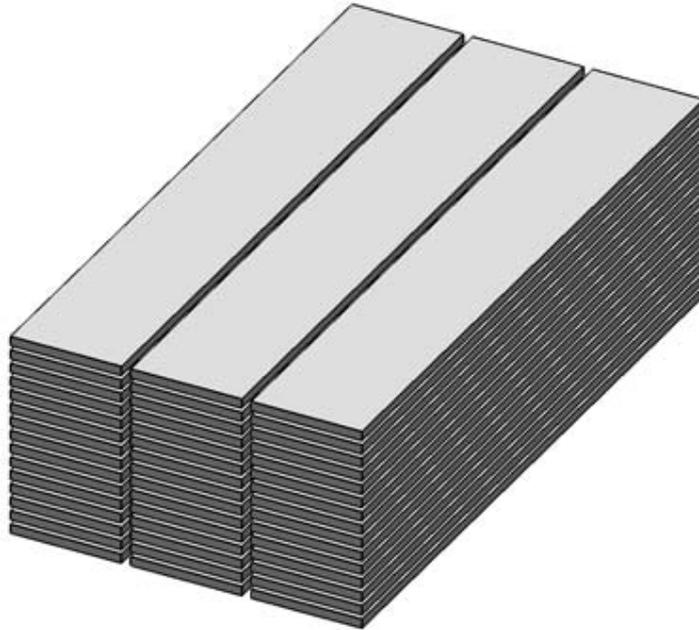


Figura 5.2: Ilustração de um bloco supercondutor construído com fitas 2G empilhadas.

Estima-se que a configuração da Figura 5.2 seja favorável à força de sustentação do mancal, embora apresente também estabilidade lateral devido ao aprisionamento de fluxo. Uma outra configuração que deve favorecer a força lateral pode ser vista na Figura 5.3, consistindo em um enrolamento simples da fita 2G, sem que sejam necessários cruzamentos ou emendas. Em ambas as configurações apresentadas, chama a atenção a simplicidade construtiva. No entanto, as fitas sem estabilizador são ainda mais sensíveis (mecânica, térmica e eletricamente) que as com revestimento de cobre. Desta forma, é necessário estudar uma maneira de impedir que o material tenha as suas propriedades degradadas. Uma possível solução é através da impregnação com resina epoxy.

É possível também pensar em configurações mais complicadas, como a bobina de dupla camada que foi estudada neste trabalho. A Figura 5.4 ilustra este mancal capaz de operar de maneira passiva devido ao efeito do aprisionamento de fluxo. Além disso, os terminais deste dispositivo podem ser usados para controlar a altura de levitação do mancal com a aplicação de corrente, ou curto-circuitados para que as correntes induzidas amortecem a variação da altura de levitação. Vale ressaltar que o decaimento das correntes induzidas pode ter uma constante de tempo elevada.

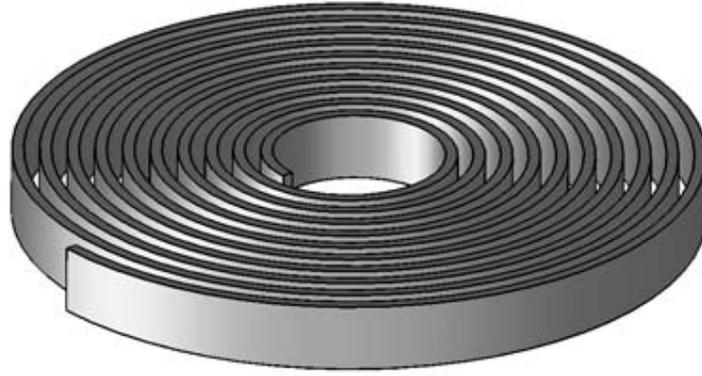


Figura 5.3: Ilustração de uma bobina supercondutora para a aplicação de mancais magnéticos.



Figura 5.4: Ilustração de uma bobina supercondutora de dupla camada para a aplicação de mancais magnéticos.

Em uma última etapa, pode-se pensar na construção de um mancal híbrido, utilizando fitas 2G e blocos supercondutores maciços, como ilustrado na Figura 5.5. Dependendo dos resultados e, principalmente, do preço da fita supercondutora, o bloco maciço poderia até mesmo ser substituído por um construído com fitas empilhadas.

5.3 Considerações Finais

As fitas 2G são pouco utilizadas na aplicação de mancais magnéticos, sendo um dos motivos o fato de os fabricantes de fita não otimizarem os produtos para esta aplicação. A AMSC, por exemplo, além de utilizar um substrato cujo material é ferromagnético, não produz fitas sem revestimento, o que aumenta consideravelmente a densidade de corrente de engenharia do produto. Por outro lado, a maior largura das fitas produzidas pela SP é de 12 mm, quando larguras maiores resultariam em laços corrente com área maior para aplicações como a da Figura 5.2.

Do ponto de vista de um empreendedor, este trabalho identificou um grande

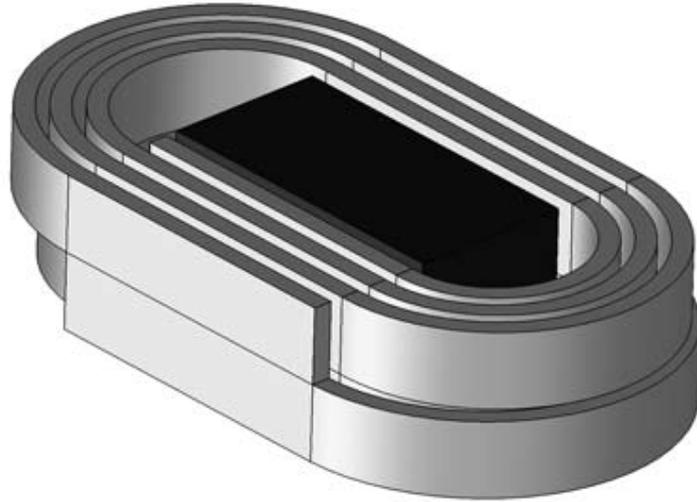


Figura 5.5: Ilustração de um mancal magnético supercondutor híbrido.

potencial das fitas supercondutoras de segunda geração para a aplicação de mancais magnéticos. Porém, esta tecnologia está sendo desenvolvida com o foco em outras aplicações. Não seria a hora de alguém tentar mudar isso?

