



CARACTERIZAÇÃO DE FITAS SUPERCONDUTORAS 2G NA PRESENÇA DE CAMPOS MAGNÉTICOS

Flávio Goulart dos Reis Martins

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

Orientador: Rubens de Andrade Junior, D. Sc.

Rio de Janeiro, RJ - Brasil

Janeiro de 2012

CARACTERIZAÇÃO DE FITAS SUPERCONDUTORAS 2G NA PRESENÇA DE CAMPOS MAGNÉTICOS

Flávio Goulart dos Reis Martins

PROJETO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.

Aprovada por:



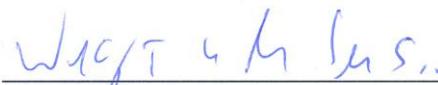
Prof. Rubens de Andrade Jr., D.Sc.
(Orientador)



Felipe Sass, M.Sc.
(Co-orientador)



Prof. Richard Magdalena Stephan, D.Sc.



Wescley Tiago Batista de Sousa, M.Sc.

Rio de Janeiro, RJ - Brasil

Janeiro de 2012

Agradecimentos

É com muito orgulho e satisfação que encerro esta etapa da minha vida, e espero trazer ainda mais orgulho àqueles que deram todo o apoio, tornando possível esta conquista.

Agradeço primeiramente aos meus pais, Bárbara e Laercio, por toda a dedicação para que eu tivesse a melhor educação, saúde e o máximo de conforto e carinho. Vocês zelaram por mim, se desdobraram, muitas vezes abdicando do próprio bem-estar, para garantir que nada estivesse menos do que perfeito. Nunca deixaram faltar nada que fosse necessário, sempre surpreendendo por fazer mais do que eu esperava e nunca deixando de me ajudar quando precisei. Eu estar aqui é a prova de que tiveram êxito em sua missão.

Ao meu irmão Daniel que cresceu comigo e com quem compartilho as maravilhosas memórias da minha infância e adolescência. Alguém que também sempre zelou incessantemente por mim e acompanhou meus passos de perto. Você me ensinou tantas incontáveis coisas e estimulou minha criatividade e curiosidade mais do que qualquer outro. O orgulho de quem você é, seu conhecimento e habilidades foram o principal motivo de estar trilhando este caminho hoje. Obrigado também à minha cunhadinha Daniela pelo carinho e por fazer meu irmão feliz!

Aos meus avós Marlene, Laercio, Santuza e Álvaro (in memoriam) que sempre estiveram presentes, dando apoio, carinho, sabedoria, muito aconchego, nunca se esquecendo de mim e ajudando meus pais a cuidarem de mim.

À Tia Zulma, que sempre aparece trazendo muita alegria, carinho e conselhos.

Agradeço àqueles que escolhi para me acompanhar e estão sempre ao meu lado: Lukas Baptista, tão carinhoso e cuidadoso, me fazendo muito feliz; Tiago Panaro, há mais tempo que qualquer outro, um amigo sempre paciente e tranquilo; Marjorie de Oliveira, divertida e companheira, amiga para todas as horas; Benjamin “Ben” Gomes, sábio, intenso e cativante, que me ajudou a ter coragem para encarar e vencer muitos desafios; Vera Ruffato, uma mulher de fibra, personalidade forte e extremamente inteligente; Lucas Machado, meu “pequeno irmãozinho”, cada vez mais inteligente e perspicaz; Roberta “Beta” Benzaquen, a brilhante “sábia do santuário”, sempre carinhosa e atenciosa.

Não poderia deixar de citar também aqueles que nos últimos tempos fizeram-se presentes em minha vida com seu carinho, amizade e companheirismo: Caio Lima, Leonardo Gomes “Xilesti”, Victor “Seth” Costa, Vladmir Pelousek, Alexandre Alonso, Diego “Anckii” Anckises, Silvio Campos, Mônica Campos, Yaçanã Torres, Bryan “DJEBA” Lima, e meu jovem aprendiz, Bruno Pinho, o “Takeno”.

Agradeço aos meus caros amigos da faculdade pelos bons e difíceis momentos que compartilhamos, todo o apoio que me foi dado e os desafios transpostos em conjunto. Os oito que me acompanharam desde o primeiro período, chegando juntos ao fim dessa jornada: Gustavo Viana e João Salvador, brincalhões como só eles sabem ser, que compartilham do meu objetivo da vida acadêmica, rumo ao mestrado e, um dia, ao magistério; Renan Fernandes, sábio e criativo, me ensinou lições muito valiosas para a vida toda; Beatriz Pamplona, “a multitarefa” cordial e dedicada, uma líder nata e grande engenheira; Leonardo Santos e Marcio Gabriel, com grande senso de responsabilidade e seriedade; Isabela Natal e Thiago Dultra, metódicos, disciplinados e eficientes, que se afastaram para poder se unir, mas desejo que sejam muito felizes juntos.

Agradeço à equipe do Laboratório de Aplicação de Supercondutores (LASUP), com quem trabalhei nos últimos três anos, sempre dispostos a ajudar, compartilhando experiências, conhecimentos, além de muita diversão nas horas vagas: Marcos Dantas (o “Pai”), Patrícia Coimbra, Ocione Machado, Alan Endalécio, Hugo Pelle, Guilherme Sotelo, Daniel Dias, Felipe Costa, Felipe Lessa, Richard Stephan, Éric de Souza, Marlon Graciliano, Sergio Andrade e Sr. Genésio. Agradecimento especial ao Felipe Sass, que, além de ser meu coorientador, ajudou em todos os momentos a executar todas as etapas deste projeto. Obrigado também ao aluno de IC do Guilherme Sotelo na UFF, Leonardo Andrade, que está desenvolvendo um trabalho complementar a este e me auxiliou nas etapas finais.

Muito obrigado ao grande mestre Rubens de Andrade Junior, com quem nos últimos três anos aprendi muito e que acompanhou de perto todos os meus passos desde o início da IC. Sempre muito atencioso e disposto a ajudar e ensinar, nunca deixou de prestar auxílio quando necessário. Excelente professor, com vasto conhecimento e experiência, porém humilde, uma rara virtude. Empolgado, bem humorado e criativo, a todo momento pronto para testar novas ideias. Mesmo eu não sendo um aluno exemplar, nunca deixou de confiar em mim e sempre me encorajou a seguir em frente. Não poderia ter um orientador melhor, o tenho como um exemplo a ser seguido.

A todos vocês que torceram por mim, confiaram na minha capacidade e acreditaram que eu não desistiria independente das dificuldades, me deram ânimo e motivação para sempre seguir em frente acreditando no futuro, vos dedico este pequeno trabalho.

E a jornada continua!

“Só sei que nada sei.”

Sócrates

Resumo

Em 2011 comemorou-se o centenário da descoberta do fenômeno da supercondutividade do mercúrio a temperaturas próximas ao zero absoluto, que abriu as portas para uma nova área de pesquisa. Um século depois, diversos materiais supercondutores a temperaturas críticas cada vez mais altas já foram desenvolvidos, bem como suas aplicações. Na última década, em especial, foram desenvolvidas as duas gerações de fitas supercondutoras, abrindo ainda mais o espectro de aplicações destes materiais graças a sua flexibilidade, permitindo o uso para construção de eletromagnets altamente potentes, cabeamentos, aplicações em proteção de sistemas de transmissão e até mesmo enrolamentos supercondutores para máquinas elétricas.

Neste cenário extremamente promissor, este trabalho visa caracterizar parâmetros elétricos de amostras de fitas supercondutoras de segunda geração, refrigeradas em nitrogênio líquido, de acordo com a incidência de diferentes intensidades de campos magnéticos, relacionando a corrente elétrica e a tensão sobre elas. Tal processo usa um eletromagneto para produzir as diferentes intensidades de campo sobre a amostra, uma fonte de corrente contínua e um nanovoltímetro para executar a medição, controlados por um programa em *Labview*, com interface gráfica amigável ao usuário, especialmente desenvolvido para tal, e uma rotina em *Matlab* para processar os dados oriundos dos ensaios.

Além da caracterização em si, espera-se através da experimentação de diversas metodologias, seja por mudanças no aspecto da montagem experimental ou alteração nos padrões de medição, aprimorar a técnica de caracterização já existente para que se consiga resultados mais precisos e confiáveis.

Sumário

1	Introdução	9
1.1	Objetivos	9
1.2	Trabalhos Anteriores	9
1.3	Motivação.....	10
1.4	Organização.....	10
2	Teoria	11
2.1	Supercondutividade	11
2.1.1	Histórico	11
2.1.2	Fitas Supercondutoras.....	16
2.1.3	Comportamento dos vórtices.....	16
2.1.4	Curva de caracterização a parâmetros normalizados ($E_{\text{norm}} \times J_{\text{norm}}$)	19
2.2	Medição de quatro pontas.....	20
3	Equipamentos e Metodologia	22
3.1	Fita Superpower 2G-HTS SCS4050	22
3.2	Equipamentos de contato e resfriamento	24
3.2.1	Primeira Topologia	24
3.2.2	Segunda Topologia	26
3.3	Equipamentos do eletromagneto	29
3.4	Equipamentos de medição e aquisição.....	30

3.4.1	Medição do campo magnético.....	30
3.4.2	Nanovoltímetro e fonte de corrente contínua da Fita 2G	32
3.4.3	Interface e placa de aquisição.....	34
3.4.4	Programa para controle e levantamento da curva VxI em <i>Labview</i>	34
3.4.5	Montagem dos Equipamentos	37
3.5	Ensaios.....	38
3.6	Rotina em <i>Matlab</i> para levantamento das curvas VxI.....	39
4	Resultados	41
4.1	Primeira Topologia	41
4.1.1	Sem campo magnético.....	41
4.1.2	Campo magnético de 100 mT	42
4.1.3	Campos magnéticos de 200 mT a 500 mT	43
4.1.4	Campo magnético de 600 mT	44
4.1.5	Campo magnético de 700 mT	45
4.1.6	Campo magnético de 800 mT	46
4.1.7	Campo magnético de 900 mT	47
4.1.8	Campo magnético de 1 T.....	48
4.1.9	Campo magnético de 1,1 T.....	48
4.1.10	Ensaios com <i>Field Cooling</i> (FC)	49
4.1.11	Ensaio destrutivo da fita 2G	50
4.1.12	Análise comparativa dos resultados	51

4.2	Segunda Topologia	53
4.2.1	Sem campo magnético	54
4.2.2	Campo magnético de 100 mT	58
4.2.3	Campo magnético de 200 mT	59
4.2.4	Campo magnético de 300 mT	61
4.2.5	Campo magnético de 400 mT	62
4.2.6	Campos magnéticos de 500 mT e 600 mT	63
4.2.7	Campos magnéticos de 700 mT e 800 mT	64
4.2.8	Análise comparativa dos resultados	64
4.3	Análise comparativa entre as topologias	66
5	Conclusões e Trabalhos Futuros.....	67
6	Referências Bibliográficas	69
7	Apêndices	71
7.1	Rotina em <i>Matlab</i> para construção dos gráficos	71
8	Anexos	74
8.1	Datasheet da Fita Superpower 2G-HTS SCS4050	74
8.2	Instruções de Soldagem da Fita	78
8.3	Datasheet do Kapton.....	79

Índice de Figuras

Figura 1 - Relação entre temperatura e campo magnético críticos em um supercondutor [14].....	12
Figura 2 - Relação entre temperatura e campo magnético críticos em um supercondutor do Tipo 2 [14].	13
Figura 3 - Diferença entre os comportamentos macroscópicos dos supercondutores tipo 1 e tipo 2 [14].	13
Figura 4 - Redes de Abrikosov [14].....	14
Figura 5 – Ação de forças sobre um fluxóide através de uma densidade corrente [12].	17
Figura 6 - Esboço da curva $\log(E) \times \log(J)$ para um supercondutor [13].	19
Figura 7 - Medição de quatro pontas em uma amostra de fita 2G.....	21
Figura 8 - Esquema em corte laminar da fita Superpower 2G-HTS SCS4050 (Referência: Anexo 8.1).	23
Figura 9 - Esquema da montagem (a) e vista explodida (b) da primeira topologia.....	25
Figura 10 - Montagem da primeira topologia fora do recipiente de nitrogênio líquido..	25
Figura 11 - Equipamentos da primeira topologia devidamente posicionados para a execução de um ensaio.	26
Figura 12 - Esquema da montagem (a) e vista explodida (b) da segunda topologia. ..	27
Figura 13 - Montagem da segunda topologia fora do recipiente de nitrogênio líquido.	28
Figura 14 - Fotografia da segunda topologia durante um ensaio.	28
Figura 15 - Conjunto do eletromagneto, fonte de corrente e <i>chiller</i> [13].	29
Figura 16- Relação entre campo medido e tensão medida.	31
Figura 17 – Detalhe da cordoalha de aço envolta em Kapton, que não perde a flexibilidade à temperatura do nitrogênio líquido.	32
Figura 18 - Fonte de corrente Agilent e nanovoltímetro Keithley.	33
Figura 19 - Gaiola de Faraday para blindar a emenda do cabo de medição.	33

Figura 20 - Placa de Aquisição e adaptador GPIB-USB Keithley KUSB-488B.	34
Figura 21 - Tela de Configuração do Sistema de Medidas de Curva VxI.	35
Figura 22 - Tela de Entrada de Dados do Sistema de Medidas de Curva VxI.	35
Figura 23 - Tela de Ensaio do Sistema de Medidas de Curva VxI.	36
Figura 24 - Exemplo de arquivo de texto entregue pelo Sistema de Medidas de Curva VxI.	37
Figura 25 – Esquemático ilustrando a montagem dos principais equipamentos.	37
Figura 26 – Exemplo de progressão dos pulsos de corrente no tempo.	38
Figura 27 - Adequação do intervalo de pontos ao ajuste da curva linearizada.	40
Figura 28 - Ensaios sem campo magnético da primeira topologia.	42
Figura 29 - Ensaios com campo magnético de 100 mT da primeira topologia.	43
Figura 30 - Ensaios com campos magnéticos de 200 mT a 500 mT da primeira topologia.	44
Figura 31 - Ensaios com campo magnético de 600 mT da primeira topologia.	45
Figura 32 - Ensaio com campo magnético de 700 mT da primeira topologia.	46
Figura 33 - Ensaios com campo magnético de 800 mT da primeira topologia.	47
Figura 34 - Ensaios com campo magnético de 900 mT da primeira topologia.	47
Figura 35 - Ensaios com campo magnético de 1 T da primeira topologia.	48
Figura 36 - Ensaios com campo magnético de 1,1 T da primeira topologia.	49
Figura 37 - Ensaios com FC de 1 T com aplicação de campo de 1 T e sem campo.	50
Figura 38 - Ensaio destrutivo da amostra.	51
Figura 39 - Relação entre I_c e campo magnético e entre n e campo magnético, respectivamente.	52
Figura 40 – Exemplo de aumento do intervalo entre os pulsos de corrente.	53
Figura 41 – Ensaios (a), (b) e (c) sem campo magnético da segunda topologia.	55
Figura 42 - Gráfico comparativo entre os ensaios sem campo (a), (b) e (c) da segunda topologia.	56
Figura 43 – Ensaios (d) e (e) sem campo magnético da segunda topologia.	57

Figura 44 - Gráfico comparativo entre os ensaios sem campo (a) a (e) da segunda topologia.....	57
Figura 45 – Ensaios (f) e (g) sem campo magnético da segunda topologia.	58
Figura 46 - Ensaios com campo magnético de 100 mT da segunda topologia.....	59
Figura 47 - Ensaios com campo magnético de 200 mT da segunda topologia.....	60
Figura 48 - Ensaios com campo magnético de 300 mT da segunda topologia.....	62
Figura 49 - Ensaios com campo magnético de 400 mT da segunda topologia.....	63
Figura 50 - Ensaios com campo magnético de 500 mT e 600 mT, respectivamente, da segunda topologia.	63
Figura 51 - Ensaios com campo magnético de 700 mT e 800 mT, respectivamente, da segunda topologia.	64
Figura 52 - Relação entre I_c e campo magnético e entre n e campo magnético, respectivamente.	65
Figura 53 – Comparativos da relação entre I_c e campo magnético e entre n e campo magnético nas duas topologias, respectivamente.	66

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Materiais supercondutores e suas temperaturas críticas [3].....	15
Tabela 2 - Intensidades de campo magnético em função da corrente do eletromagneto.	30
Tabela 3 - Tensão medida, corrente e campo para calibração do sensor Hall.	31
Tabela 4 – Características dos ensaios Sem Campo.....	41
Tabela 5 – Características dos ensaios com campo de 100 mT.	43
Tabela 6 – Características dos ensaios com campo de 200 mT a 500 mT.	43
Tabela 7 – Características dos ensaios com campo de 600 mT.	45
Tabela 8 – Características dos ensaios com campo de 700 mT.	45
Tabela 9 – Características dos ensaios com campo de 800 mT.	46
Tabela 10 – Características dos ensaios com campo de 900 mT.	47
Tabela 11 – Características dos ensaios com campo de 1000 mT.	48
Tabela 12 – Características dos ensaios com campo de 1100 mT.	49
Tabela 13 – Características dos ensaios em FC.....	49
Tabela 14 - Comparação entre os parâmetros da Fita 2G em FC e ZFC.....	50
Tabela 15 – Características do Ensaio Destrutivo da amostra.	50
Tabela 16 - Análise comparativa dos resultados dos ensaios na primeira topologia... ..	52
Tabela 17 - Características dos ensaios Sem Campo (a), (b) e (c).	55
Tabela 18 – Características dos ensaios Sem Campo (d) e (e).	56
Tabela 19 – Características dos ensaios Sem Campo (f) e (g).	58
Tabela 20 – Características dos ensaios com campo de 100 mT.	59
Tabela 21 – Características dos ensaios com campo de 200 mT.	60
Tabela 22 – Características dos ensaios com campo de 300 mT.	61
Tabela 23 – Características dos ensaios com campo de 400 mT.	62
Tabela 24 – Características dos ensaios com campo de 500 mT e 600 mT.	63
Tabela 25 – Características dos ensaios com campo de 700 mT e 800 mT.	64
Tabela 26 - Análise comparativa dos resultados dos ensaios na segunda topologia. ..	65

Siglas e Abreviaturas

H - Intensidade de Campo Magnético

B - Densidade de Campo Magnético

T_c - Temperatura Crítica

H_c - Campo Magnético Crítico

J_c - Densidade de Corrente Crítica

I_c - Corrente Crítica

V_c - Tensão Crítica

HTS - Supercondutores de Alta Temperatura Crítica

Fitas 2G - Fitas Supercondutoras de Segunda Geração

CC - Corrente Contínua

LASUP - Laboratório de Aplicações de Supercondutores

FC - Resfriamento de supercondutor na presença de campo magnético: *Field Cooling*

ZFC - Resfriamento de supercondutor sem presença de campo magnético: *Zero Field Cooling*

1 Introdução

Nesta sessão é feita uma introdução sobre os principais tópicos abordados por este trabalho, bem como os objetivos, motivações, contextualização através da menção de trabalhos anteriores neste mesmo contexto e um resumo básico da organização do texto.