Referências Bibliográficas

- [1] HAYT, W. H., BUCK, J. A. *Eletromagnetismo*. 7 ed. Nacional, Mc Graw Hill, 2008.
- [2] ONNES, H. K. “The Superconductivity of Mercury”, *Comm. Phys. Lab. Univ. Leiden*, 1911.
- [3] ONNES, H. K. “Report on the researches made in Leiden cryogenic laboratory between the second and third international congress of refrigeration”, *Selected Reprints of American Association of Physics Teachers*, v. 34, n. b, pp. 55–70, 1913.
- [4] COOPER, L. N. “Bound Electron Pairs in a Degenerate Fermi Gas”, *PHYSICAL REVIEW*, v. 104, n. 4, pp. 1156–1157, Novembro 1956.
- [5] BARDEEN, J., COOPER, L. N., SCHRIEFFER, J. R. “Theory of Superconductivity”, *PHYSICAL REVIEW*, v. 108, n. 5, pp. 1175–1204, Dezembro 1957.
- [6] SOUZA, W. T. B. *Processamento, caracterização e estudo de fenômenos críticos no sistema supercondutor $Ho_xPr_{1-x}Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$* . Universidade Estadual de Ponta Grossa, 2008. Projeto de fim de Curso em Física.
- [7] XU, K., CAO, P., HEATH, J. R. “Achieving the theoretical depairing current limit in superconducting nanomesh films”, *American Chemical Society*, pp. 4206–4210, 2010.
- [8] MEISSNER, W., OCHSENFELD, R. “Ein neuer effekt bei eintritt der supra-leitfähigkeit”, *Die Naturwissenschaften*, v. 21, pp. 787–788, 1933.
- [9] DIAS, D. H. N. *Modelagem de mancais lineares supercondutores considerando o resfriamento na presença de campo magnético*. D.sc, Unversidade Federal do Rio de Janeiro, 2009.
- [10] ABRIKOSOV, A. A. “On the magnetic properties of superconductors of the second group.” *Soviet Physics (JETP)*, v. 5, n. 6, pp. 1174–1182, 1957.

- [11] LARBALESTIER, D., GUREVICH, A., FELDMANN, D. M. “High- T_c superconducting materials for electric power applications”, *NATURE*, v. 414, pp. 368–377, 2001.
- [12] SOTELO, G. G. *Modelagem de supercondutores aplicada ao projeto de mancais magnéticos*. D.sc, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007.
- [13] GINZBURG, V. L., LANDAU, L. D. “On the theory of superconductivity”, *JETP*, pp. 1064–1082, 1950.
- [14] ROSE-INNES, A. C., RHODERICK, E. *Introduction to Superconductivity*. Oxford, London, Edingburg, New York, Toronto, Sydney, Paris, Braunschweig, Pergamon Press, 1969.
- [15] CHAPMAN, S. J. *A hierarchy of models for type-II superconductors*. OXFORD, Março 2004.
- [16] *About Superconductivity*. American Superconductor, Disponível em: http://www.amsc.com/aboutus/about_super.html. Acesso em: 29 dez. 2010, 00:24:30., .
- [17] CYROT, M., PAVUNA, D. *Introduction to superconductivity and high- T_c materials*. Singapore, New Jersey, London, Hong Kong, World Scientific, 1992.
- [18] CHANDLER, J. G., JIANG, J., CAI, X. Y., et al. “Irreversibility Fields of Bi-2223 at 30-77 K”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2003.
- [19] POOLE, C. P., FARACH, H. A., CRESWICK, R. J. “Superconductivity”, *California: Academic Press*, 1995.
- [20] LAMAS, J. S. *Projeto e Construção de um Limitador de Corrente Supercondutor Utilizando Fitas de YBCO*. M.sc, Escola de Engenharia de Lorena -Universidade de São Paulo, 2009.
- [21] BEIMLING, C. V. *Propriedades inter e intragranulares de amostras mesoscópicas de $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ preparadas por síntese química*. D.sc, Universidade Federal de São Carlos, 2010.
- [22] HULL, J. R., MURAKAMI. “Applications of bulk high-temperature superconductors”, *Proceedings of the IEEE*, v. 92, n. 10, pp. 1705–1718, 2004.

- [23] HU, Z. Z., JIN, J. X. “Development and applications of high- T_c superconducting bulk materials”, *Proceedings of 2009 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices*, pp. 42–47, 2009.
- [24] LI, X., RUPICH, M. W., THIEME, C. L. H., et al. “The Development of Second Generation HTS Wire at American Superconductor”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 19, n. 3, pp. 3231–3235, 2009.
- [25] XIE, Y., SELVAMANICKAM, V., MARCHEVSKY, M., et al. “Second-Generation HTS Wire Manufacturing and Technology Advancement at SuperPower”, *Proceedings of 2009 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices*, pp. 398–402, 2009.
- [26] SELVAMANICKAM, V., CHEN, Y., XIONG, X., et al. “High Performance 2G Wires: From R&D to Pilot-Scale Manufacturing”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 19, n. 3, pp. 3225–3230, 2009.
- [27] BALDAN, C. A., LAMAS, J. S., SHIGUE, C. Y., et al. “Fault Current Limiter Using YBCO Coated Conductor-The Limiting Factor and Its Recovery Time”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 19, n. 3, pp. 1810–1813, 2009.
- [28] OGATA, M., MIYAZAKI, Y., HASEGAWA, H., et al. “Basic Study of HTS Magnet Using 2G Wires for Maglev Train”, *Accepted for publication at Physica C*, pp. 1–5, 2010.
- [29] PEI, R., VELICHKO, A., HONG, Z., et al. “Numerical and Experimental Analysis of IC and AC Loss for Bent 2G HTS Wires Used in an Electric Machine”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 19, n. 3, pp. 3356–3360, 2009.
- [30] HAZELTON, D. W., SELVAMANICKAM, V. “SuperPower’s YBCO Coated High-Temperature Superconducting (HTS) Wire and Magnet Applications”, *Proceedings of the IEEE*, v. 97, n. 11, pp. 1831–1836, 2009.
- [31] NAGASHIMA, K., SEINO, H., SAKAI, N., et al. “Superconducting Magnetic Bearing for a Flywheel Energy Storage System Using Superconducting Coils and Bulk Superconductors”, *Physica C*, v. 469, pp. 1244–1249, 2009.
- [32] YUAN, W., XIAN, W., AINSLIE, M., et al. “Design and Test of a Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) Coil”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 20, n. 3, pp. 1379–1382, 2010.

- [33] GAMBLE, B. *Progress on High Temperature Superconducting (HTS) Electric Machines*. American Superconductor Corporation, "Disponível em: <http://www.amsc.com/products/motorsgenerators/documents/HTSMachinesBBGambleApr05.pdf>. Acesso em: 15 fev. 2011, 00:59:05."
- [34] *HTS properties*. ATZ, Disponível em: <http://www.atz-gmbh.com/>. Acesso em: 27 jan. 2011, 12:19:39.
- [35] *SuperPower[®] 2G HTS Wire Specifications*. SuperPower, Disponível em: http://www.superpower-inc.com/system/files/SP_2G+Wire+Spec+Sheet_for+web_0509.pdf. Acesso em: 27 jan. 2011, 16:18:02.
- [36] SELVAMANICKAM, V., CHEN, Y., XIONG, X., et al. "Recent Progress in Second-Generation HTS Conductor Scale-Up at SuperPower", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 17, n. 2, pp. 3231–3234, 2007.
- [37] *Guidelines for Hand-Assembled Splicing of 344 Superconductors*. American Superconductor, Disponível em: http://www.amsc.com/pdf/SN003_0109.pdf. Acesso em: 01 abr. 2010, 08:36:22., .
- [38] *Guidelines for Handling and Soldering 344 Superconductors*. American Superconductor, Disponível em: http://www.amsc.com/pdf/SN002_0909.pdf. Acesso em: 01 abr. 2010, 08:38:47., .
- [39] *Flux & Solder Compatibility*. Indium Corporation of America, Disponível em: http://www.indium.com/_dynamo/download.php?docid=468. Acesso em: 03 jan. 2011, 15:22:22.
- [40] BALDAN, C. A., OLIVEIRA, U. R., SHINGUE, C. Y., et al. "Evaluation of Electrical Properties of Lap Joints for BSCCO and YBCO Tapes", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 19, n. 3, pp. 2831–2834, Junho 2009.
- [41] *DuPont Kapton HN*. DuPont, "Disponível em: http://www2.dupont.com/Kapton/en_US/assets/downloads/pdf/HN_datasheet.pdf. Acesso em: 16 fev. 2011, 09:35:23."
- [42] HTS-110, "Disponível em: <http://www.hts110.co.nz/>. Acesso em: 16 fev. 2011, 09:52:37."
- [43] SHI, D. *High-Temperature Superconducting Materials Science and Engineering*. Oxford, New York, Tokyo, Pergamon, 1995.