1.1 Objetivos

Este trabalho tem por objetivo a caracterização de fitas supercondutoras de segunda geração (Fitas 2G) na presença de campos magnéticos induzidos por um eletromagneto, através da relação entre densidade de corrente elétrica normalizada em função da densidade crítica (J/J_c) e o campo elétrico (E) normalizado em função do campo elétrico crítico (E_c) associado à densidade crítica (E/E_c), de acordo com a equação (1.1):

$$\frac{E}{E_c} = \left(\frac{J}{J_c}\right)^n \quad (1.1)$$

Objetiva-se também encontrar uma relação entre a intensidade do campo magnético sobre amostras de um mesmo lote de Fita 2G, a densidade de corrente crítica J_c e o termo exponencial n da expressão anterior utilizando-se medidas de tensão × corrente (Curvas $V \times I$) em diferentes intensidades de campo. Além disso, variando-se os padrões de medição, seja alterando topologias de montagem ou detalhes da sequência de pulsos de corrente sobre a amostra, espera-se melhorar a metodologia de caracterização.

1.2 Trabalhos Anteriores

Nos últimos anos deu-se início à fabricação em escala industrial das fitas supercondutoras, em especial, a partir de 2005, as de segunda geração, foco deste trabalho. Destas destacam-se dois fabricantes: *American Superconductors* e a *SuperPower*, capazes de produzir quilômetros de Fitas 2G com grande qualidade [1].

Diversos estudos de aplicações para as Fitas 2G podem ser mencionados, como em mancais magnéticos [1], transmissão de energia elétrica [2], limitadores de corrente [3], veículos de levitação magnética (*Maglev*) [4], máquinas elétricas [5], eletromagnets de alto campo [6] e o armazenador de energia magnética supercondutor (*Superconducting Magnetic Energy Storage – SMES*) [7].

1.3 Motivação

Inserido nesse contexto, o *Laboratório de Aplicação de Supercondutores* (LASUP), visa ao aproveitamento desta tecnologia em franca expansão para o desenvolvimento de trabalhos nesta área, com especial aplicação a mancais magnéticos [1] [8] [9], máquinas elétricas, limitadores de corrente e o veículo de levitação magnética *Maglev Cobra* [10].

Com tantas possibilidades de aplicações em desenvolvimento, fica clara a necessidade de se conhecer o melhor possível as propriedades eletromagnéticas das Fitas 2G a fim de se garantir um melhor aproveitamento de seu potencial em projetos futuros.

1.4 Organização

Este trabalho está dividido em 8 sessões. Nesta primeira é feita a introdução com os objetivos traçados e motivações. Na segunda são apresentados os fundamentos teóricos. Na sessão 3 são discernidos os equipamentos, materiais e métodos. Na sessão 4 são apresentados os resultados da metodologia proposta na sessão 3, que serão discutidos e concluídos na sessão 5, assim como as propostas de trabalhos futuros. Na sessão 6 encontram-se as referências bibliográficas. Nas sessões 7 e 8 encontram-se o apêndice e os anexos, respectivamente.

2 Teoria

Nesta sessão serão apresentados os fundamentos teóricos que este projeto aborda, em especial, a respeito da supercondutividade. Começando pelo seu contexto histórico, depois tratando em maiores detalhes da aplicação na fabricação de fitas supercondutoras, um pouco sobre a teoria de comportamento de vórtices e sua caracterização pela curva $E \times J$. Em seguida, é explicado um pouco sobre o método de medição adotado no projeto, a medida de 4 pontas.

2.1 Supercondutividade

A supercondutividade é um fenômeno observado em baixas temperaturas em que a matéria subitamente muda algumas de suas propriedades físicas a partir de uma dada temperatura. Tal mudança justifica considerá-lo um novo estado da matéria, com características e propriedades próprias.

2.1.1 Histórico

Descoberto em 1911 por Heike Kamerlingh Onnes ao estudar a resistividade do mercúrio em baixas temperaturas [11], esperava-se que a resistividade do metal caísse linearmente com a diminuição da temperatura. No entanto, Onnes observou que a partir de 4,2 K, a resistividade do mercúrio caia abruptamente a valores imensuráveis, batizando o fenômeno de supercondutividade. Acreditava-se que o fenômeno só poderia ocorrer em substâncias puras, mas pesquisas posteriores revelaram sua manifestação em substâncias complexas inclusive [12]. Em 1913 descobriu-se a supercondutividade também no chumbo, em uma temperatura abaixo de 7,2K.

Em 1914, Onnes observou que o estado supercondutor deixava de existir quando o material era sujeito a um determinado campo magnético. Da mesma forma, verificou-se que também há uma densidade de corrente superficial que elimina o estado supercondutor. Assim, definem-se os três limites, ou valores críticos que delimitam o estado supercondutor de um material: a temperatura crítica (T_c), o campo magnético crítico (H_c) e a densidade de corrente crítica (J_c). Um dado material é supercondutor apenas se estiver abaixo desses três valores críticos simultaneamente. Os parâmetros T_c e H_c são características intrínsecas de cada material, que caracterizam os limites do estado supercondutor através do gráfico na Figura 1, a seguir, enquanto J_c depende do método de construção [13].

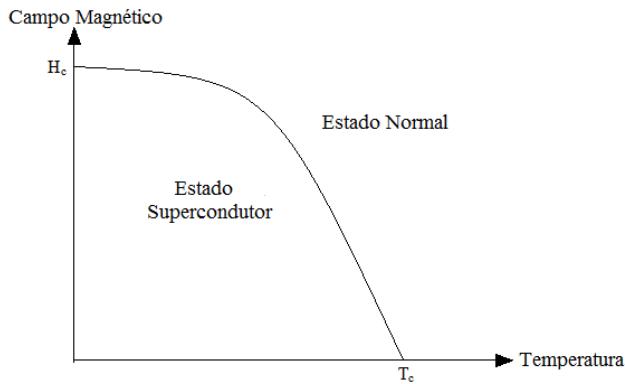


Figura 1 - Relação entre temperatura e campo magnético críticos em um supercondutor [14].

A partir de então, desenvolveram-se pesquisas objetivando-se obter outros materiais supercondutores, especialmente em temperaturas críticas mais elevadas, visto que a necessidade de se utilizar o hélio líquido, com temperatura de ebulição de 4 K, era uma barreira para sua aplicabilidade. Com isto, descobriu-se que grande parte dos metais são supercondutores abaixo de certa temperatura, e é notável que materiais que em temperatura ambiente são bons condutores, como o ouro, o cobre e a prata, não apresentam um estado supercondutor. Além dos metais, observou-se que ligas metálicas, como Nb_3Sn , descoberta em 1954, apresentam temperaturas críticas elevadas. Esta liga representou um avanço tecnológico significativo, uma vez que ela possui temperatura crítica da ordem de 18K e um valor de campo magnético crítico mais elevado [8].

Em 1933 W. Meissner e R. Ochsenfeld observaram que, quando em estado supercondutor, os materiais se tornam diamagnetos perfeitos, expelindo todo o fluxo magnético em seu interior. Tal propriedade foi batizada de Efeito Meissner [15], com o qual pode-se caracterizar os supercondutores em duas categorias: supercondutores Tipo I e supercondutores Tipo II.

Os supercondutores do tipo I, ou moles, englobam os primeiros materiais que apresentavam o fenômeno da supercondutividade, sendo em sua maioria elementos periódicos e ligas metálicas. Os supercondutores que se enquadram nessa categoria apresentam o Efeito Meissner puro e expulsam completamente o fluxo magnético de seu interior até um valor de campo magnético crítico. Os supercondutores do tipo II, ou duros, são em sua maioria compostos sintéticos, como a cerâmica $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$, conhecido como YBCO, que apresenta uma elevada temperatura crítica. Nesses tipos de supercondutores, há dois valores de campo magnético crítico. Abaixo de H_{c1} o supercondutor apresenta o Efeito

Meissner de forma plena e não há penetração de fluxo externo. Porém, entre H_{c1} e H_{c2} há uma penetração de parte do campo magnético externo, caracterizando um Estado Misto. Para campos magnéticos acima de H_{c2} , o material deixa o estado supercondutor. As Figuras 2 e 3, a seguir, apresentam, respectivamente, o diagrama de estados dos supercondutores do tipo II e a diferença entre os comportamentos macroscópicos dos supercondutores tipo 1 e tipo 2. Para os supercondutores tipo 2 o campo H_{c1} é muito baixo, de forma que eles transitam para o Estado Misto quase que instantaneamente ao atingirem temperaturas abaixo de T_c .

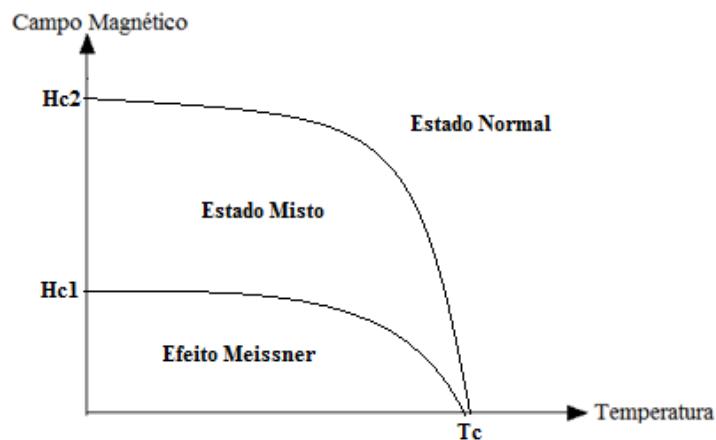


Figura 2 - Relação entre temperatura e campo magnético críticos em um supercondutor do Tipo 2 [14].

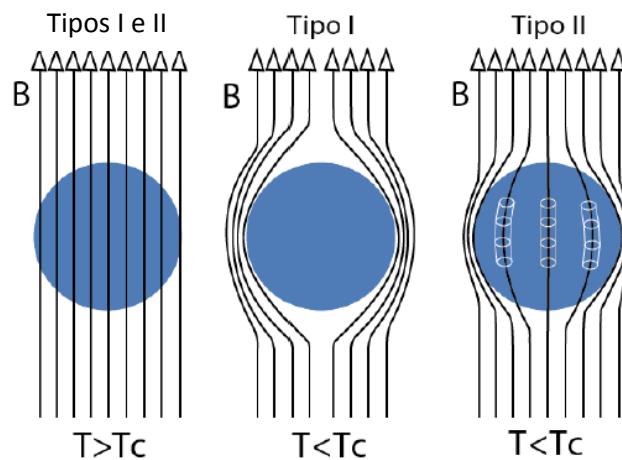


Figura 3 - Diferença entre os comportamentos macroscópicos dos supercondutores tipo 1 e tipo 2 [14].

Teorias desenvolvidas em 1935 por F. e H. London [16] e 1950 por V.L. Ginzburg e L.D. Landau [17] procuraram explicar as propriedades supercondutoras. Ambas são fenomenológicas, análises matemáticas dos acontecimentos observados em laboratório, mas,

ainda assim, são muito satisfatórias e usadas até hoje na descrição de supercondutores de alta temperatura crítica.

Em 1956 Leon Cooper [18] desenvolveu uma teoria sobre o fenômeno da supercondutividade a partir das leis fundamentais da física. A teoria de Cooper sugere que os elétrons responsáveis pela corrente superficial dos supercondutores organizam-se em pares, chamados Pares de Cooper, quando abaixo da temperatura crítica T_c [19].

Em 1957, John Bardeen, Cooper e Robert Schrieffer apresentam uma teoria microscópica que diz que existe uma diferença de energia entre os elétrons normais e os elétrons pareados que é uma característica intrínseca dos supercondutores e surge a partir da temperatura crítica, permitindo a formação dos elétrons pareados, responsáveis pela corrente superficial nos supercondutores. Essa teoria, conhecida como BCS, descreve muito bem o comportamento dos supercondutores metálicos, descobertos até a década de 80 do século 20. Abrikosov previu que, no Estado Misto, o supercondutor permite a penetração de parte do fluxo magnético externo de forma quantizada através de estruturas denominadas fluxóides, regiões normais no interior do supercondutor, circundadas por vórtices de correntes de blindagem [20]. A presença de um campo magnético externo promove o surgimento de correntes de blindagem na superfície do supercondutor do tipo II, fazendo com que os fluxóides estejam sujeitos à Força de Lorentz e assumam uma geometria dita triangular ou hexagonal. Tal geometria recebe o nome de Rede de Abrikosov, conforme a Figura 4, a seguir, e estão relacionados a fenômenos como chamado *flux creep*.

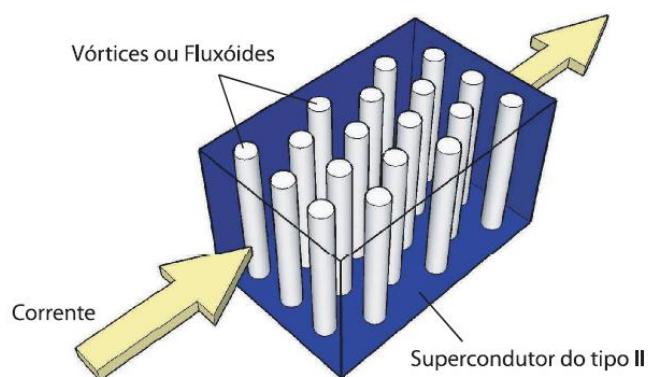


Figura 4 - Redes de Abrikosov [14].

Em 1962 Charles P. Bean propôs uma teoria fenomenológica em que uma corrente superficial J_c deve fluir pelo supercondutor variando da fronteira externa para o interior do

material com a variação do campo aplicado a ele. Esta teoria recebe o nome de Modelo do Estado Crítico e é uma modelagem que pode ser usada no cálculo de campos.

Apesar da existência de diversas teorias para o fenômeno da supercondutividade e de esse fenômeno ser conhecido por 100 anos, o fato dos materiais conhecidos apresentarem temperaturas críticas ainda muito baixas era um empecilho para o desenvolvimento de aplicações tecnológicas. A pesquisa e ampla utilização dos supercondutores só pode ser economicamente viável a partir de 1987 com a síntese dos supercondutores de alta temperatura crítica, como a cerâmica YBaCuO . A Tabela 1, a seguir, faz um resumo histórico das descobertas de materiais supercondutores e suas respectivas temperaturas críticas.

Tabela 1 - Materiais supercondutores e suas temperaturas críticas [3].

Materiais	Tc (K)	Ano
Hg	4,2	1911
Pb	7,2	1913
Nb	9,2	1930
$\text{NbN}_{0,96}$	15,2	1950
Nb_3Sn	18,1	1954
$\text{Nb}_3(\text{Al}_{0,75}\text{Ge}_{0,25})$	20-21	1966
Nb_3Ga	20,3	1971
Nb_3Ge	23,2	1973
$\text{Ba}_x\text{La}_{5-x}\text{Cu}_5\text{O}_y$	30-35	1986
$(\text{La}_{0,8}\text{Ba}_{0,11})_2\text{Cu}_{4-\delta}$ (1 GPa)	52	1986
$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$	95	1987
$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$	110	1988
$\text{Ti}_2\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$	125	1988
$\text{Ti}_2\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ (7 GPa)	131	1993
$\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8+\delta}$	133	1993
$\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8+\delta}$ (25 GPa)	155	1993
$\text{Hg}_{0,8}\text{Pb}_{0,2}\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$	133	1994
$\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8+\delta}$ (30 GPa)	164	1994
$\text{Hg}_{0,8}\text{Ti}_{0,2}\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8,33}$ (30 GPa)	138	1995
MgB_2	39	2001

2.1.2 Fitas Supercondutoras

Fitas supercondutoras são estruturas flexíveis compostas pela composição estratificada de vários componentes, como filamentos estruturais, ligas para melhoramento de contato elétrico e baixa resistividade, comportando em seu interior camadas de HTS. Devido às suas características mecânicas e elétricas, possuem inúmeras aplicações. Há duas gerações de fitas supercondutoras, conhecidas por Fitas 1G (BSCCO) e 2G (YBCO).

A primeira geração, a base de bismuto Bi-2223, tiveram início de sua produção industrial no período de 2000 a 2005, sendo estruturas multifilamentares inseridas em uma matriz de Ag/AgMg laminadas e tratadas termicamente. Devido ao alto custo da matriz de prata, que representa 70% do volume da fita, limitando a viabilidade da sua aplicação, ficou restrita a equipamentos de ressonância nuclear magnética, utilizadas na geração dos campos magnéticos intensos em grandes volumes, resfriados a nitrogênio líquido [21].

A segunda geração, a base de $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ Y-123, foi desenvolvida com camadas orientadas sobre um substrato metálico. Tal técnica de deposição, chamada “*reel-to-reel*”, ajudou no desenvolvimento de técnicas de fabricação em larga escala a custos reduzidos, consistindo, basicamente, de [3]:

1. Preparação do substrato metálico;
2. Preparação e adição das camadas buffer;
3. Preparação, adição do material HTS e tratamento térmico;
4. Preparação e adição das camadas estabilizantes, passivantes e isolantes.