- [44] SEOL, S. Y., ASKEW, T. R., CHAT, Y. S. “Experimental and analytical investigation of dissipation and heating in a YBCO filament”, *Pergamon*, v. 4, n. 5/6, pp. 231–240, 1996.
- [45] *Fluxograma para levantamento da característica da tensão com a corrente elétrica para materiais condutores e supercondutores utilizado no CEPEL*. Recebido de `sens@cepel.br` em 24 maio 2010 às 09:37:07.
- [46] *CYSJ1069 GaAs HALL-EFFECT ELEMENTS*. BB Automacao Inc, Disponível em: <http://www.bbautomacao.com.br>. Acesso em: 17 jan. 2011, 15:18:17.
- [47] MARCELINO, C. L. C. *Automação de um sistema de medida para obtenção de curvas B vs. H*. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008. Projeto de fim de Curso em Engenharia Elétrica.
- [48] ABREU, R. A. *Sistemas de Medição de Perturbações e Campo Magnético do Laboratório de Aplicações de Supercondutores*. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006. Relatório de Estágio Supervisionado em Engenharia Elétrica.
- [49] SASS, F., SOTELO, G. G., POLASEK, A., et al. “Application of 2G-Tape for Passive and Controlled Superconducting Levitation”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2010. Artigo aceito para publicação em edições futuras da revista.
- [50] SALON, S. J. *Finite Element Analysis of Electrical Machines*. Boston, London, Dordrecht, KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS, 1995.
- [51] BRAMBILLA, R., GRILLE, F. “Simulating Superconductors in AC Environment: Two Complementary COMSOL Models”, *COMSOL Conference*, 2009.
- [52] SOTELO, G. G., DIAS, D. H. N., DE ANDRADE, R., et al. “Tests on a Superconductor Linear Magnetic Bearing of a Full-Scale MagLev Vehicle”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2010. Artigo aceito para publicação em edições futuras da revista.
- [53] REY, C. M., DUCKWORTH, R. C. “Current-Voltage Measurements in a 2G YBCO Coil”, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 17, n. 2, pp. 2278–2281, 2007.

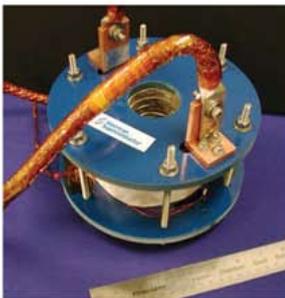
Apêndice A

Especificações da fita 2G modelo
344C da AMSC.

344 Superconductors

Type 344C: Copper stabilized YBCO second generation HTS wire

- HTS wire laminated on both sides with hardened copper for stabilization and strength
- Solder fillets at edges provide hermeticity, corrosion protection, and enhanced electrical stability
- Robust product with excellent mechanical strength and bend tolerance
- Optimized for use in power dense coils and magnets



1.2 T HTS coil using Type 344C superconductors.

344 superconductors are American Superconductor's new YBCO second generation HTS wires.



Mechanical Properties:

Average thickness:	0.18 - 0.22 mm
Minimum width:	4.27 mm
Maximum width:	4.55 mm
Minimum double bend diameter (RT):	25 mm ¹
Maximum rated tensile stress (RT):	200 MPa ¹
Maximum rated wire tension (RT):	12 kg
Maximum rated tensile strain (77K):	0.3% ¹

Electrical Properties:

Minimum amperage (I _c) ^a	Average engineering current density (J _e) ^b
70 A	7,900 A/cm ²
80 A	9,100 A/cm ²
90 A	10,200 A/cm ²
≥100 A	Contact factory

Spliced wire available in long lengths

Insulation options: Contact factory

Certificate of Conformance provided.

Certificate of Analysis optionally available. Contact factory.

Leaders and tailers optionally available. Contact factory.

¹ With 95% I_c retention

^a 77K, self-field, 1μV/cm

^b J_e is a calculated value based on average thickness and width



REVOLUTIONIZING THE WAY THE WORLD USES ELECTRICITYSM

American Superconductor Corporation
 64 Jackson Road
 Devens, MA 01434 USA
 htswire@amsc.com
 tel +1 978 842 3519
 fax +1 978 842 3364
 www.amsc.com

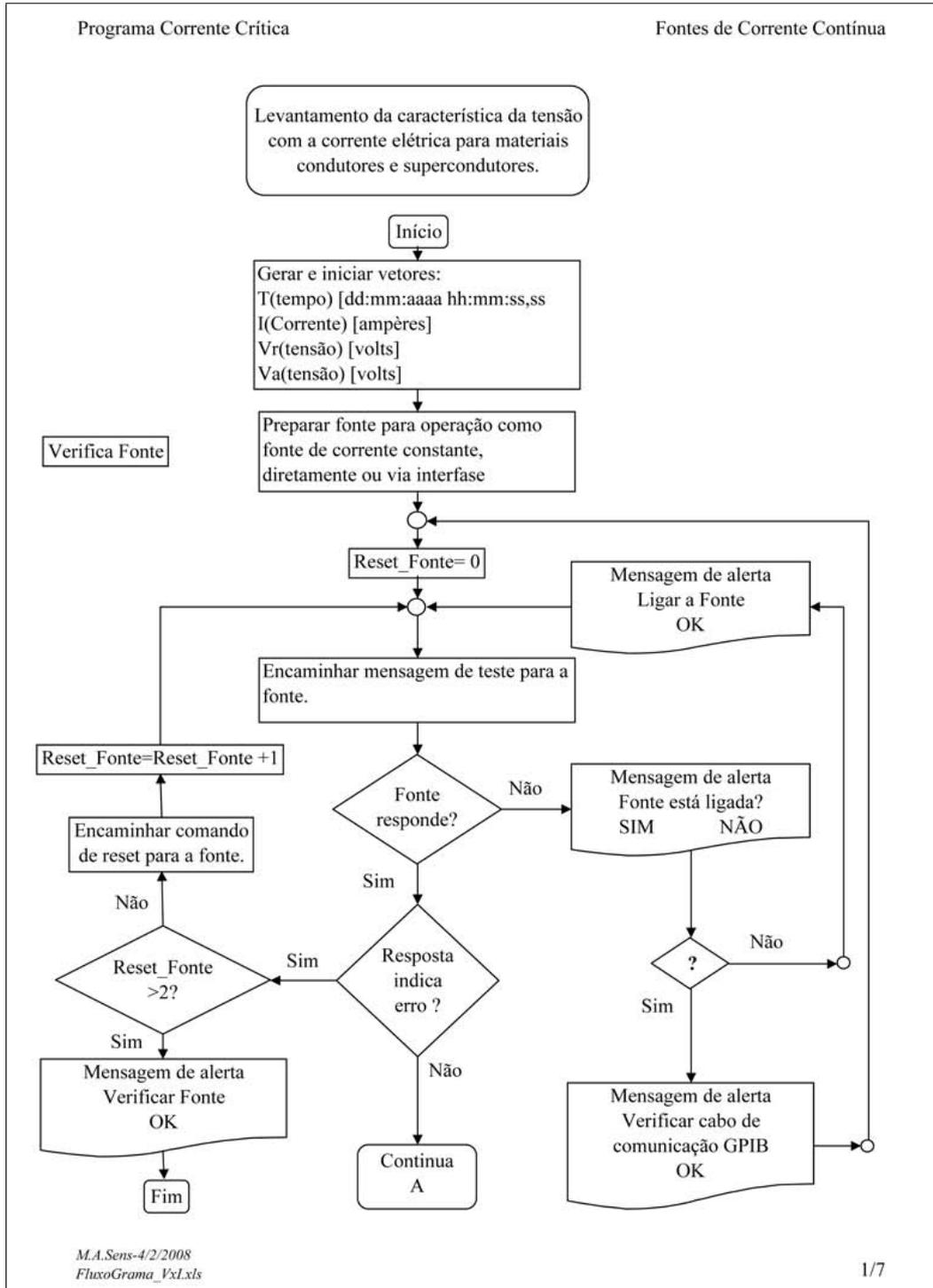
© 2009 American Superconductor. All rights reserved. American Superconductor and design, AMSC, POWERED BY AMSC, Revolutionizing the Way the World Uses Electricity are trademarks of American Superconductor Corporation. Printed in USA.