Os materiais do substrato devem ser compatíveis química e termicamente com as das deposições intermediárias e com os processos de crescimento, a fim de otimizar o contato entre a superfície e o filme supercondutor.

2.1.3 Comportamento dos vórtices

Como mencionado anteriormente, os materiais supercondutores de segunda geração são dotados das Redes de Abrikosov, compostas por vórtices de corrente em torno de elementos de campo magnético (fluxóides) \mathbf{B}_F distribuídos pelo seu volume. Se, além destes vórtices, o supercondutor for permeado por uma densidade de corrente \mathbf{J}_s , a interação entre eles induzirá uma Força de Lorentz \mathbf{F}_L perpendicular à passagem de corrente, tendendo a mover a Rede de Abrikosov [13], de acordo com a equação (2.1), dissipando energia [13].

$$F_L = J_S \times B_F \quad (2.1)$$

Para impedir o movimento das redes, deve haver uma força de resistência a \mathbf{F}_R , de mesma magnitude e sentido oposto, \mathbf{F}_R . O arranjo deste sistema é ilustrado pela Figura 5, a seguir:

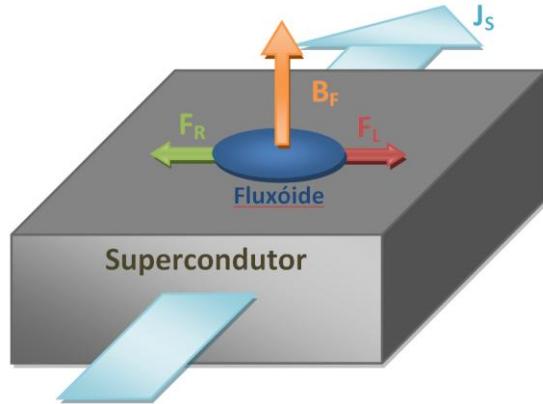


Figura 5 – Ação de forças sobre um fluxóide através de uma densidade corrente [12].

A força \mathbf{F}_R é proveniente do aprisionamento de fluxo (*pinning*) pela ação de impurezas, fronteiras de grãos ou poros, e na sua ausência, os vórtices se movem livremente, com velocidade v_d , induzindo uma força eletromotriz, segundo a equação (2.2) [13]:

$$\epsilon = - \frac{d\Phi_F}{dt} \quad (2.2)$$

Sendo Φ_F o fluxo magnético gerado pelo campo B_F do fluxóide. Equivalentemente, um campo elétrico é induzido, de acordo com a equação (2.3) [13]:

$$E_L = v_d \times B_F \quad (2.3)$$

A direção de \mathbf{E}_L é paralela à densidade de corrente, associando uma tensão elétrica ao movimento dos vórtices e à dissipação de energia. Apesar de não ser da mesma natureza resistiva de um condutor normal, a dissipação da energia necessária para mover os vórtices é também térmica, aumentando a temperatura do supercondutor e podendo levá-lo ao estado normal.

Neste contexto, define-se a densidade de corrente crítica J_c como a máxima densidade de corrente que um supercondutor pode transportar sem que haja movimento dos vórtices, sendo uma propriedade extrínseca do material, dependendo da forma como o elemento supercondutor é construído [13].

A Lei de Arrhenius propõe uma relação entre a velocidade de uma reação química com a temperatura e pode ser usada para descrever o campo elétrico $E(J)$ em função da energia de ativação $U(J)$, a mínima energia necessária para a ocorrência de uma reação. Aplicando-se a distribuição de Maxwell-Boltzmann é possível se determinar o percentual de moléculas com energia maior que a de ativação, de forma que a velocidade de uma reação química possa ser descrita pela equação (2.4) [21]:

$$v = A e^{\frac{-U}{kT}} \quad (2.4)$$

onde v é a velocidade da reação, U é a energia de ativação, k é a constante de Boltzmann, T é a temperatura e A é uma constante específica para cada reação química.

Para que os fluxóides se movam, eles também devem possuir uma energia de ativação (similar a reações químicas) que, nesse caso, é função da densidade de corrente, como descrito pela equação (2.5) [21]:

$$U(J) = U_c \ln\left(\frac{J_c}{J}\right) \quad (2.5)$$

onde U_c é o valor crítico da energia de ativação, J_c é o valor crítico da densidade de corrente específico de cada supercondutor e J é a densidade de corrente. Aplicando (2.5) à Lei de Arrhenius consegue-se a relação entre o campo elétrico e a energia de ativação (2.6) [21]:

$$E(J) = E_c e^{\frac{-U}{kT}} \quad (2.6)$$

onde E_c é o campo elétrico crítico do supercondutor, em que os fluxóides começam a se mover (definido experimentalmente como $0,1 \mu\text{V/mm}$) e significa o campo elétrico que surge quando o supercondutor é permeado por J_c . Substituindo-se (2.5) em (2.6), obtém-se a equação (2.7), que relaciona o campo elétrico à densidade de corrente crítica que flui sobre o supercondutor [21]:

$$E(J) = E_c \left(\frac{J}{J_c}\right)^n ; \quad \text{Tal que } n = \frac{U_c}{kT} \quad (2.7)$$

2.1.4 Curva de caracterização a parâmetros normalizados ($E_{\text{norm}} \times J_{\text{norm}}$)

Para a determinação do J_c , são adotados certos critérios de medição, baseando-se na resistividade ou no campo elétrico, sendo este segundo o mais comum [13], de forma que a equação (2.7) possa ser utilizada. Conforme uma densidade de corrente é aplicada ao supercondutor, o valor do campo elétrico induzido tende a aumentar, de forma que a corrente é dita crítica quando este atinge o valor de $1 \mu\text{V}/\text{cm}$.

Durante a medição, nota-se que o supercondutor passa por dois estágios diferentes até transitar completamente ao estado normal:

- *Flux creep*: Neste estágio o movimento dos vórtices é lento. A força induzida de Lorentz é de magnitude próxima à força de aprisionamento ($n \approx 20$ a 30).
- *Flux Flow*: A força gerada pela corrente é bem maior que a de aprisionamento, de forma que os vórtices se movam livremente pelo supercondutor ($n \approx 2$).
- *Normal*: Os vórtices já se dispersaram e não há mais Redes de Abrikosov. Assim o material não apresenta características supercondutoras e a curva $E \times J$ tem um aspecto linear ($n \approx 1$).

A Figura 6 a seguir mostra um esboço da curva $\log(E) \times \log(J)$ de um supercondutor:

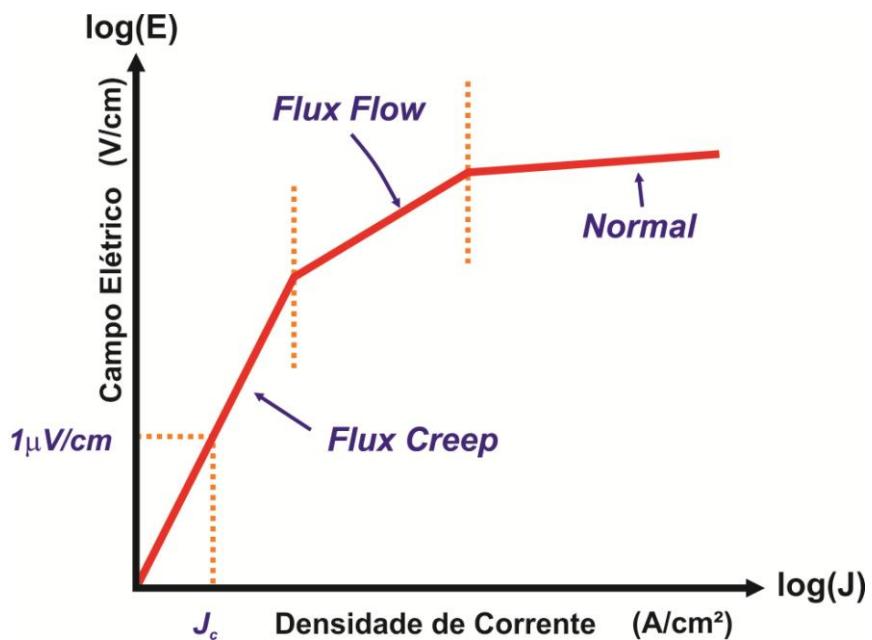


Figura 6 - Esboço da curva $\log(E) \times \log(J)$ para um supercondutor [13].

Se a equação (2.7) for manipulada algebraicamente, seus parâmetros podem ficar normalizados em função dos valores críticos, permitindo assim uma análise adimensional dos resultados, como em (2.8):

$$\frac{E(J)}{E_c} = \left(\frac{J}{J_c}\right)^n \quad (2.8)$$

Através de uma montagem experimental é possível fazer aquisição de valores de tensão e corrente sobre uma amostra de fita 2G, de forma a organizá-los em uma relação de tensão \times corrente. Sabendo-se o campo elétrico crítico padrão de $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ e o comprimento de fita aferida, é possível determinar a tensão crítica de uma dada amostra, assim como sua corrente crítica associada. Aplicando esses valores à relação de tensão \times corrente, tem-se uma curva de *tensão normalizada \times corrente normalizada*, como em (2.9), igualmente adimensional, assim como (2.8), permitindo assim uma equivalência direta entre as duas relações e à caracterização de uma amostra de fita 2G:

$$\frac{V(I)}{V_c} = \left(\frac{I}{I_c}\right)^n \quad (2.9)$$

2.2 Medição de quatro pontas

A técnica de medição de 4 pontas, usada principalmente na caracterização de resistência de malhas, superfícies e aterramentos, consiste na medição independente de tensão e corrente sobre um mesmo elemento. Sua aplicabilidade na identificação de pequenas resistências vem do fato de não haver injeção de corrente pelos terminais de medição de tensão, de forma que sua própria resistência não interfira no resultado.

Para execução deste tipo de medida é necessário o uso de quatro contatos dispostos colinearmente: os contatos mais externos são ligados à fonte de corrente, e os internos a um voltímetro, como exemplificado pela Figura 7, a seguir. Como a resistência de um voltímetro é muito maior que a entre os terminais medidos, não há praticamente nenhum desvio de corrente do elemento aferido para o equipamento, de forma que toda a diferença de potencial entre os terminais seja referente à perda ôhmica no elemento.

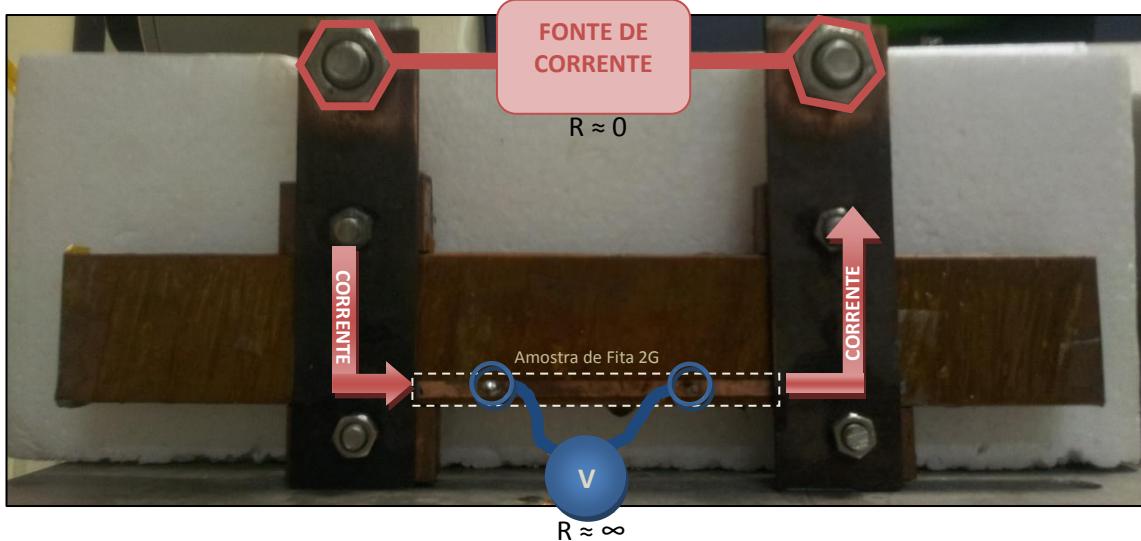


Figura 7 - Medição de quatro pontas em uma amostra de fita 2G.

Este tipo de montagem é essencial para um trabalho de caracterização como este, visto que as amostras de fita 2G, quando em estado supercondutor, possuem resistividade praticamente nula, e só expressam diferença de potencial significativa (da ordem de $\mu\text{V}/\text{mm}$) entre dois pontos quando submetidas a correntes da ordem de dezenas, e até centena, de ampères.

3 Equipamentos e Metodologia

Nesta sessão serão descritos detalhadamente os equipamentos utilizados, bem como a forma de que foram utilizados para atender as necessidades e atingir os resultados desejados.

As medições foram feitas através de três conjuntos de equipamentos: os de contato e resfriamento, os do eletromagneto e os de medição e aquisição. A fita supercondutora foi afixada em um suporte, suas pontas foram soldadas em terminais elétricos ligados à fonte de corrente contínua, e em dois pontos centralizados nela foram soldados os terminais de medição de um nanovoltímetro, formando uma medida de quatro pontas. Este conjunto é imerso em um recipiente com nitrogênio líquido e posicionado entre as peças polares do eletromagneto que produz diferentes intensidades de campo magnético. O posicionamento se dá de forma que o campo incida em direção normal à fita. Este é controlado por uma segunda fonte de corrente contínua, arrefecidos por um *chiller* a água. A aquisição dos dados e controle da fonte de corrente da fita e do nanovoltímetro é feito, através de uma placa de aquisição conectada ao computador, por um programa desenvolvido em *Labview* que faz a interface gráfica com o usuário. O programa entrega um arquivo de texto puro (.txt) com os dados de cada ensaio, que é então processado por uma rotina em *Matlab* que os apresenta de forma gráfica e calcula os parâmetros desejados.

3.1 Fita Superpower 2G-HTS SCS4050

As fitas supercondutoras da *Superpower* possuem um substrato de 50 μm de liga de níquel *Hasteloy C276*, escolhida pelas suas características ideais para processamentos a pequenas espessuras, resistência a altas temperaturas, expansão térmica compatível às camadas buffer e YBCO, alta resistividade e não-magnética. A empresa fabrica fitas com ou sem uma camada de cobre revestindo o conjunto. O modelo usado nesse trabalho, o SCS4050, possui uma camada dupla de cobre de 20 μm de espessura revestindo ambos os lados da fita, protegendo-a durante as fases de transição pela ótima condutibilidade térmica, isolando as camadas intermediárias do meio externo e oferecendo resistência mecânica. As características e composições das demais camadas são apresentadas a seguir [3]:

- Barreira de difusão de Al_2O_3 : Evita difusão dos metais do substrato para as camadas intermediárias;

- Camada de nucleação de Y_2O_3 (camada semente): Influencia o plano de orientação da “camada guia”;
- Camada guia de MgO: Introduz a simetria biaxial;
- Camada bufer de MgO homo-epitaxial: Melhora a textura para a deposição;
- Camada capa de $SrTiO_3$: Casa os reticulados de MgO com os reticulados de YBCO com boa compatibilidade química e protege a camada epitaxial de MgO;
- Supercondutor YBCO: passagem de corrente elétrica sem resistência;
- Camada de Ag: Escoa a corrente elétrica durante as transições, protegendo a camada de supercondutor.

O esquema estrutural da fita 2G da *Superpower* é mostrado na Figura 8 a seguir:

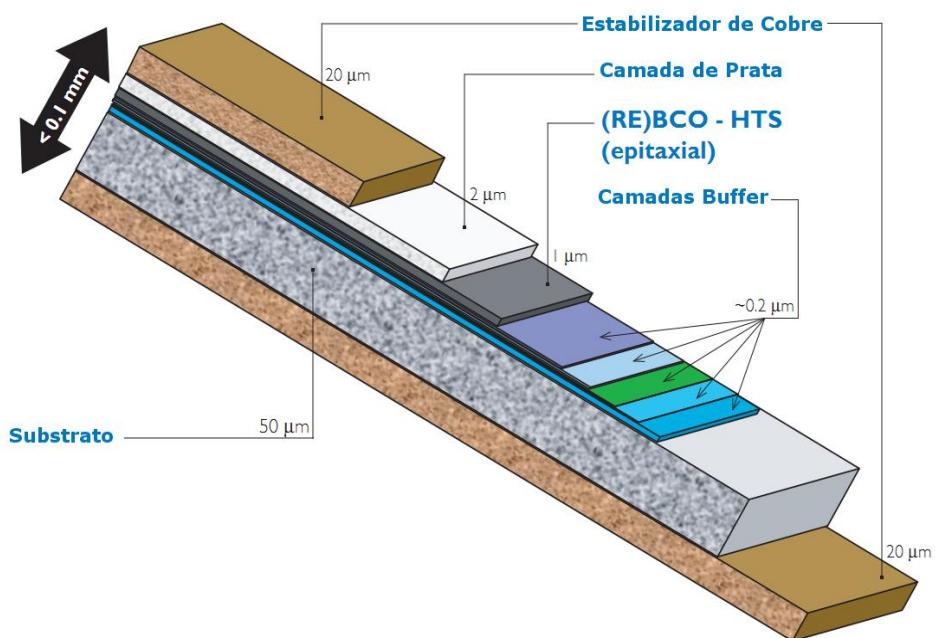


Figura 8 - Esquema em corte laminar da fita Superpower 2G-HTS SCS4050 (Referência: Anexo 8.1).

A estanhagem dos dois terminais da amostra é um procedimento delicado, visto que a fita não deve sofrer estresses mecânicos, como tensões e flexões em quaisquer direções, para não fraturar a camada supercondutora, diminuindo a qualidade e, consequentemente, o J_c da amostra. Além disso, para amenizar a oxidação da camada protetora de cobre, o que já ocorre naturalmente em contato com o ar úmido, é recomendável o uso de luvas de procedimento para manusear a amostra, evitando que gordura e suor da pele entrem em contato com ela.

O procedimento é de acordo com os passos descritos no Anexo 2, Instruções de Soldagem da Fita (*Soldering Instructions*, da Superpower). Recomenda-se que a estanhagem seja feita sempre no lado em que a camada supercondutora está mais próxima do cobre. Apesar de não haver distinção visível entre os lados da fita, o fabricante tem como padrão enrolar o carretel sempre com o lado supercondutor voltado para fora. Feita a seleção da amostra e demarcadas as regiões, usou-se um ferro de soldar de temperatura controlada em 200° C, visto que não é recomendável que a fita seja exposta por muito tempo a temperaturas superiores a 250° C. Usou-se uma solda de baixa temperatura de fusão, uma liga de Índio-Estanho a 48%In-52%Sn. Antes de aplicar a solda, a superfície é limpa com fluxo de solda Alpha260HF da *Cookson Electronics*, removendo partículas de óxido e demais impurezas e diminuindo o ponto de fusão da solda. A aplicação deve ser feita suavemente, preferencialmente usando-se uma ponteira chata no ferro, distribuindo-se a liga fundida o mais uniformemente possível ao longo da região, procurando-se também manter a camada fina.

3.2 Equipamentos de contato e resfriamento

Foram usadas duas topologias diferentes para este conjunto. A mudança se deu devido aos resultados obtidos primeiramente, que permitiu o levantamento de várias hipóteses de fatores de erro que poderiam causar alteração nos resultados, tais como problemas térmicos e contato elétrico ruim, discutidos nas Sessões 4 e 5.

3.2.1 Primeira Topologia

Nesta topologia o contato elétrico entre as regiões estanhadas da fita supercondutora é feito por pressão entre duas chapas de cobre aparafusadas a uma placa de polímero G10. A placa é então imersa em um recipiente, também de polímero G10, cheio de nitrogênio líquido. Nas Figuras 9, 10 e 11, a seguir, estão esquematizadas sua montagem e vista explodida, uma fotografia da montagem fora do recipiente de nitrogênio líquido e uma fotografia do ensaio pronto para ser executado, com os equipamentos devidamente posicionados, respectivamente.

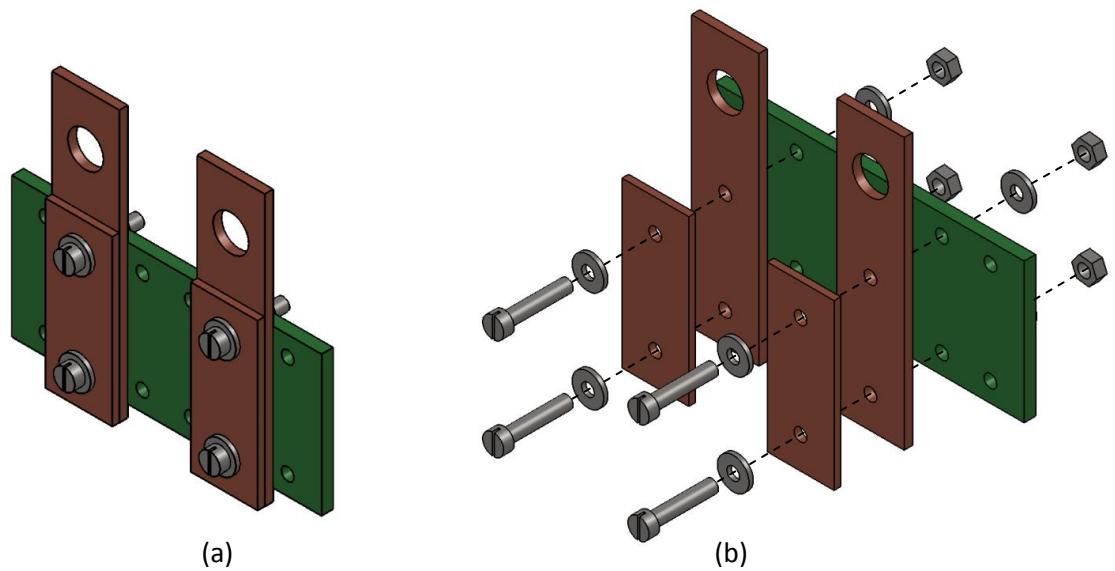


Figura 9 - Esquema da montagem (a) e vista explodida (b) da primeira topologia.

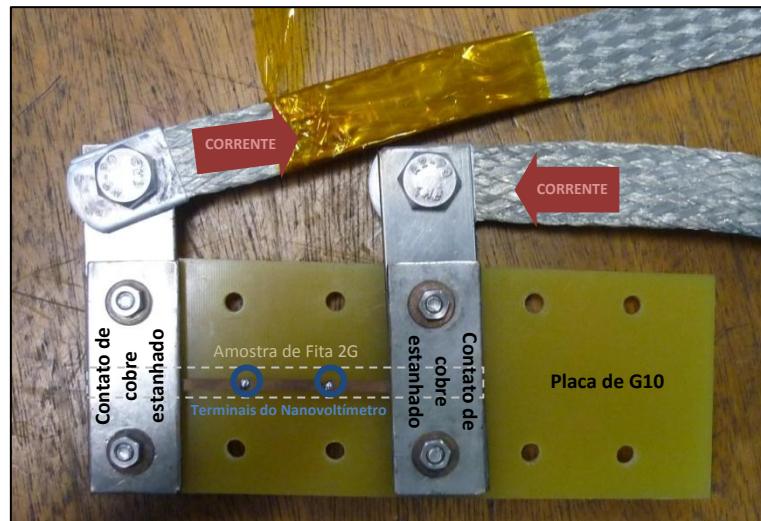


Figura 10 - Montagem da primeira topologia fora do recipiente de nitrogênio líquido

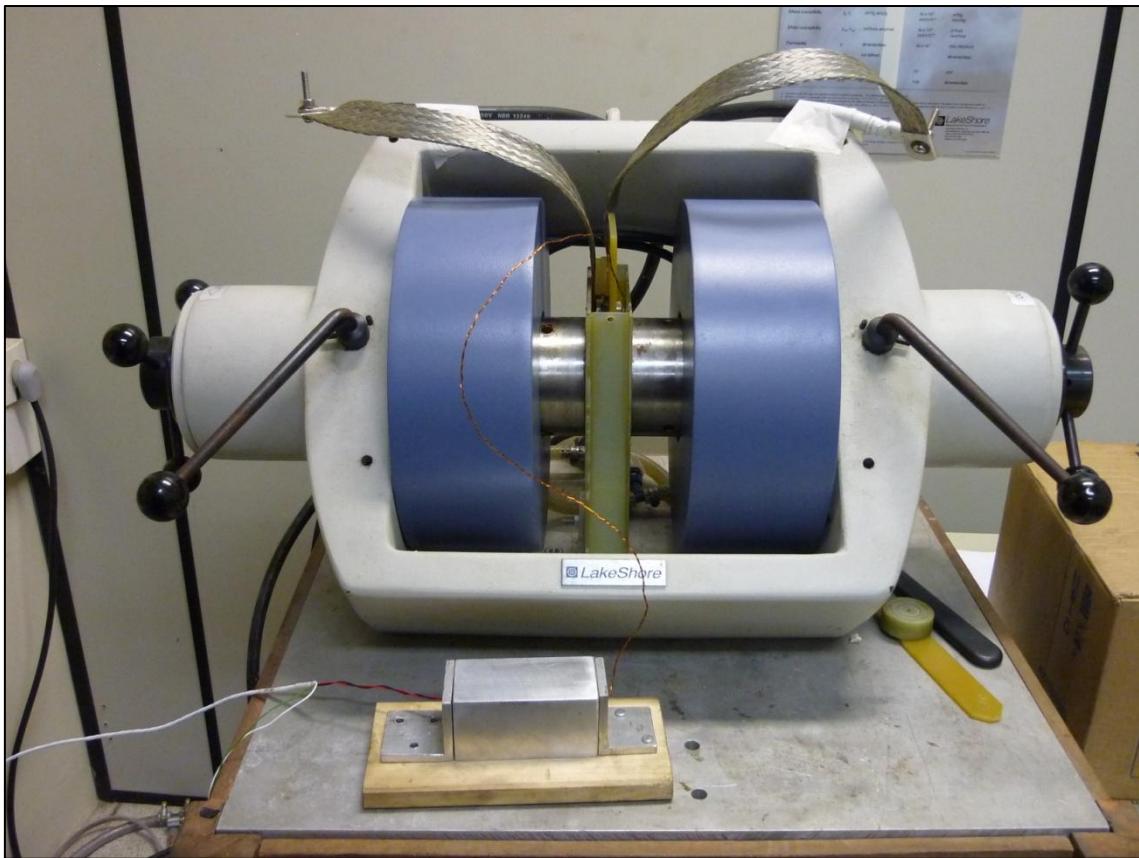


Figura 11 - Equipamentos da primeira topologia devidamente posicionados para a execução de um ensaio.

3.2.2 Segunda Topologia

Nesta topologia foram feitas modificações objetivando-se amenizar os possíveis fatores de erro. Primeiramente, o recipiente foi aumentado para comportar mais nitrogênio, evitando assim que o nível caia muito rapidamente, pondo a amostra em risco.

O suporte foi substituído de uma placa de G10 para uma barra de cobre, objetivando-se uma âncora térmica que mantenha a fita, quando conduzindo altas correntes, em baixas temperaturas. A barra é toda envolta em uma fina camada de material isolante Kapton, cujas características estão descritas no Anexo 3 (Datasheet do Kapton) para evitar que a corrente desvie através dela.

Para melhorar o contato elétrico entre a fita e o terminal de cobre, esta passou a ser soldada diretamente a ele, ao invés de somente pressionada. A soldagem é feita colocando-se as peças dos terminais num forno com temperatura controlada em 300° C por

aproximadamente uma hora. Quando cada peça é retirada, a parte previamente estanhada da fita é posicionada sobre o cobre quente, de forma que a película de Índio-Estanho novamente se funda e faça a junção entre a fita e o cobre. Este procedimento deve ser feito rapidamente, já que o gradiente de temperatura entre o forno e o ambiente faz com que ele se esfrie abaixo do ponto de fusão da solda rapidamente.

Objetivando-se minimizar o efeito termoelétrico nos terminais de medição do nanovoltímetro, garantiu-se a imersão do máximo possível do comprimento do cabo próximo aos terminais soldados à fita 2G.

A montagem final dessa nova topologia está esquematizada montada e em vista explodida na Figura 12, fora do recipiente de nitrogênio líquido na Figura 13 e é mostrada durante um ensaio, posicionada entre as peças polares do eletromagneto, na Figura 14, a seguir.

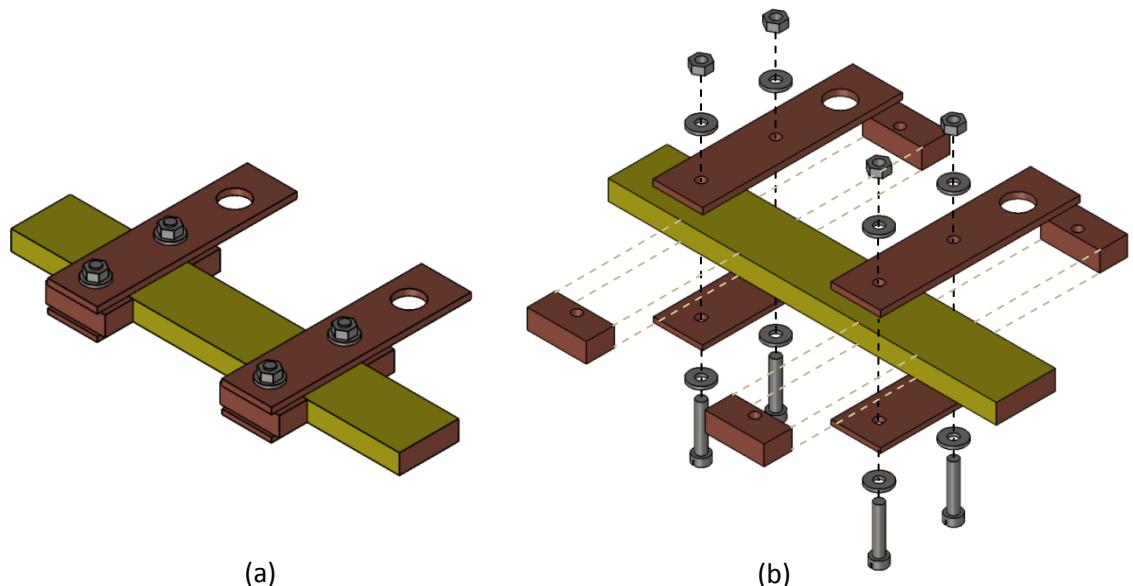


Figura 12 - Esquema da montagem (a) e vista explodida (b) da segunda topologia.



Figura 13 - Montagem da segunda topologia fora do recipiente de nitrogênio líquido.

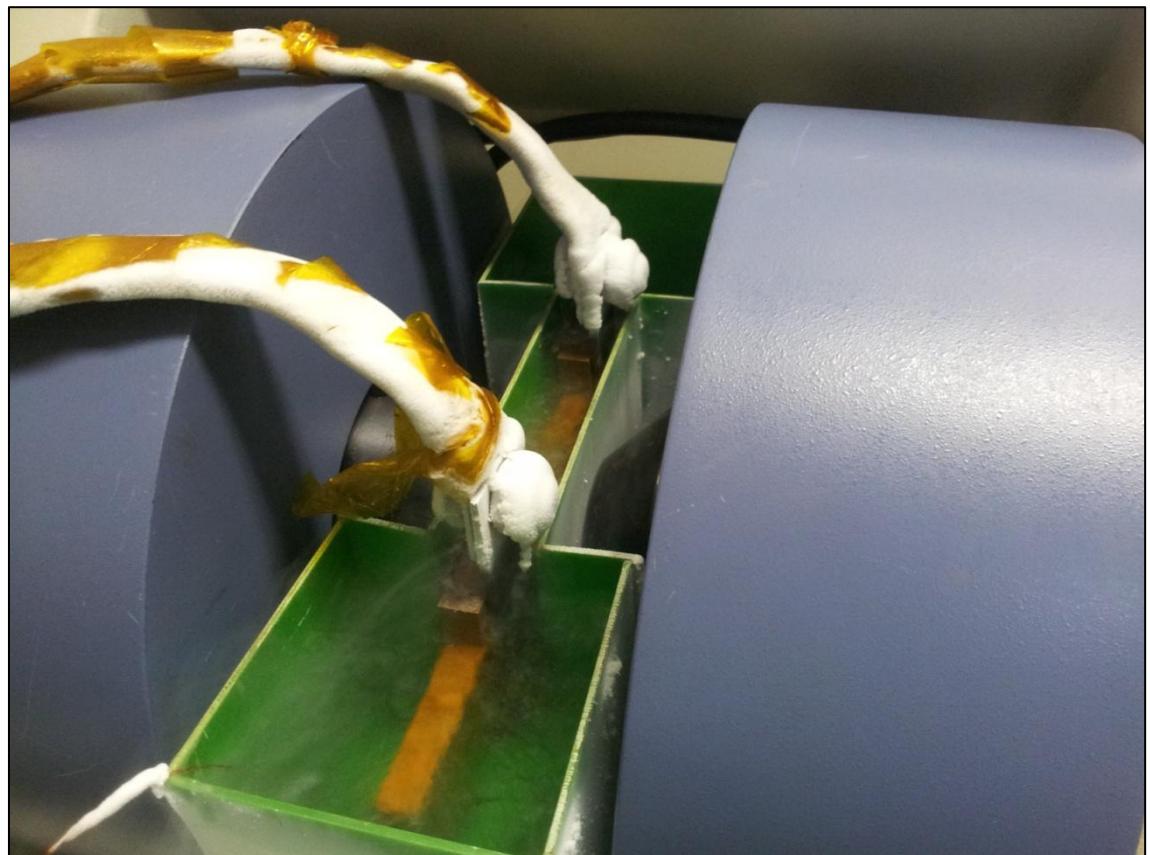


Figura 14 - Fotografia da segunda topologia durante um ensaio.

3.3 Equipamentos do eletromagneto

As diferentes intensidades de fluxo magnético usados para a caracterização da amostra foram obtidas a partir do eletromagneto Lakeshore EM1295, que é controlado pela fonte de corrente Lakeshore 662, de 70 A e 35 V CC máximos. Devido ao aquecimento pelas altas correntes envolvidas, o sistema é arrefecido por um *chiller* a água Thermo Neslab série Merlin M75. A Figura 15, a seguir, mostra a disposição destes equipamentos.