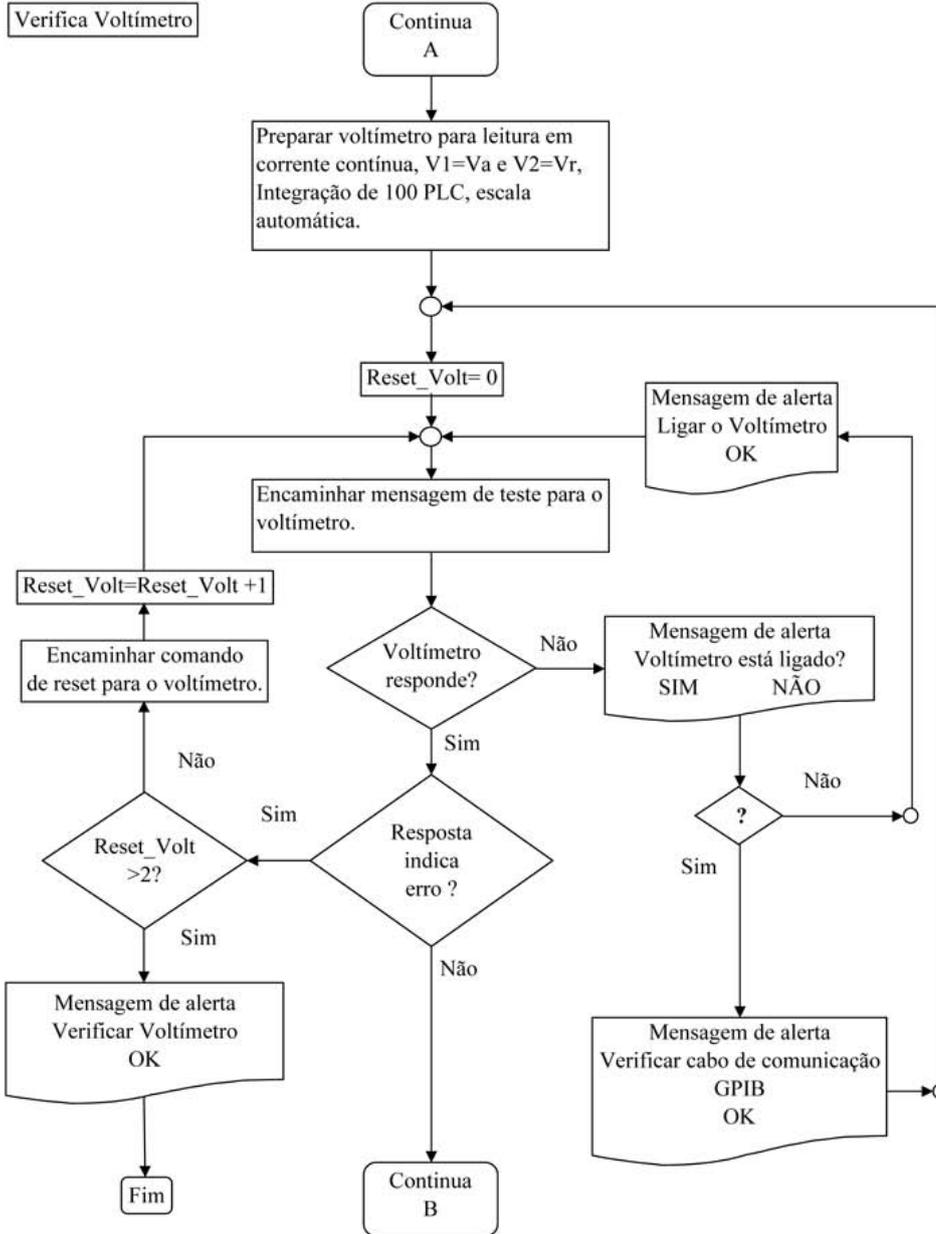
WFS_344C_0309_A4

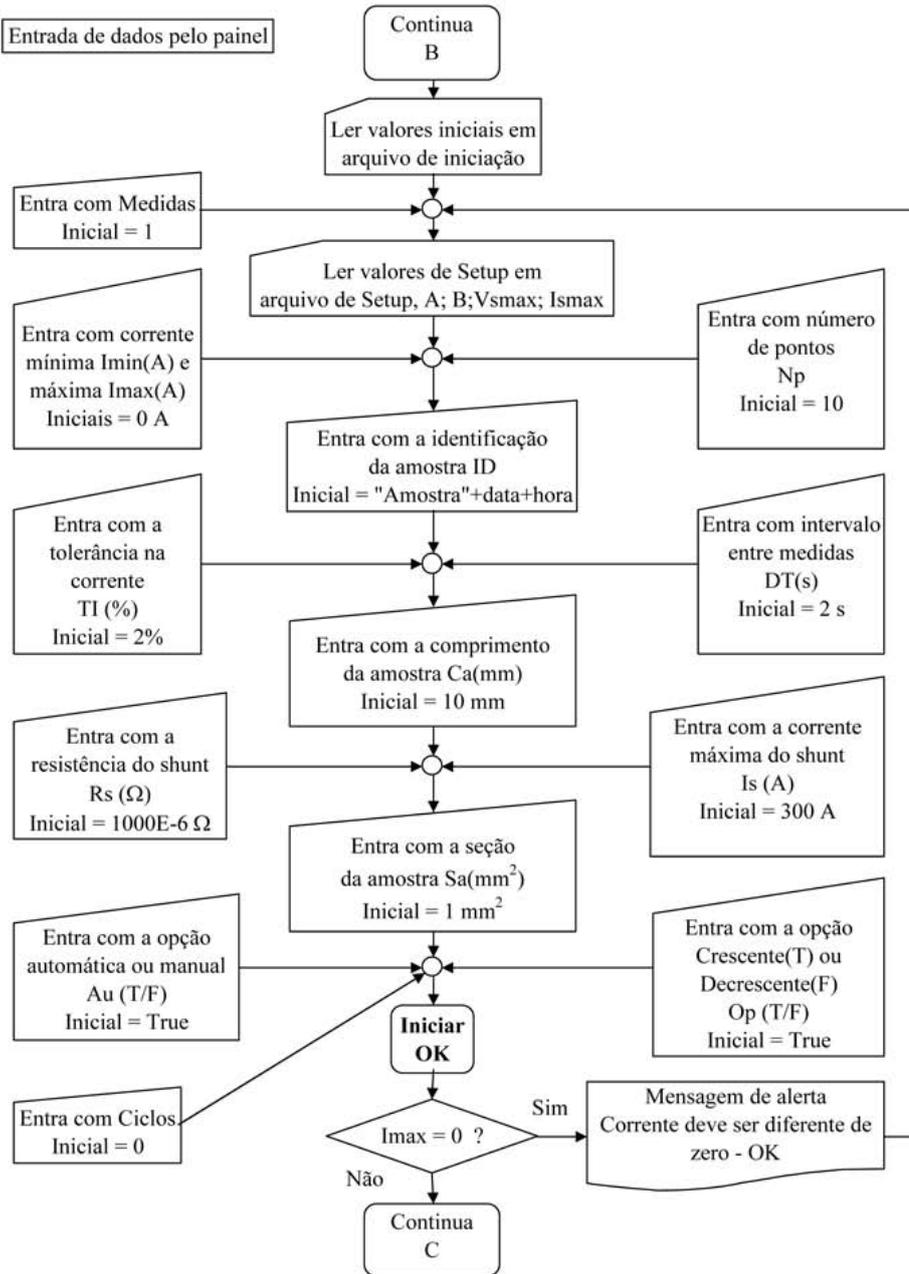
Apêndice B

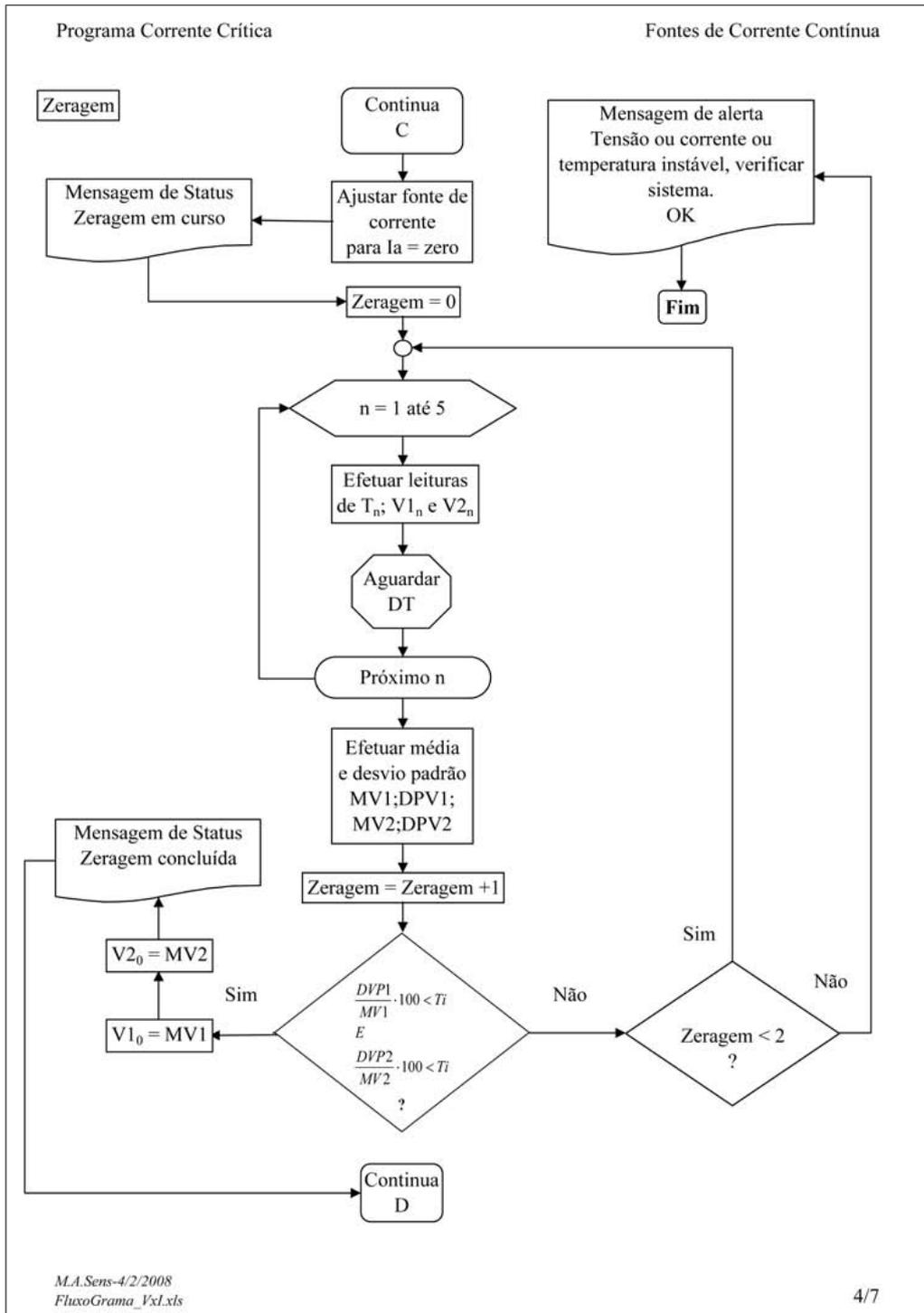
Fluxograma para levantamento da característica da tensão com a corrente elétrica para materiais condutores e supercondutores utilizado no CEPEL.