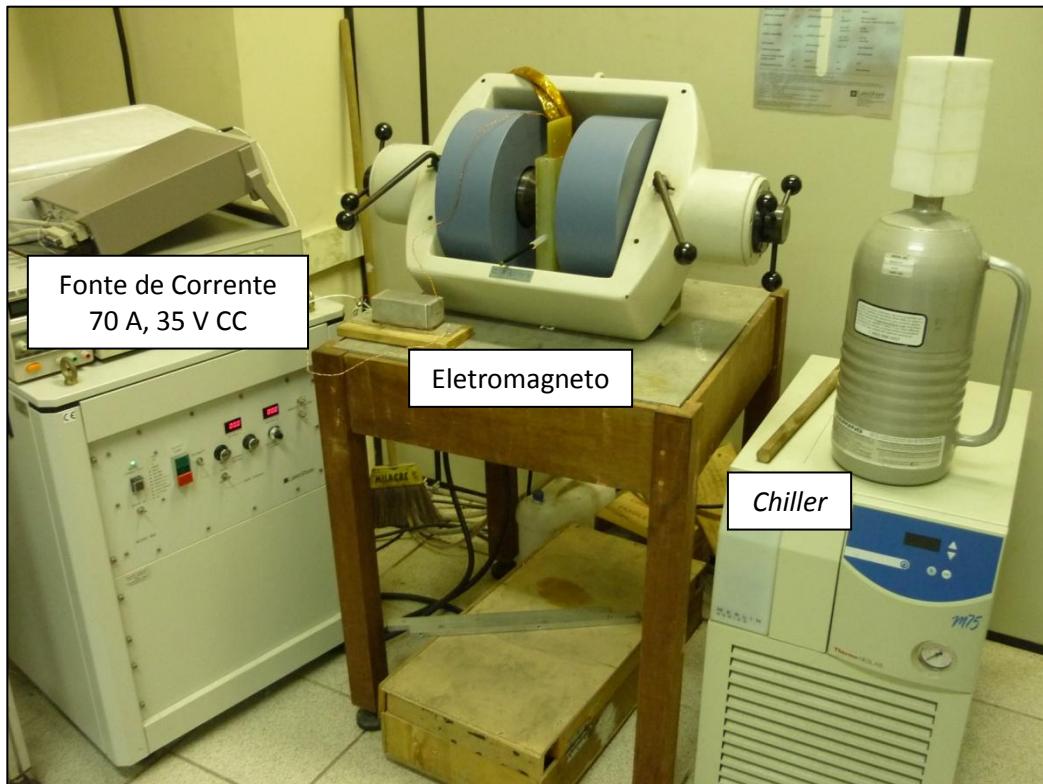


Figura 15 - Conjunto do eletromagneto, fonte de corrente e *chiller* [13].

O eletromagneto possui duas peças polares de uma liga de Ferro-Cobalto em formato de tronco de cone (face menor com diâmetro de 2"), que concatena e homogeneízam o fluxo magnético sobre a amostra, e comprimento de entreferro ajustável. O controle de intensidade de campo magnético é feito pelo controle manual da fonte de corrente associado a um instrumento de medida de intensidade de fluxo magnético (gaussímetro portátil ou aquisição com sensor de efeito Hall). Dessa forma é possível se estabelecer uma relação entre corrente e campo, mas vale ressaltar que para cada comprimento de entreferro a relação é diferente. Logo, cada vez que haja uma alteração no posicionamento das peças polares, uma nova bateria de medições deve ser realizada antes dos ensaios a fim de se averiguar os pontos

de interesse. Não é recomendável fazer a verificação durante o ensaio, visto que a imersão dos sensores em nitrogênio líquido pode alterar suas propriedades, causando erros de medição.

3.4 Equipamentos de medição e aquisição

3.4.1 Medição do campo magnético

Foram usados dois métodos diferentes para se fazer medição do campo magnético do eletromagneto. O primeiro foi através do gaussímetro portátil F. W. Bell 5080, que parou de funcionar, e foi substituído por um sistema de medição com sensor de efeito Hall.

Para fazer as primeiras medições, variou-se o controle de corrente da fonte do eletromagneto até medir os valores de campos desejados no gaussímetro, cuja ponteira estava posicionada na região central do entreferro de 36,5 mm do eletromagneto com peça polar de 2". As correntes necessárias para as intensidades de campos desejadas são mostradas na Tabela 2, a seguir:

Tabela 2 - Intensidades de campo magnético em função da corrente do eletromagneto.

Campo (mT)	Corrente (A)
100	4,5
200	8,9
300	13,6
400	18,1
500	22,6
600	27,1
700	31,8
800	37,6
900	44,6
1000	53,6
1100	67,8

O segundo grupo de medidas foi realizado através do sensor de efeito Hall CYSJ 106C da ChenYang Technologies em conjunto com um amplificador operacional INA 122, ligados à *protoboard* PRONT-O-LABOR PL-556K, parte integrante do Sistema de Mapeamento de Fluxo Magnético [14] do LASUP, e um multímetro HP 34401A. A constante de calibração do sensor foi obtida comparando-se os resultados, em volts, das medidas do sensor para as mesmas intensidades de campo e corrente obtidas com o gaussímetro para um entreferro de 36,5 de largura, da peça polar de 2" de diâmetro. Os valores de tensão dados pelo sensor, os de corrente medida pela fonte e os de campo associados, medidos com o gaussímetro, estão

disponíveis na Tabela 3, a seguir. A relação entre tensão e campo é mostrada no gráfico da Figura 16, também a seguir, onde se percebe a relação linear entre as grandezas.

Tabela 3 - Tensão medida, corrente e campo para calibração do sensor Hall.

Tensão (V)	Corrente (A)	Campo (mT)
0,545	4,5	100
1,099	8,9	200
1,667	13,6	300
2,222	18,1	400
2,757	22,6	500
3,271	27,1	600
3,828	31,8	700
4,352	37,6	800
4,859	44,6	900
5,334	53,6	1000
5,812	67,8	1100

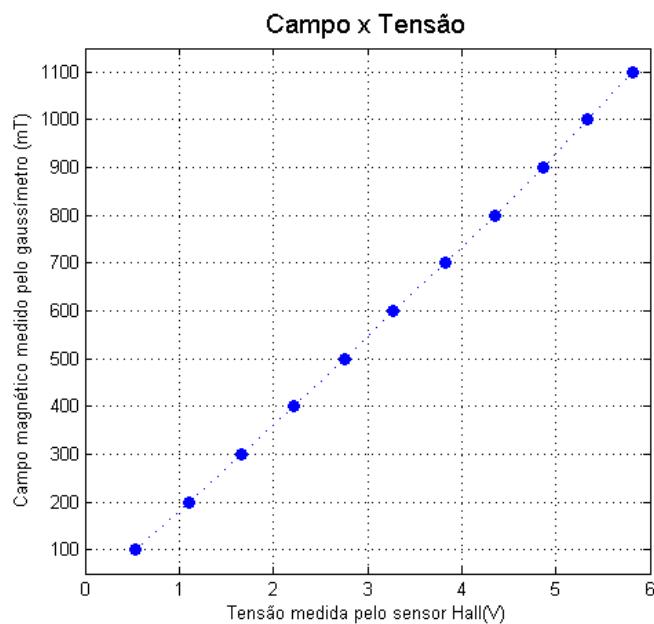


Figura 16- Relação entre campo medido e tensão medida.

Através da função *polyfit* (*V,B,1*) do *Matlab*, em que *V* é o vetor com os pontos de tensão medidos, *B* é o vetor de pontos de campo medidos e 1 é o grau do polinômio ajustado, obtém-se a constante de calibração do sensor Hall, de **188,8530 mT/V** em temperatura ambiente.

3.4.2 Nanovoltímetro e fonte de corrente contínua da Fita 2G

A alimentação da Fita 2G é feita através de uma fonte Agilent 6671A, ligada à rede elétrica em 220 V. Esta fonte possui saída CC de 8 V e 220 A máximos com alta regulação, baixo ruído e permite controle através de uma porta GPIB.

Para ligar a saída da fonte com os terminais de cobre presos à fita 2G foram usados dois cabos trifásicos isolados de $3 \times 4,0$ mm de diâmetro com as extremidades soldadas. A imersão de um cabo condutor convencional em nitrogênio líquido acarreta na perda de sua elasticidade e grande risco de fragmentação. Para resolver este inconveniente, entre a extremidade posterior dos cabos e os contatos de cobre soldados à fita 2G é usado um segmento com 0,50 m de comprimento e 21,0 mm de largura de cordoalha de aço, envolta em isolante Kapton, que não perdem sua flexibilidade quando resfriados em nitrogênio líquido. A Figura 17, a seguir, mostra os pedaços de cordoalha, envoltos em Kapton, usados.

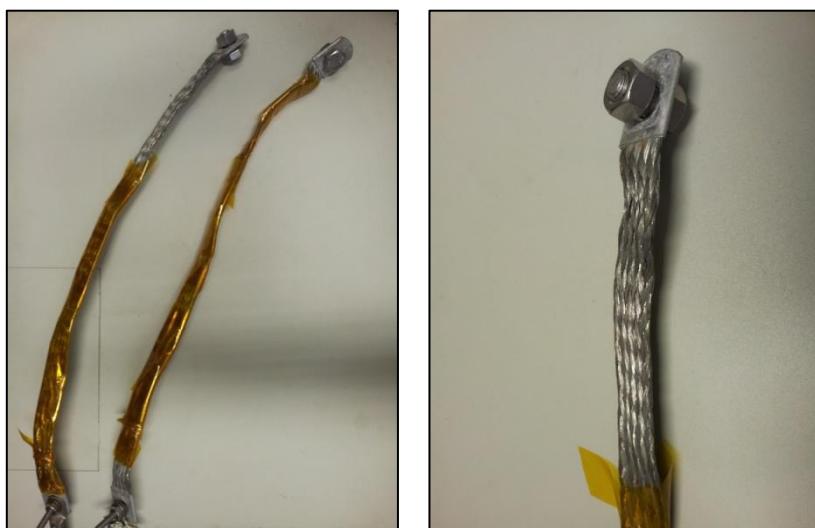


Figura 17 – Detalhe da cordoalha de aço envolta em Kapton, que não perde a flexibilidade à temperatura do nitrogênio líquido.

A aquisição dos valores de tensão foi feita através de um nanovoltímetro Keithley 2182A. Otimizado para caracterização de baixas resistências, com medições estáveis, rápida aquisição e baixo ruído, este tipo de equipamento se mostra ideal para o uso em supercondutores, onde a resistividade é praticamente nula e as variações de tensão que se deseja observar são da ordem dos nanovolts a microvolts. Também possui uma porta GPIB, usada no controle dos equipamentos. A fonte de corrente e o nanovoltímetro são mostrados na Figura 18 a seguir.



Figura 18 - Fonte de corrente Agilent e nanovoltímetro Keithley.

A distância entre os equipamentos e a amostra a ser analisada, a necessidade de se soldar os terminais de medição à fita 2G para garantir um contato elétrico o melhor possível, e o tipo de terminal de conexão da ponteira ao nanovoltímetro fizeram com que fosse necessária uma emenda entre o cabo original do aparelho e a amostra. O ideal, em termos de qualidade de medição, seria fazer um novo cabo inteiriço e blindado, mas o tipo de plugue incomum do aparelho associado ao risco de se danificar o cabo inviabilizou esta possibilidade. Ainda assim, numa tentativa de se minimizar os efeitos da emenda, esta foi enclausurada em uma caixa de alumínio ligada ao pino de aterramento na parte posterior do nanovoltímetro, como mostrado na Figura 19, a seguir. Por uma face da caixa entra o cabo do nanovoltímetro, em seu interior a emenda é feita sob pressão por arruelas e parafusos, e pela outra sai um par trançado de fio de cobre esmaltado de 0,65 mm de diâmetro cujos terminais são soldados à fita 2G, medindo a tensão no comprimento desejado.



Figura 19 - Gaiola de Faraday para blindar a emenda do cabo de medição.

3.4.3 Interface e placa de aquisição

A interface entre os equipamentos é toda feita através de um sistema GPIB (*General Purpose Interface Bus*). Também é conhecido por HP-IB, pela sua criadora *HP* na década de 1960, e, a partir de 1975, IEEE 488 Bus, após seu reconhecimento pela IEEE como *Interface Digital Padrão para Instrumentação Programável*. Possuindo 24 fios (8 para transferência bidirecional de sinal, 3 para *handshake*, 5 para gerenciamento de barramento e 8 para aterramento), este tipo de interface permite a comunicação em série de até 14 equipamentos através de um único barramento com um cabo de até 20 m de comprimento [22]. Nesta montagem estão conectados em série a fonte de corrente, o nanovoltímetro e a placa de aquisição Keithley KUSB-488B, que faz a conversão para a entrada USB do computador, mostrada na Figura 20, a seguir.



Figura 20 - Placa de Aquisição e adaptador GPIB-USB Keithley KUSB-488B.

3.4.4 Programa para controle e levantamento da curva V×I em *Labview*

Para fazer o controle dos equipamentos e aquisição de dados através da interface GPIB, o engenheiro Felipe Sass, M.Sc., criou um programa em *Labview* que permite a configuração dos parâmetros dos ensaios em três etapas:

1. **Configuração (Figura 21):** Nesta primeira etapa são definidos o número de pontos previstos para o ensaio (Número de Aquisições), a duração de cada pulso de aquisição (Intervalo Entre Aquisições), determinação do critério de parada (Campo Elétrico Máximo), Comprimento da Amostra e indicação da tensão máxima que interrompe o ensaio em função do critério de parada e comprimento da amostra fornecidos (Tensão Máxima na Amostra).

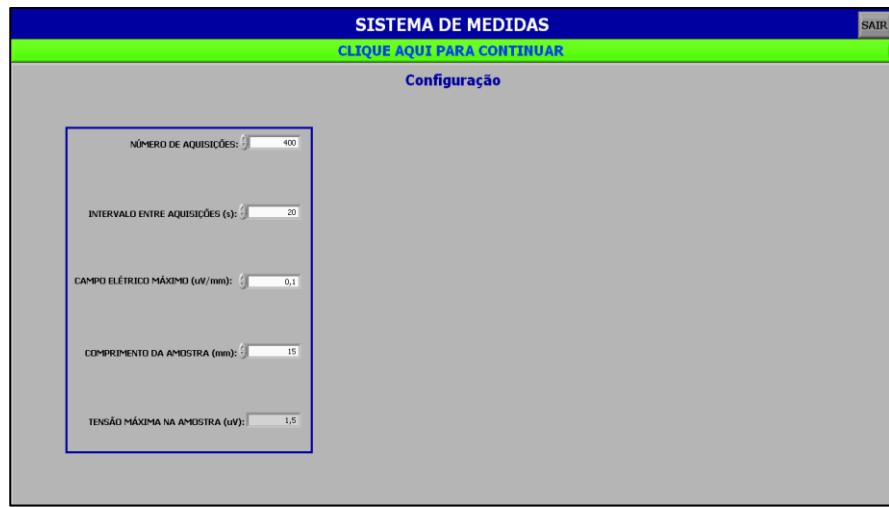


Figura 21 - Tela de Configuração do Sistema de Medidas de Curva Vxi.

2. **Entrada de Dados (Figura 22):** Na segunda etapa é programada a progressão do ensaio ao longo do intervalo de pontos definidos anteriormente. Nos campos Posição Inicial e Posição Final determina-se o intervalo de pontos aos quais será aplicada uma determinada seqüência de pulsos. Tal seqüência é especificada pelo número de intervalos nulos entre cada pulso de corrente diferente de zero (Incremento de Posição), a Corrente na Posição Inicial e o incremento de corrente a cada pulso (Variação de Corrente). Uma listagem à esquerda dos comandos indica os valores previstos de corrente para cada ponto e um gráfico abaixo dos comandos mostra a progressão dos valores de corrente no tempo em segundos, de acordo com o programado.

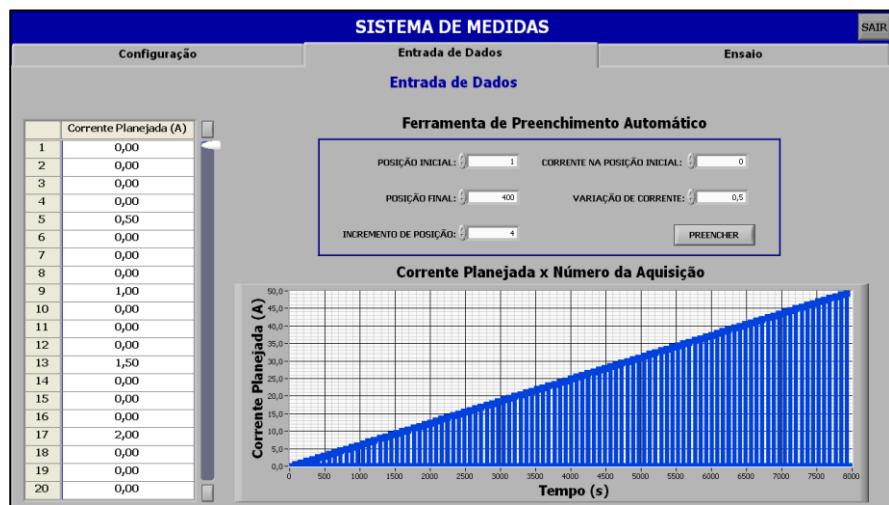


Figura 22 - Tela de Entrada de Dados do Sistema de Medidas de Curva Vxi.

3. **Ensaio (Figura 23):** Nesta última etapa, o comando Carregar Dados abre uma nova janela com a opção Carregar Dados do Programa, que insere a programação do ensaio na primeira coluna da listagem na metade superior da tela e o gráfico de evolução temporal no espaço inferior direito, similar à tela da segunda etapa. O botão verde (Iniciar Ensaio) dá início ao processo, começando pela tara do nanovoltímetro. Uma tarja vermelha com o comando “Interromper Ensaio” aparece na parte superior da tela neste momento, permitindo sua interrupção a qualquer instante. Conforme o ensaio progride, os valores de corrente prevista (A), corrente medida (A), tensão medida (V), instante da medição (ms) e data vão sendo completados na tabela em tempo real, bem como o levantamento dos pontos no gráfico Tensão × Corrente na parte inferior esquerda, e a progressão temporal em vermelho, sobrepondo-se à azul pré-existente, no gráfico inferior direito.