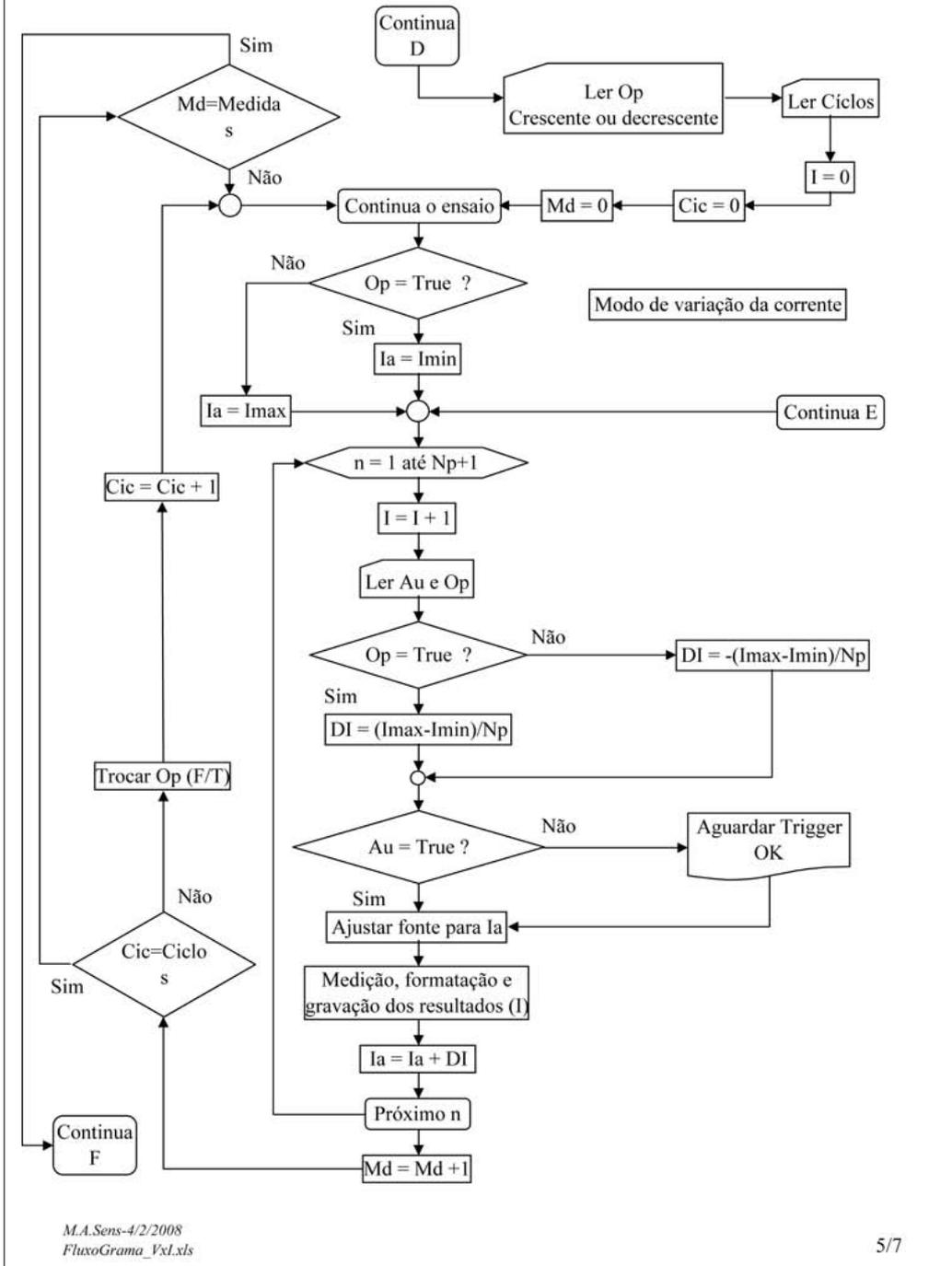
Recebido do Engenheiro Márcio Sens (sens@cepel.br) em 24 maio 2010 às 09:37:07.