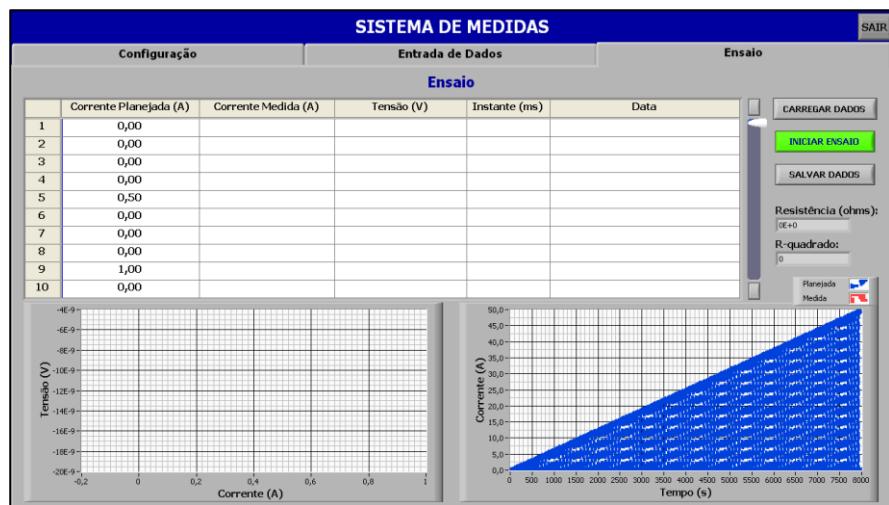


Figura 23 - Tela de Ensaio do Sistema de Medidas de Curva VxI.

4. Uma vez terminado o ensaio, seja por interrupção forçada, término da seqüência de pontos programada ou alcance do critério de parada, o programa entrega um arquivo de texto puro (.txt) contendo os resultados em cinco colunas: Corrente prevista (A), corrente medida (A), tensão medida (V), instante da medição (ms) e data, que pode ser salvo pelo botão Salvar Dados em um local e com nome à escolha do usuário. O arquivo de texto possui forma similar à indicada pela Figura 24, a seguir:

Figura 24 - Exemplo de arquivo de texto entregue pelo Sistema de Medidas de Curva Vxi.

3.4.5 Montagem dos Equipamentos

Para melhor ilustrar a montagem dos equipamentos do eletromagneto, medição, aquisição e controle do sistema, usa-se um desenho esquemático, mostrado na Figura 25, a seguir.

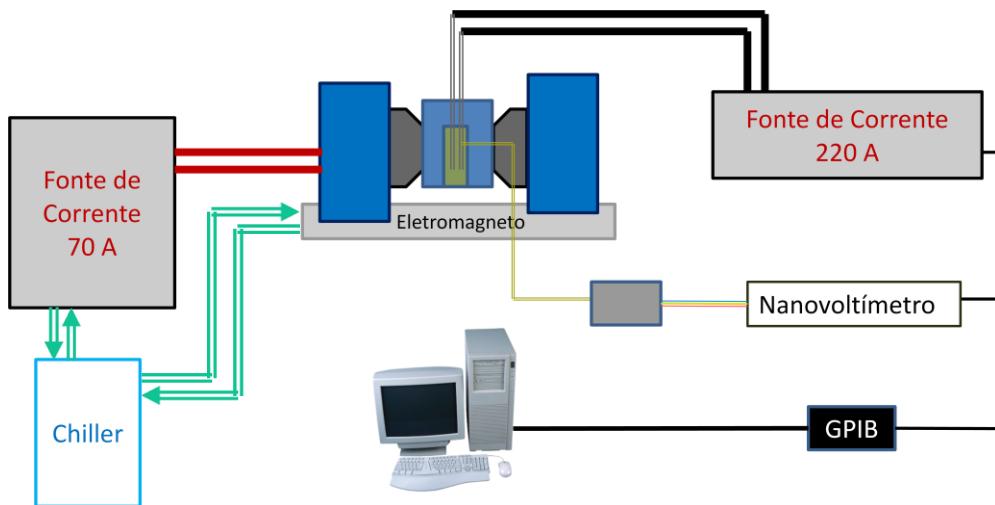


Figura 25 – Esquemático ilustrando a montagem dos principais equipamentos.

3.5 Ensaios

Foram realizados diversos ensaios controlados pelo programa em *Labview* objetivando o levantamento de curvas de tensão × corrente em várias amostras submetidas a intensidades predefinidas de campo magnético. Observou-se que, dentro dos limites da fonte de alimentação do eletromagneto, podia-se conseguir até 1,1 T com as peças polares de 2" e um entreferro de 36,5 mm de largura. A partir das medições de campo supracitadas, submeteu-se as amostras a desde campo nulo (com o recipiente fora do entreferro do eletromagneto, evitando-se a interferência de magnetismo residual das peças polares) até 1,1 T com incrementos de 100 mT.

A corrente circulante na fita 2G é controlada pelo programa, devendo ser em pulsos de largura e intervalos configurados pelo usuário. A corrente pulsada permite que seja possível a obtenção da progressão de seu comportamento elétrico ponto a ponto sem que a amostra seja submetida a um estresse térmico muito grande, que poderia comprometer sua qualidade em pouco tempo. Um exemplo da progressão no tempo dos pulsos de corrente é mostrado na Figura 26, a seguir.

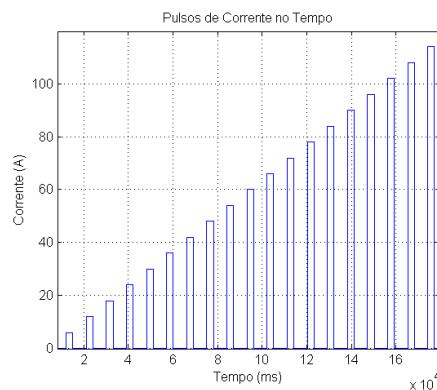


Figura 26 – Exemplo de progressão dos pulsos de corrente no tempo.

Buscando-se desenvolver uma rotina de ensaios ideal, minimizando possíveis interferências térmicas e conseguindo-se uma boa resolução das regiões de maior interesse, em que a amostra perde o estado supercondutor, prolongando o mínimo possível os ensaios, foram avaliados os resultados comparando também variações nos seguintes parâmetros de controle:

- Duração do pulso de corrente;
- Intervalo entre os pulsos de corrente (acomodação térmica);
- Taxa de variação da amplitude dos pulsos de corrente (refinamento);
- Número de pulsos por amplitude de corrente (repetibilidade);
- Critério de parada (ensaios de sobrecarga).

3.6 Rotina em *Matlab* para levantamento das curvas VxI

Para organizar os dados resultantes do ensaio de forma gráfica para posterior análise, foi desenvolvida uma rotina em *Matlab*, disponível no Apêndice, sessão 7.1, que faz a leitura do arquivo de texto, normaliza os dados e gera os gráficos.

Uma vez terminado o ensaio, o programa entrega um arquivo de texto puro (.txt) contendo os resultados em cinco colunas que estão em um formato incompatível com a sintaxe do *Matlab*. Os arquivos devem antes ser editados para tal, excluindo-se as colunas 1, 4 e 5. As colunas 2 e 3 são as únicas relevantes: São os valores de corrente medida (A) e tensão medida (V), respectivamente. Além disso, devem-se substituir as vírgulas dos valores por pontos, visto que esta é sintaxe do programa para separação decimal. Tais detalhes podem ser facilmente ajustados em *Microsoft Excell*.

A rotina processa os dados obtidos no ensaio para extrair deles os valores de corrente crítica (I_c), tensão em corrente crítica (V_c), fator exponencial n e, a partir deste último, traçar uma curva aproximada que rastreie os pontos do ensaio e caracterize a amostra através da equação exponencial (2.9), que se torna uma equação linear através da aplicação da função Logaritmo Natural aos seus dois membros em (3.2) e por Método de Mínimos Quadrados em (3.3):

$$\ln\left(\frac{V}{V_c}\right) = \ln\left(\frac{I}{I_c}\right)^n \quad (3.2)$$

$$\ln\left(\frac{V}{V_c}\right) = n \ln\left(\frac{I}{I_c}\right)$$

$$y = nx \quad (3.3)$$

A lógica da rotina se baseia nas seguintes etapas, que devem ser configuradas no próprio arquivo de comando (.m) quando necessário, antes de sua execução:

1. Indicação do diretório de alocação dos arquivos e designação dos arquivos a serem processados. A lógica da rotina é feita para que seja possível compor dois ensaios com níveis de refinamento diferentes em um mesmo gráfico. Quando se deseja que somente um arquivo seja processado, basta inseri-lo nos campos as duas vezes.
2. Arrumação da matriz com valores de corrente diferentes de zero, excetuando-se os pontos medidos durante os intervalos entre os pulsos de corrente;
3. Normalização da curva em função de tensão e corrente críticas. Para isso verifica-se qual o valor de I_c por interpolação com V_c (função *interp1*) pelo critério padrão de $E_c > 0,1 \mu\text{V/mm}$, equivalendo a $3,2 \mu\text{V}$ na primeira topologia e $5 \mu\text{V}$ na segunda;
4. Aplicação da função Logarítmico Natural aos pontos da parte crítica para que a função exponencial normalizada vire uma reta. Para a determinação deste intervalo, verificam-se quais pontos estão acima do limite condicional padrão de 0,3, mas pode ser reconfigurado se necessário. Quanto maior este valor, mais alto será o limite inferior do intervalo selecionado;
5. Plotagem da nova função linearizada sob a qual será feita a regressão linear. É uma forma de verificar se o intervalo de pontos definido anteriormente está adequado. Na Figura 27 a seguir é mostrado um exemplo de uma seleção adequada e uma inadequada de intervalo de pontos:

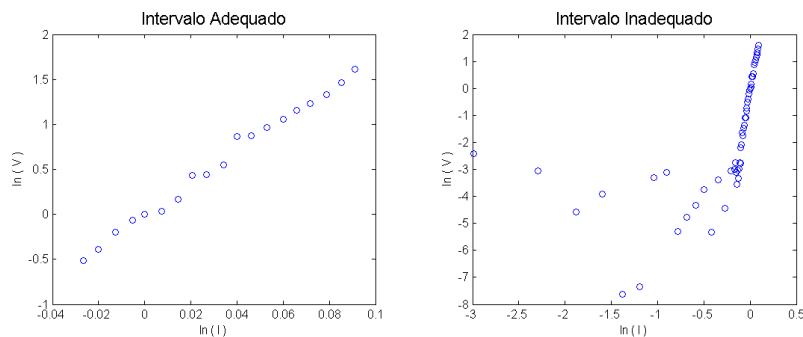


Figura 27 - Adequação do intervalo de pontos ao ajuste da curva linearizada.

6. Criação da função exponencial ajustada: $\frac{V}{V_c} = \left(\frac{I}{I_c}\right)^n$. Determina-se o termo n como sendo o coeficiente angular da equação da curva linearizada resultante da aplicação da função *polyfit* sobre ela;
7. Plotagem dos gráficos das curvas medida normalizada e curva ajustada. Os pontos azuis são as medidas e a curva vermelha é a ajustada.

4 Resultados

Nesta sessão serão apresentados e discutidos os resultados obtidos, totalizando 53 gráficos das 62 medições executadas, de acordo com a topologia de montagem. São 39 ensaios e 24 gráficos na primeira topologia e 23 ensaios e 27 gráficos na segunda.

4.1 Primeira Topologia

Foi usada uma única amostra nesta etapa, que tem 100 mm de comprimento total (os terminais estanhados da fita têm 32 mm de comprimento e há mais 32 mm de comprimento entre os terminais do nanovoltímetro) e os ensaios nesta topologia foram duplos: primeiramente com a amplitude da corrente aumentando desde zero, com incrementos entre 2 A e 10, A para se determinar qual é a ordem de grandeza da corrente crítica, em seguida aumentando desde um valor próximo a ela (em torno de 10 A menor) a incrementos entre 0,3 A e 0,6 A, resultando em uma medição mais refinada sobre a região crítica da amostra. A duração dos pulsos de corrente é de 3 s com intervalos de 6 s, com critério de tensão em corrente crítica de 3,2 μ V e o critério de parada é 1 μ V/cm, portanto, também aos 3,2 μ V. Exceto quando mencionado o contrário (Sessão 4.1.13), em todos os ensaios a amostra sofreu resfriamento sem presença de campo magnético ou ZFC (Zero Field Cooling).

4.1.1 Sem campo magnético

Os primeiros ensaios são sem presença de campo magnético e foram repetidos três vezes para garantir a confiabilidade e repetibilidade do método. Na Figura 28 a seguir estão os gráficos com os resultados obtidos. As características dos ensaios (a), (b) e (c) são mostradas na Tabela 4, a seguir.

Tabela 4 – Características dos ensaios Sem Campo.

Ensaio	Corrente (A)	Incremento (A)	$V_{\text{Parada}} (\mu\text{V})$
Sem Campo (a)	0 a 108	6	3,49
	110 a 119,6	0,4	
Sem Campo (b)	0 a 108	6	3,56
	110 a 116,8	0,4	
Sem Campo (c)	0 a 96	6	2,52
	100,2 a 116,4	0,2	

Os três foram bem similares, tendo o ensaio (a) a melhor curva aproximada. A diminuição na taxa de crescimento da corrente no ensaio (c) foi com intuito de dobrar a amostragem, mas injetou muito mais ruído na leitura, dificultando o processo de ajuste da curva aproximada. Apesar disso os valores do ensaio (c), embora estejam discrepantes dos ensaios (a) e (b), futuramente, com os ensaios da segunda topologia, se mostram os mais coerentes. É difícil dizer, no entanto, se isso é apenas uma coincidência ou é resultado da alta resolução, independente da aparência ruidosa.

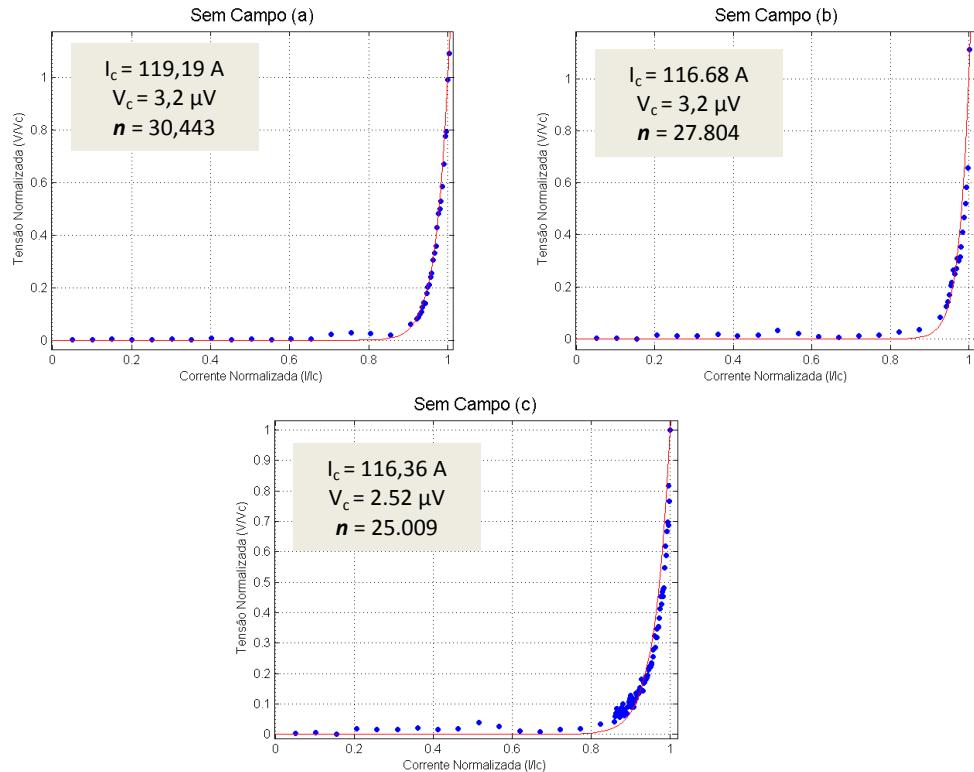


Figura 28 - Ensaios sem campo magnético da primeira topologia.

4.1.2 Campo magnético de 100 mT

O primeiro nível de campo magnético é em 100 mT. Na Figura 29 a seguir estão os gráficos com os resultados obtidos. Os dois foram quase idênticos. No ensaio (a) foram usados pulsos com incrementos de 6 A e 0,4 A e no ensaio (b) 6 A e 0,6 A, de acordo com a Tabela 5, a seguir. Percebe-se que a corrente crítica decai muito, a praticamente 60%, com a aplicação de campo.

Tabela 5 – Características dos ensaios com campo de 100 mT.

Ensaio	Corrente (A)	Incremento (A)	$V_{\text{Parada}} (\mu\text{V})$	$\Delta I_c (\text{A})$
100 mT (a)	0 a 66	6	3,32	42
	70 a 75,6	0,4		
100 mT (b)	0 a 66	6	3,31	42
	70 a 75,4	0,6		

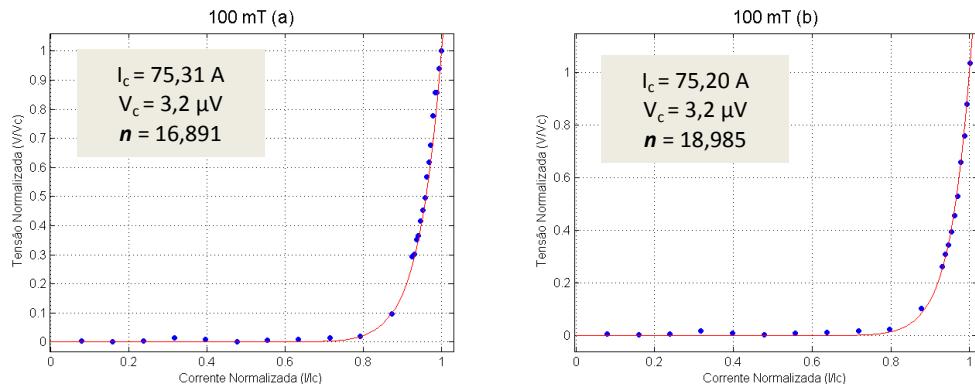


Figura 29 - Ensaios com campo magnético de 100 mT da primeira topologia.

4.1.3 Campos magnéticos de 200 mT a 500 mT

Para os campos magnéticos de 200 mT a 500 mT os resultados foram muito similares. Todos os ensaios usaram pulsos com incrementos de 3 A e 0,4 A, aumentando a resolução da zona de perda da supercondutividade. Na Figura 30, a seguir, estão os gráficos com os resultados obtidos nos ensaios descritos pela Tabela 6, também a seguir. Observa-se uma queda na corrente crítica de 10 A para 200 mT, 5 A para 300 mT, 4 A para 400 mT e 3 A para 500 mT.