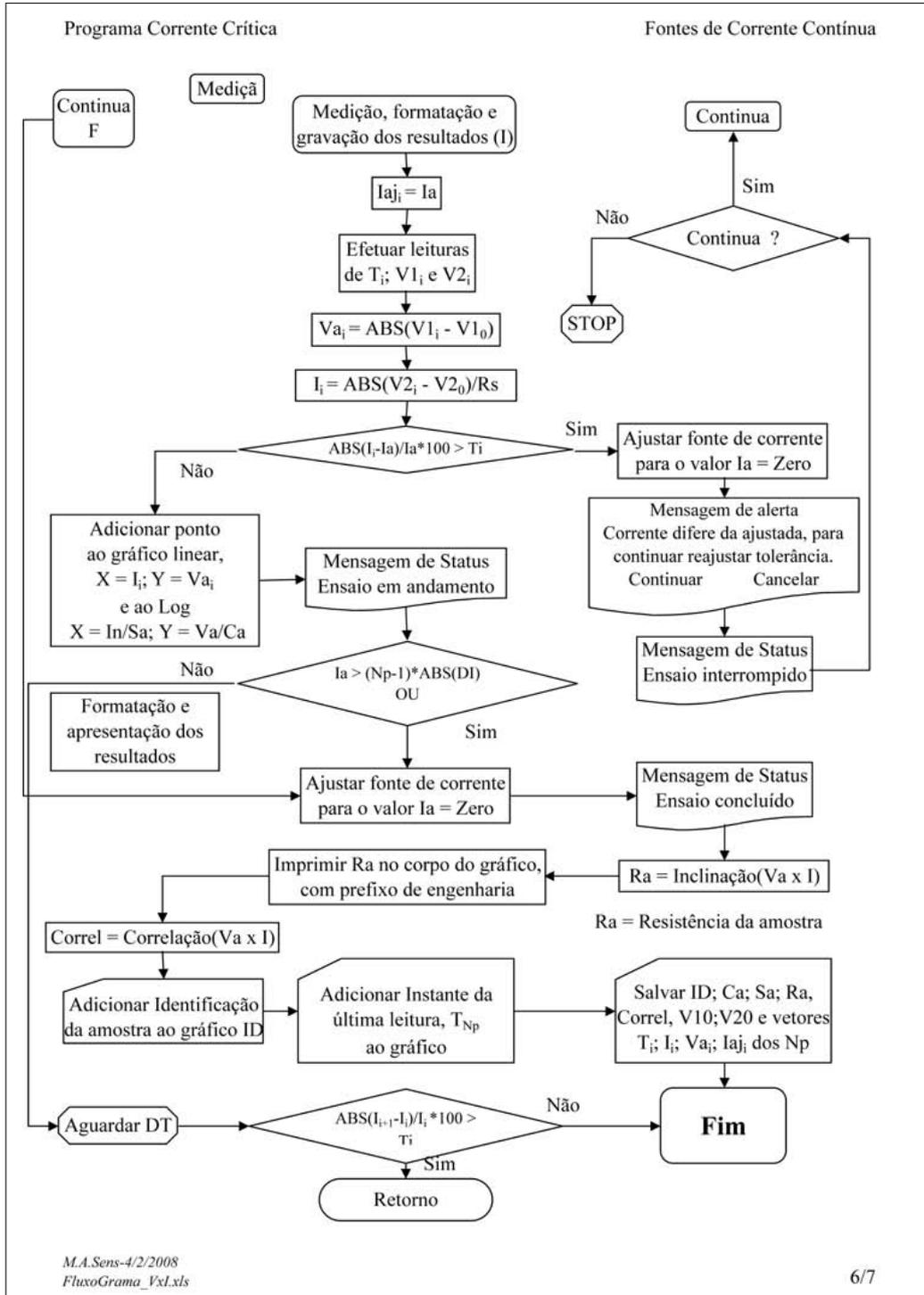








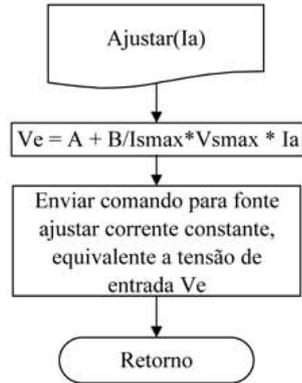




Programa Corrente Crítica

Fontes de Corrente Contínua

Ajustar Corrente

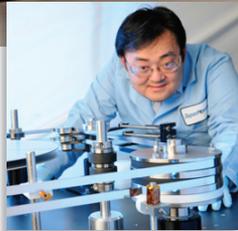
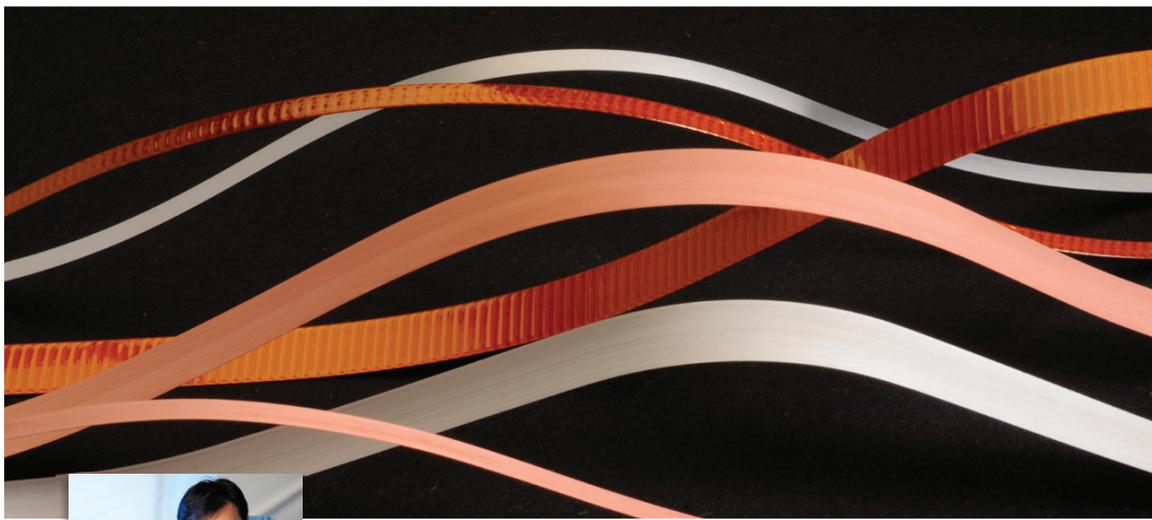


A e B são parâmetros de setup, para ajuste na calibração da fonte.

I_{smax} = Corrente máxima da fonte de corrente, quando a tensão de controle V_e for aplicada. V_{smax} e V_e são parâmetros do setup.

Apêndice C

Especificações das fitas 2G da SP.



SuperPower® 2G HTS Wire Specifications

Second-Generation High Temperature Superconductor (2G HTS)

SuperPower has been developing (RE)BCO-based 2G HTS wire at its manufacturing plant in Schenectady, NY since 2000 and is now routinely producing long lengths of high performance wire that is being shipped to customers around the world for a wide range of applications.

SuperPower® 2G HTS Wire is produced in an automated, continuous process beginning with an inexpensive high strength metal alloy "tape" as the base substrate material and adding buffer layers, ceramic-based superconductor material and protective overlayers.

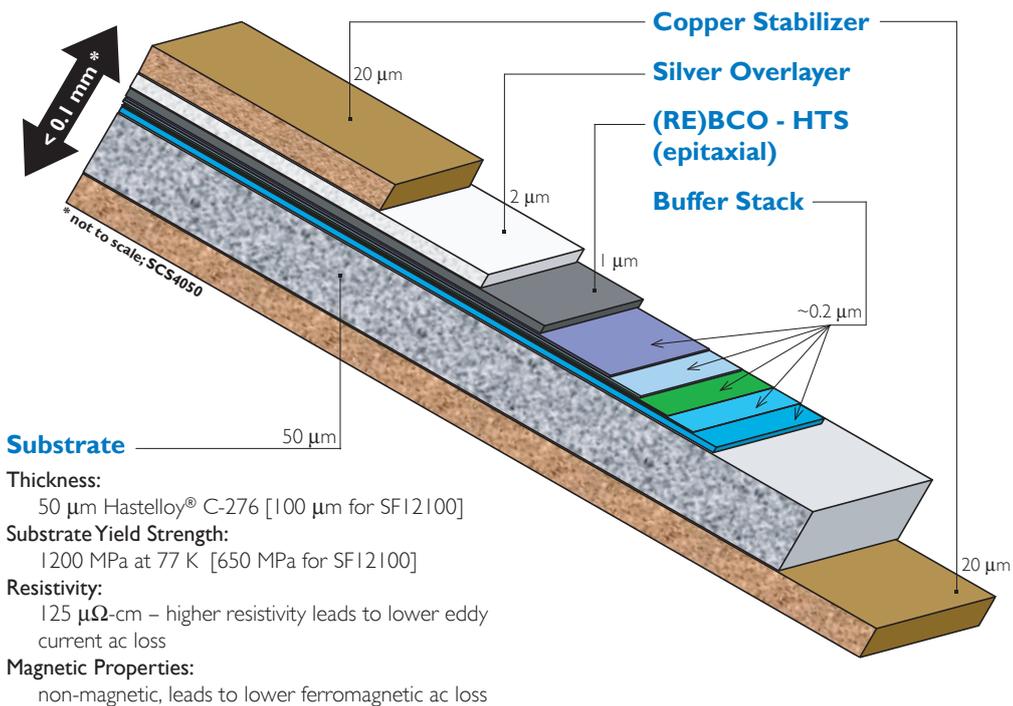
Once the wire has been slit into device-specific widths, Surround Copper Stabilizer (SCS) is applied to completely encase the wire. Overcurrent capability in SCS wire can be tailored to the specific application. The stabilizer protects the conductor and produces rounded edges that are beneficial for high-voltage applications. Further, the probability of failure in the device due to voltage breakdown is reduced in wire with SCS. SuperPower's SCS has been successfully implemented and tested on continuous lengths of hundreds of meters of wire.

SuperPower® is a registered trademark of SuperPower, Inc.

SuperPower Inc.
superior performance.
powerful technology.