Tabela 6 – Características dos ensaios com campo de 200 mT a 500 mT.

Ensaio	Corrente (A)	Incremento (A)	$V_{\text{Parada}} (\mu\text{V})$	$\Delta I_c (\text{A})$
200 mT	0 a 48	3	3,65	10
	50 a 64,8	0,4		
300 mT	0 a 42	3	4,16	5
	45 a 59,4	0,4		
400 mT	0 a 42	3	3,67	4
	45 a 55,8	0,4		
500 mT	0 a 42	3	3,21	3
	45 a 52,6	0,4		

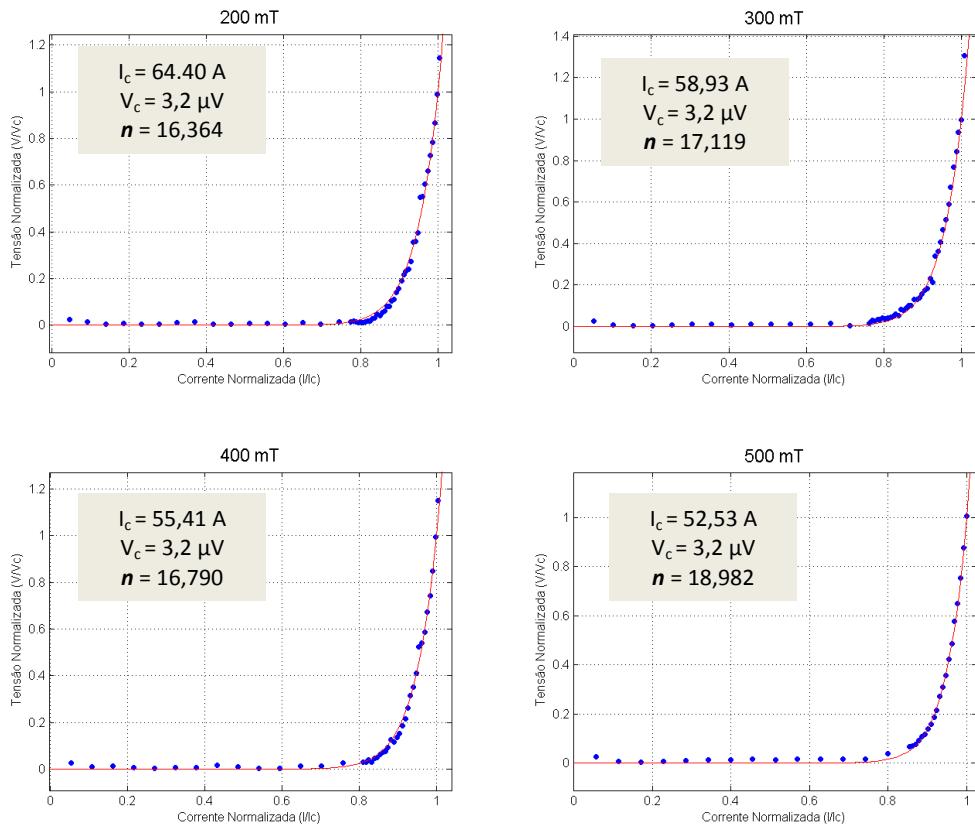


Figura 30 - Ensaios com campos magnéticos de 200 mT a 500 mT da primeira topologia.

4.1.4 Campo magnético de 600 mT

O sexto nível de campo magnético é em 600 mT. Na Figura 31 a seguir estão os gráficos com os resultados obtidos. Nestes ensaios foram usados pulsos com incrementos de 3 A e 0,4 A, como mostrado na Tabela 7, a seguir, mas no ensaio (a) o início do intervalo de refinamento ficou em uma corrente suficientemente alta (45 A) para não se ter resolução da região de início da grande inclinação característica do movimento de vórtices e, por isso, foi repetido o ensaio (b) com refinamento iniciado aos 40 A. Observa-se também que o fator n voltou a cair, mas continua acima do mínimo encontrado (17,119) com campo de 400 mT e uma queda na corrente crítica de cerca de 2 A.

Tabela 7 – Características dos ensaios com campo de 600 mT.

Ensaio	Corrente (A)	Incremento (A)	$V_{\text{Parada}} (\mu\text{V})$	$\Delta I_c (\text{A})$
600 mT (a)	0 a 42	3	3,56	2
	45 a 50,2	0,4		
600 mT (b)	0 a 39	3	3,38	2
	40 a 49,9	0,4		

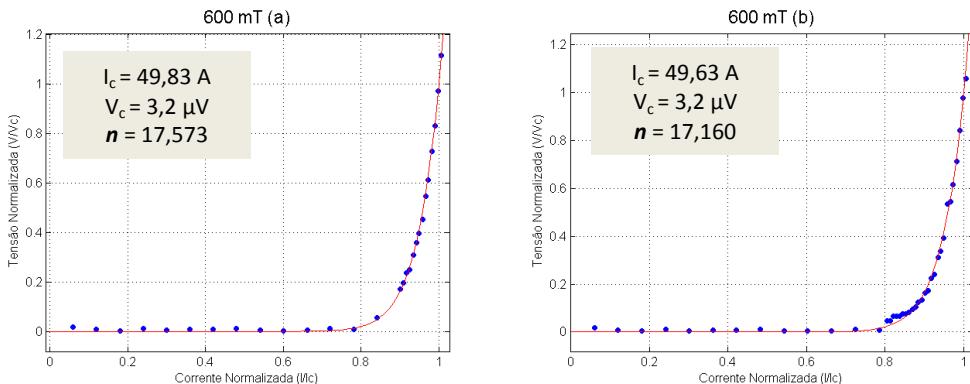


Figura 31 - Ensaios com campo magnético de 600 mT da primeira topologia.

4.1.5 Campo magnético de 700 mT

O sétimo nível de campo magnético é em 700 mT. Na Figura 32 a seguir está o gráfico com os resultados obtidos pelos ensaios descritos pela Tabela 8, também a seguir. Neste ensaio foram usados pulsos com incrementos de 3 A e 0,4 A. Observa-se uma queda na corrente crítica de cerca de 2 A.

Tabela 8 – Características dos ensaios com campo de 700 mT.

Ensaio	Corrente (A)	Incremento (A)	$V_{\text{Parada}} (\mu\text{V})$	$\Delta I_c (\text{A})$
700 mT	0 a 39	3	3,36	2
	40 a 48	0,4		

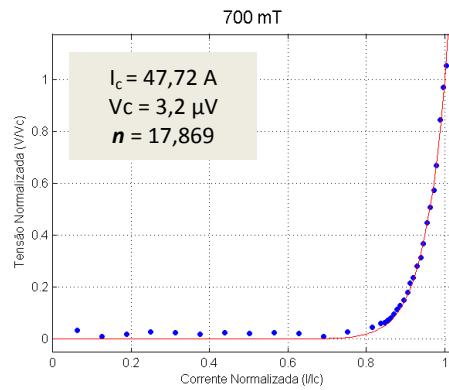


Figura 32 - Ensaio com campo magnético de 700 mT da primeira topologia.

4.1.6 Campo magnético de 800 mT

O oitavo nível de campo magnético é em 800 mT. Na Figura 33 a seguir estão os gráficos com os resultados obtidos pelos ensaios descritos pela Tabela 9, também a seguir. Nestes ensaios foram usados pulsos com incrementos de 3 A e 0,4 A, mas no ensaio (a) o início do intervalo de refinamento ficou em uma corrente suficientemente alta (40 A) para não se ter a resolução desejada da região de início da rampa característica da perda de supercondutividade e, por isso, foi repetido o ensaio (b) com refinamento iniciado aos 35 A. O resultado, no entanto, não foi melhor. O comportamento da curva não permitiu que se conseguisse fazer um ajuste coerente. Nem o valor encontrado para n nem o para I_c podem ser considerados confiáveis.

Tabela 9 – Características dos ensaios com campo de 800 mT.

Ensaio	Corrente (A)	Incremento (A)	$V_{\text{Parada}} (\mu\text{V})$	$\Delta I_c (\text{A})$
800 mT (a)	0 a 39	3	3,50	2
	40 a 45,6	0,4		
800 mT (b)	0 a 33	3	14,1	4
	35 a 42,9	0,4		

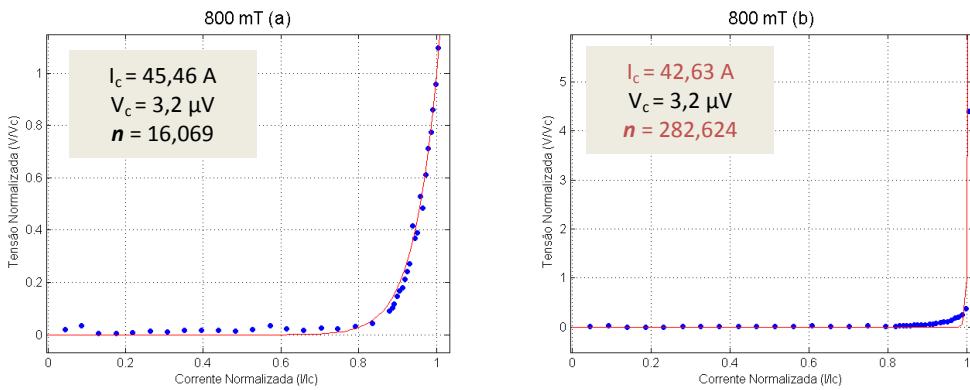


Figura 33 - Ensaios com campo magnético de 800 mT da primeira topologia.

4.1.7 Campo magnético de 900 mT

O nono nível de campo magnético é em 900 mT. Na Figura 34 a seguir está o gráfico com os resultados obtidos pelos ensaios descritos pela Tabela 10, também a seguir. Neste ensaio foram usados pulsos com incrementos de 3 A e 0,4 A, como mostrado na Tabela 10, também a seguir. Observa-se uma queda na corrente crítica de cerca de 2 A e um aumento no fator n .

Tabela 10 – Características dos ensaios com campo de 900 mT.

Ensaio	Corrente (A)	Incremento (A)	$V_{\text{Parada}} (\mu\text{V})$	$\Delta I_c (\text{A})$
900 mT	0 a 33 35 a 43,8	3 0,4	3,22	2

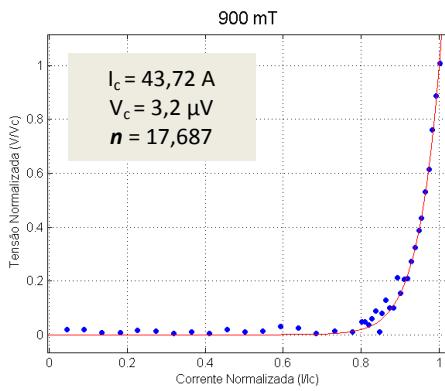


Figura 34 - Ensaios com campo magnético de 900 mT da primeira topologia.

4.1.8 Campo magnético de 1 T

O décimo nível de campo magnético é em 1 T. Na Tabela 11, a seguir, são descritos os ensaios e na Figura 35, também a seguir, estão os gráficos com os resultados obtidos. Nestes ensaios foram usados pulsos com incrementos de 3 A e 0,4 A, mas no ensaio (a) o início do intervalo de refinamento é a partir de 35 A e no ensaio (b) a partir de 30 A. A corrente crítica caiu cerca de 1 A e a diferença entre o fator n dos dois ensaios é notável.

Tabela 11 – Características dos ensaios com campo de 1000 mT.

Ensaio	Corrente (A)	Incremento (A)	$V_{\text{Parada}} (\mu\text{V})$	$\Delta I_c (\text{A})$
1000 mT (a)	0 a 33	3	3,28	1
	35 a 42,2	0,4		
1000 mT (b)	0 a 30	3	3,42	1
	30 a 42,6	0,4		

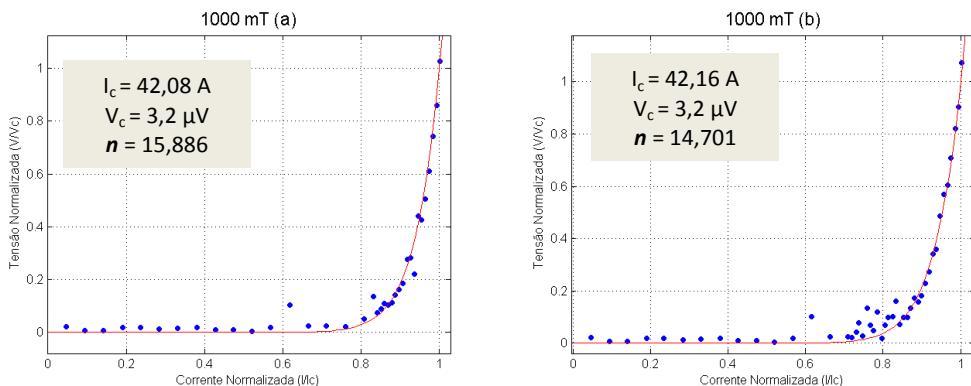


Figura 35 - Ensaios com campo magnético de 1 T da primeira topologia.

4.1.9 Campo magnético de 1,1 T

O último nível de campo magnético é em 1100 mT. Na Figura 36 a seguir está o gráfico com os resultados obtidos pelos ensaios descritos pela Tabela 12, também a seguir. Neste ensaio foram usados pulsos com incrementos de 3 A e 0,4 A. Observa-se uma queda de 2 A na corrente crítica e um grande aumento em n .

Tabela 12 – Características dos ensaios com campo de 1100 mT.

Ensaio	Corrente (A)	Incremento (A)	$V_{\text{Parada}} (\mu\text{V})$	$\Delta I_c (\text{A})$
1100 mT	0 a 33 35 a 43,8	3 0,4	3,22	2

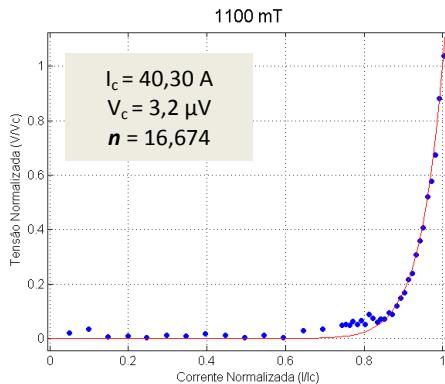


Figura 36 - Ensaios com campo magnético de 1,1 T da primeira topologia.

4.1.10 Ensaios com *Field Cooling* (FC)

Sabendo-se da influência do aprisionamento de campo pelas redes de Abrikosov, foram feitos dois ensaios em que a amostra foi resfriada na presença de campo magnético, objetivando verificar se a influência do campo aprisionado altera de alguma forma a corrente crítica da fita 2G. No primeiro foi aplicado um campo de 1 T durante o resfriamento da amostra, e mantido durante o ciclo de medição. Neste ensaio foram usados pulsos com incrementos de 2 A. No outro, o campo foi ligado para o resfriamento e então desligado na hora do ensaio. Neste ensaio foram usados pulsos com incrementos de 6 A. Os ensaios são descritos pela Tabela 13 a seguir, os resultados são mostrados na Figura 37 também a seguir, e pode-se observar pela Tabela 14, que a aplicação de campo antes ou depois do resfriamento não faz diferença para a corrente crítica. Não se pode dar certeza a cerca do termo n visto que sua estimativa nem sempre é coerente, mas o comportamento parece similar.

Tabela 13 – Características dos ensaios em FC.

Ensaio	Corrente (A)	Incremento (A)	$V_{\text{Parada}} (\mu\text{V})$
FC – Sem Campo	0 a 120	6	5,00
FC – 1000 mT	0 a 42	2	3,54

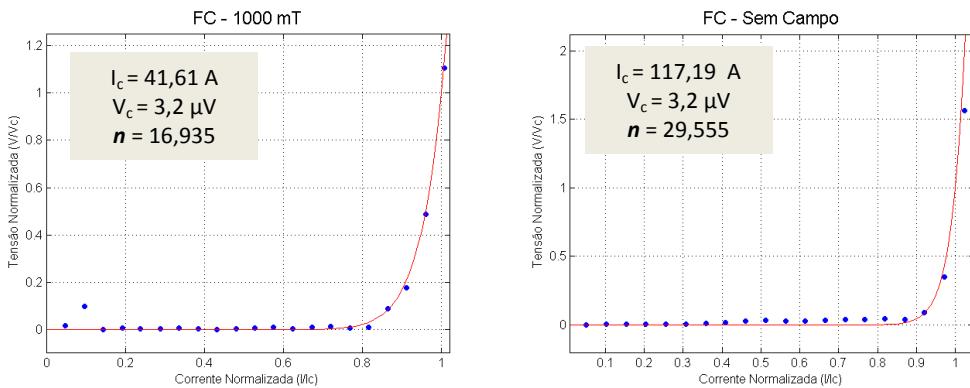


Figura 37 - Ensaios com FC de 1 T com aplicação de campo de 1 T e sem campo.

Tabela 14 - Comparação entre os parâmetros da Fita 2G em FC e ZFC.

	I _c (A)		n	
	FC	ZFC	FC	ZFC
0 T	117,19	119,19	29,555	30,443
1 T	41,61	42,12	16,935	15,120

4.1.11 Ensaio destrutivo da fita 2G

No último ensaio feito com esta topologia foi avaliado o comportamento da fita supercondutora até seu rompimento por superaquecimento. Isto é possível pela alteração do critério de parada do programa de $0,1 \mu\text{V}/\text{mm}$ para algum outro valor muitas ordens de grandeza maior (neste caso, foi usado $10^5 \mu\text{V}/\text{mm}$). Este ensaio foi feito sem a presença de campo magnético e foram usados pulsos com incrementos de 6 A até 110 A e com 1 A a partir de 110 A, como descrito pela Tabela 15, a seguir. O rompimento se deu em 160 A. Na Figura 38 a seguir estão os gráficos com os resultados obtidos, ambos para o mesmo ensaio. O gráfico (a) mostra todo o ensaio, e o (b) foca somente na zona de comportamento exponencial. É notável que após aproximadamente 150 V_c e $1,2 I_c$ a fita 2G não se comporte mais segundo o previsto pela curva aproximada, e é razoável que se presuma que a partir deste ponto ela comece a se deteriorar em virtude do esforço térmico após a perda do estado supercondutor.