SuperPower® 2G HTS Wire Specifications

Spec SF = Stabilizer Free SCS = Surround Copper Stabilizer	SF2050	SF4050	SCS4050	SF6050	SCS6050	SF12050
Minimum I_c	30	80	80	120	120	240
Widths	2	4	4	6	6	12
Total Wire Thickness	0.055	0.055	0.1	0.055	0.1	0.055
Standard Copper Stabilizer Thickness	n/a	n/a	0.04	n/a	0.04	n/a
Critical Tensile Stress			> 550		> 550	
Critical Axial Tensile Strain	0.45%	0.45%	0.45%	0.45%	0.45%	0.45%
Critical Bend Diameter in Tension	11	11	11	11	11	11
Critical Bend Diameter in Compression	11	11	11	11	11	11



SCSI2050	SF12100	Unit	Comment
240	200	amp	measured by continuous direct current
12	12	mm	
0.1	0.105	mm	
0.04	n/a	mm	surround stabilizer with rounded corners
> 550		MPa	at 77K
0.45%	0.4%		at 77K
11	25	mm	at room temperature
11	25	mm	at room temperature

SuperPower has produced a number of prototype devices utilizing 2G HTS SCS Wire, including:

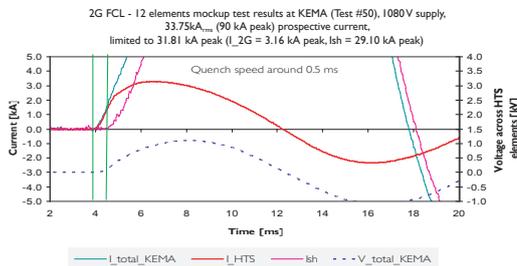
- The world's first in-grid Power Cables utilizing 4 mm wide 2G HTS wire were fabricated by Sumitomo Electric Industries with SuperPower's wire



- Measured AC losses in a sample cable were 0.36 W/m at 1000A_{rms} ($I_{op}/I_c \sim 65\%$, 60 Hz) over the entire cable structure

Other applications:

- 2G HTS Wire Type SF12100 with highly resistive substrate suitable for fault current limiter (FCL) applications. First peak limitation demonstrated with fast response time, low quench current, and rapid recovery.



We are ready TODAY to discuss your SuperPower® 2G HTS Wire needs for your specific application.

- Standardized testing provided with all wire deliveries
- Hermeticity - 24 hrs, 10 bar, LN₂, no change in I_c & thickness
- I_c uniformity in long lengths of 2G HTS wire: STDEV less than 10%
- Insulated wire is available (see back page for details)
- I_c values range from 80-110 Amps at 77 K in 4 mm width
- Engineering Current Density (J_e) = 21 – 29 kA/cm²

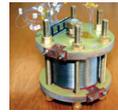
Other custom configurations are available.

Please contact us at info@superpower-inc.com with your specifications, including:

- Wire length, width and thickness requirements
- Performance characteristics (critical current, stress, etc.)
- Silver overlayer and/or copper stabilizer preference
- Other physical or performance characteristics
- Delivery timeframe
- Application

SuperPower® 2G HTS Wire and coil application:

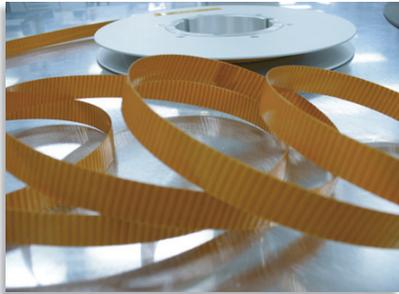
- 2006: High field coil fabricated with 2G HTS wire achieved a record magnetic field of 2.4 Tesla at 64K



- 2007: High field magnet coil fabricated with 2G HTS wire and tested at NHMFL achieved a record magnetic field of 26.8 Tesla in 19 Tesla background field at 4.2K

- 2008: Coil fabricated by NHMFL with SuperPower® 2G HTS Wire was tested at 4.2K in 31 Tesla background field at NHMFL and achieved a new world record of 33.6 Tesla at an average winding current density of 459 A/mm²

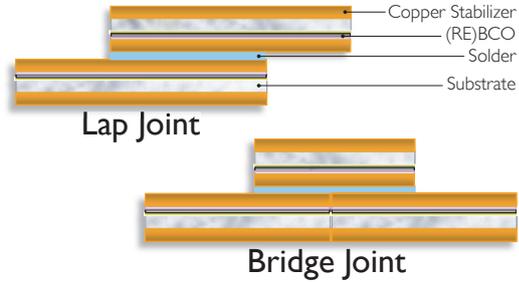
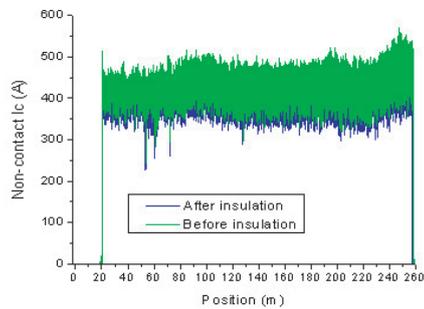




Insulated 2G HTS Wire

SuperPower offers in-house fabrication of insulated wire for a variety of applications. Available configurations include both 4 mm and 12 mm wire widths.

Wire is insulated with 0.025 mm polyimide with a 0.050 mm silicone adhesive. Wrapping includes an adjustable overlap of from 0 to 50%. After insulation, the wire is not accessible for transport current measurements at every 5 m in the reel-to-reel test system. Therefore, a non-contact I_c technique is used to re-confirm the quality of wire after insulation.



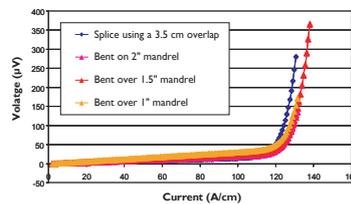
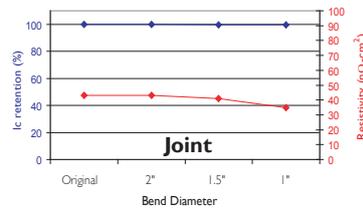
High Quality Joints

SuperPower, Inc. routinely holds the world record in long, splice-free lengths of 2G HTS wire. Despite these long lengths, however, it is often necessary to splice wire segments together. Our low resistance, high quality joints and splices have a minimal effect on the superior performance of our wire.

- Base tape thickness = 0.1 mm
- Thickness at joint or splice = 0.22 mm (*about two times thinner than splices with 1G or other 2G wires!*)
- Joint length = 2.5 to 10 cm, or per customer specifications
- Temperature limit on solder up to 250°C (much higher than with other 2G HTS wires)

Joints between 2G HTS wires show excellent electrical and thermo-mechanical properties.

- No degradation in I_c ($1 \mu V/cm$) over the joint or splice
- No decrease in I_c and no increase in joint resistivity when bent over a diameter of 1 inch
- Minimum bend diameter at joint = 25 mm
- Joint resistivity = 40-50 $n\Omega \cdot cm^2$



PHILIPS
SuperPower, Inc. is a subsidiary of Royal Philips Electronics N.V.

Rev. 3 2009 | 2G Marketing/Marketing Collateral/Working Sheets/2009 Working Sheets/SP_2G Wire Spec Sheet_3 2009.indd | pdf

SuperPower, Inc. | 450 Duane Ave. | Schenectady, NY 12304 USA
Tel: 518-346-1414 | Fax: 518-346-6080
E-mail: info@superpower-inc.com | Website: www.superpower-inc.com