Tabela 15 – Características do Ensaio Destrutivo da amostra.

Ensaio	Corrente (A)	Incremento (A)
Destrutivo	0 a 110	6
	110 a 160	1

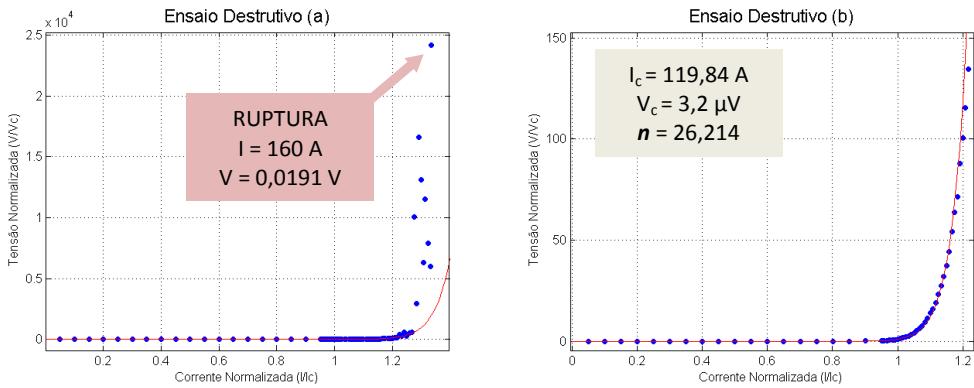


Figura 38 - Ensaio destrutivo da amostra.

4.1.12 Análise comparativa dos resultados

O levantamento das curvas e cálculo dos parâmetros em diferentes intensidades de campos magnéticos permite que seja feita uma comparação entre os dados, a fim de se chegar a relações que caracterizem as variações comportamentais da fita 2G. Os dois termos mais relevantes nesta análise são a corrente crítica I_c e o fator exponencial n de cada ensaio, dispostos na Tabela 16, a seguir, diretamente relacionados às intensidades de campos magnéticos associadas. Os valores assinalados em vermelho são os resultados não confiáveis e não é aconselhável considerá-los em análises posteriores.

Tabela 16 - Análise comparativa dos resultados dos ensaios na primeira topologia.

Ensaio	Campo (mT)	I_c (A)	n
a	0	119,19	30,443
b	0	116,68	37,804
c	0	116,36	25,009
FC	0	117,19	29,555
Destruutivo	0	119,84	26,214
a	100	75,31	16,891
b	100	75,20	18,985
-	200	64,40	16,364
-	300	58,93	17,119
-	400	55,41	16,790
-	500	52,53	18,982
a	600	49,83	17,573
b	600	49,63	17,160
-	700	47,72	17,869
a	800	45,46	16,069
b	800	42,63	282,624
-	900	43,72	17,687
a	1000	42,08	15,886
b	1000	42,16	14,701
FC	1000	41,61	16,935
-	1100	40,30	16,674

A partir dos dados da Tabela 16 anterior, é possível fazer um levantamento gráfico, a fim de se identificar mais facilmente relações diretas entre os dados. Os gráficos obtidos, relacionando I_c com campo magnético e n com campo magnético, respectivamente, estão dispostos na Figura 39, a seguir.

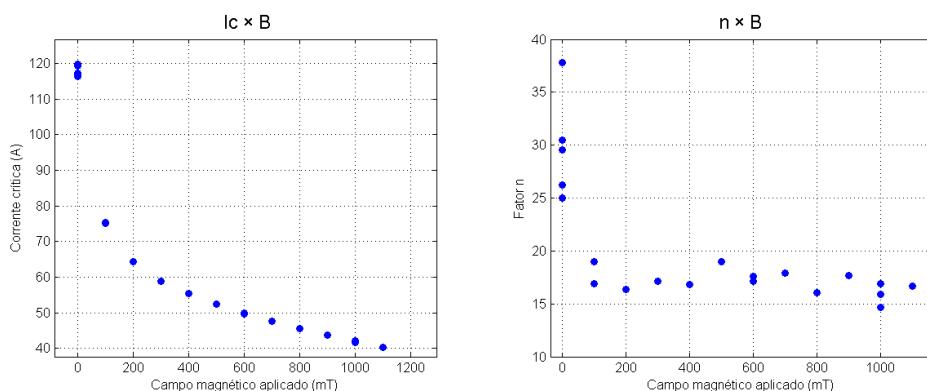


Figura 39 - Relação entre I_c e campo magnético e entre n e campo magnético, respectivamente.

Sobre I_c , é possível ver que existe uma relação bem definida entre a intensidade de campo aplicada sobre a amostra e a seu comportamento, mas no que diz respeito ao fator n , os resultados levam a inferir o mesmo, mas a clareza desta relação, bem como observada para I_c , é inalcançável devido a alta incerteza associada aos resultados. Como n tem uma dependência direta com a temperatura do supercondutor, uma forma de se tentar amenizar essas incertezas é garantir que a amostra esteja a uma temperatura fixa. Para isso foi implementada a âncora térmica de cobre na segunda topologia de montagem.

4.2 Segunda Topologia

Foram usadas duas amostras nesta etapa, uma para os ensaios sem campo e outra para os com campo. A mudança se deu devido à perda da qualidade da primeira amostra pela oxidação da camada de cobre por exposição ao tempo e pelo esforço térmico sofrido nos seus ensaios. Nesta topologia elas têm 150 mm de comprimento total, com 50 mm de comprimento entre os terminais do nanovoltímetro.

Com a mudança na montagem, diferentes ensaios sem campo foram executados com objetivo de validar a topologia comparando com os resultados anteriores. Testaram-se também alterações nas configurações de intervalo entre os pulsos de corrente com o objetivo de se verificar se, com um intervalo maior entre os pulsos de corrente, exemplificado pela Figura 40 a seguir, obtém-se uma acomodação térmica suficiente para melhorar os resultados.

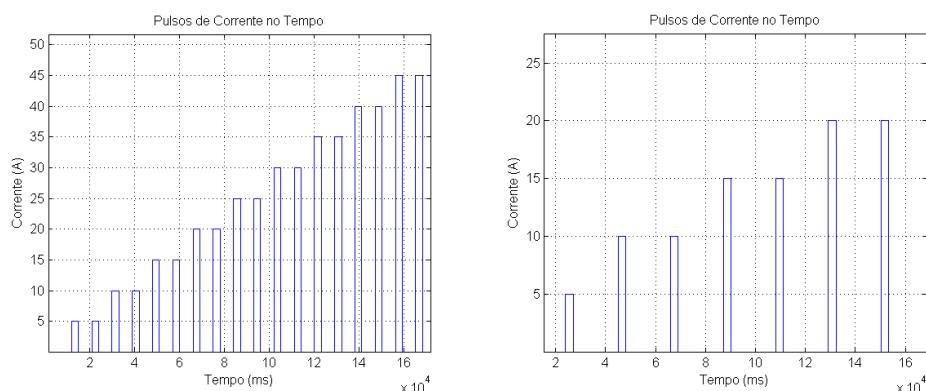


Figura 40 – Exemplo de aumento do intervalo entre os pulsos de corrente.

Outra mudança é o teste das chamadas “aquisições duplas”, usadas também em ensaios com campo, em que cada nível de corrente é pulsado duas vezes, gerando dois pontos para cada passo. Isso é uma forma de minimizar erros, considerando que uma medida pode ser validada pela sua repetibilidade.

Também foi testada outra abordagem de aquisição. Ao invés da execução de dois ensaios com níveis de refinamento diferentes que então são sobrepostos e casados pela rotina em *Matlab*, um mesmo ensaio pode ser configurado em um modo chamado “segmentado”, para seguir até um ponto com uma taxa de variação de corrente e em diante automaticamente mudá-la para uma menor sem a necessidade de parar e mudar as configurações manualmente. As vantagens desta abordagem são: minimizar a quantidade de ensaios e evitar erros de sobreposição de medida, visto que pequenas diferenças nas condições de cada ensaio eventualmente causavam defasagens no casamento entre as curvas e, consequentemente, poderiam injetar erros nos resultados calculados.

Como o comprimento da região aferida pelo nanovoltímetro aumentou para 50 mm, aplica-se o mesmo incremento ao critério de tensão em corrente crítica, passando a $5,0 \mu V$. Para o critério de parada, sem presença de campo optou-se também por submeter a amostra a um esforço maior para verificar a eficiência da âncora térmica, colocando-o em $50 \mu V/mm$, totalizando $2,5 \text{ mV}$.

Para os ensaios com campo magnético, foram feitas duas análises: a primeira é usar um método de ensaio similar ao da primeira topologia, com intervalos pequenos entre os pulsos de corrente e critério de tensão em corrente crítica de $0,1 \mu V/mm$ ($5,0 \mu V$ para esta amostra), mas segmentados e com aquisição dupla, e comparar os resultados; a segunda é, a partir do que já foi verificado nos ensaios sem campo, executar ensaios segmentados, com aquisição dupla e largos intervalos de acomodação térmica.

Durante a segunda etapa, a fonte de corrente do eletromagneto começou a apresentar um mau funcionamento, de forma que ela não era capaz de fornecer correntes suficientemente altas para manter campos maiores que 400 mT durante o período de um ensaio sem se auto-desligar por sobrecarga. Tal problema não pode ser sanado e impediu a realização de mais ensaios além deste ponto. Os ensaios realizados até 800 mT foram realizados alguns dias antes do aparecimento do problema.

4.2.1 Sem campo magnético

Os primeiros ensaios são sem presença de campo magnético com critério de parada de $50 \mu V/mm$ ($2,5 \text{ mV}$).

Os ensaios (a), (b) e (c) mostrados na Figura 41 a seguir objetivaram verificar o desempenho da amostra quando é dado um largo intervalo entre os pulsos de corrente, para que seja possível verificar qual o efeito da acomodação térmica sobre a amostra. Como mostrado na Tabela 17, a seguir, no ensaio (a) foram usados pulsos com incrementos de 2 A, com 2 s de duração intervalados por 10 s. No ensaio (b) foram usados pulsos com incrementos de 2,5 A, a partir de 95 A, com 2 s de duração intervalados por 60 s. O ensaio (c) foi com pulsos com incrementos de 2 A, a partir de 150 A, mas com 10 s de duração, espaçados de 60 s.

Tabela 17 - Características dos ensaios Sem Campo (a), (b) e (c).

Ensaio	Pulso (s)	Intervalo (s)	Corrente (A)	Incremento (A)	V_{Parada} (mV)
Sem Campo (a)	2	10	0 a 156	2	2,90
Sem Campo (b)	2	60	95 a 165	2,5	2,69
Sem Campo (c)	10	60	120 a 166	2	2,51

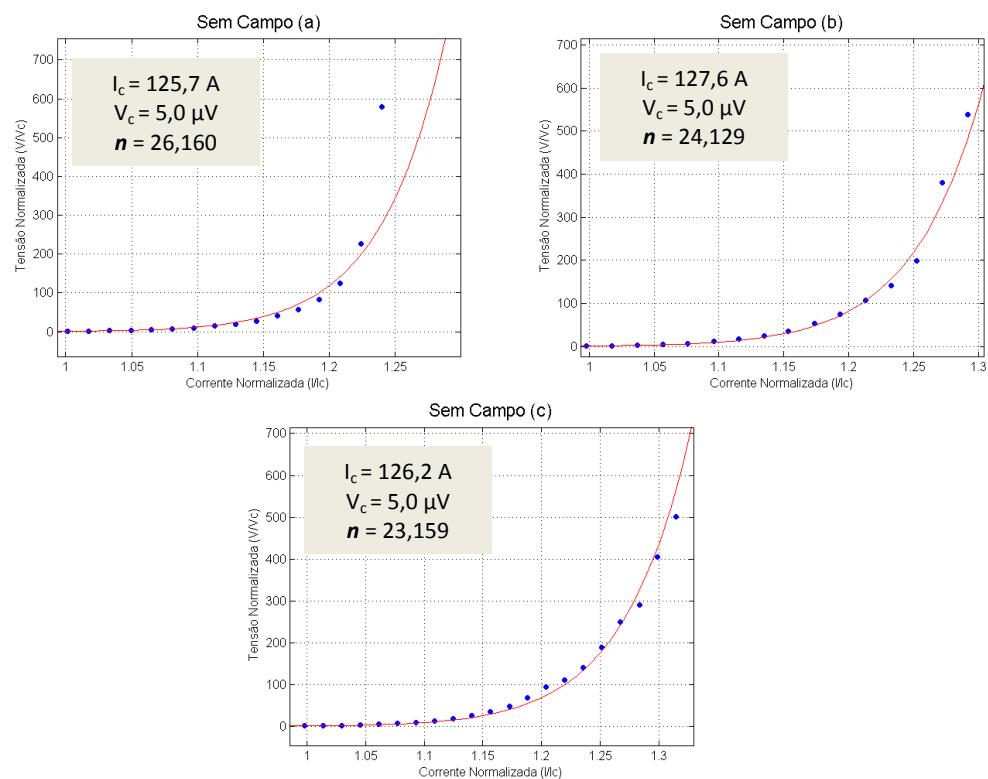


Figura 41 – Ensaios (a), (b) e (c) sem campo magnético da segunda topologia.

Um resultado interessante que se pode observar destes ensaios é que a curva característica da medição apresenta um comportamento muito bem definido até quase $1,3 I_c$ e $600 V_c$, mais do que observado no ensaio destrutivo da primeira topologia, em que a amostra

começou a se deteriorar em torno de $1,28 I_c$ e $400 V_c$, e provavelmente manter-se-ia assim se o critério de parada não encerrasse o ensaio em 2,5 mV. Desta análise, pode-se concluir que a massa de cobre fixada à amostra está cumprindo seu papel de âncora térmica, evitando seu superaquecimento, e consequente deterioração, por correntes mais elevadas.

A Figura 42 a seguir mostra um gráfico comparativo entre os três ensaios. Pode-se inferir desta comparação que quando há um maior tempo entre cada medição, independente do tempo de amostragem, a amostra tem um comportamento mais suave e suporta correntes um pouco mais altas. Logo, um tempo de acomodação térmica maior causa diferença nos resultados da caracterização. Além disso, a duração do pulso de corrente não representou diferença significativa nos resultados.

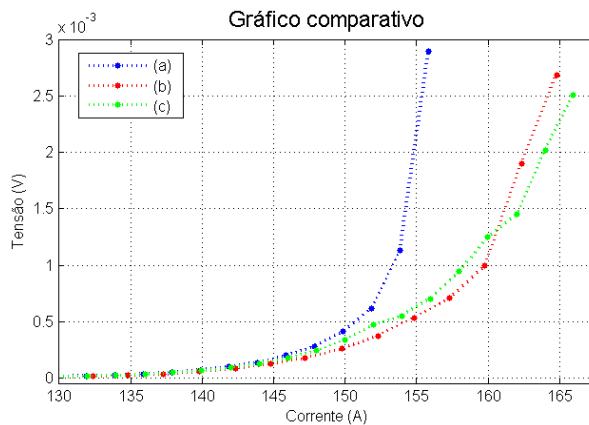


Figura 42 - Gráfico comparativo entre os ensaios sem campo (a), (b) e (c) da segunda topologia.

Nos ensaios (d) e (e), mostrados na Figura 43 a seguir, é testada a aquisição dupla, em que são dados dois pulsos de corrente iguais para cada nível. O ensaio (d) é com pulsos duplos com incremento de 4 A e o (e) é com pulsos duplos com incremento de 1 A a partir de 130 A. Ambos tem pulsos com duração de 2 s e, aproveitando também o aspecto da acomodação térmica, vista anteriormente, são separados por intervalos de 20 s. A Tabela 18, a seguir, resume estes detalhes do dois ensaios.

Tabela 18 – Características dos ensaios Sem Campo (d) e (e).

Ensaio	Pulso (s)	Intervalo (s)	Corrente (A)	Incremento (A)	V_{Parada} (mV)
Sem Campo (d)	2	20	0 a 164	4	2,51
Sem Campo (e)	2	20	0 a 128	4	
			130 a 164	1	2,56

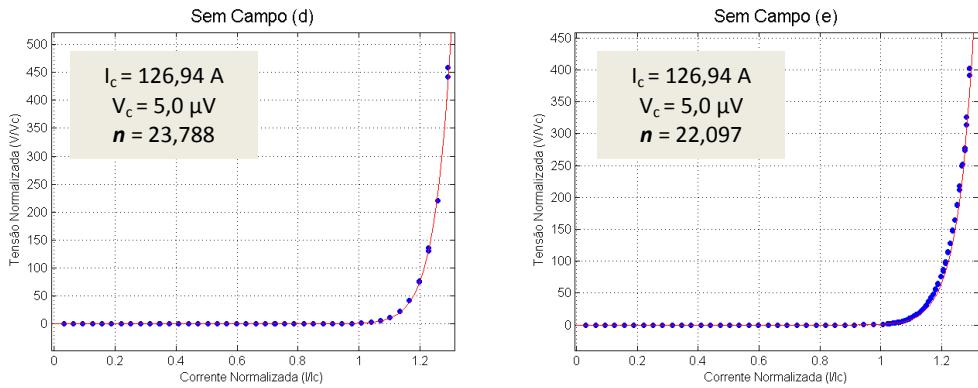


Figura 43 – Ensaios (d) e (e) sem campo magnético da segunda topologia.

Comparando estes aos ensaios (a), (b) e (c) anteriores na Figura 44, também a seguir, é perceptível que o intervalo de 20 s já é suficiente para a acomodação térmica, compondo curvas praticamente iguais às conseguidas com intervalos de 60 s entre pulsos de corrente.

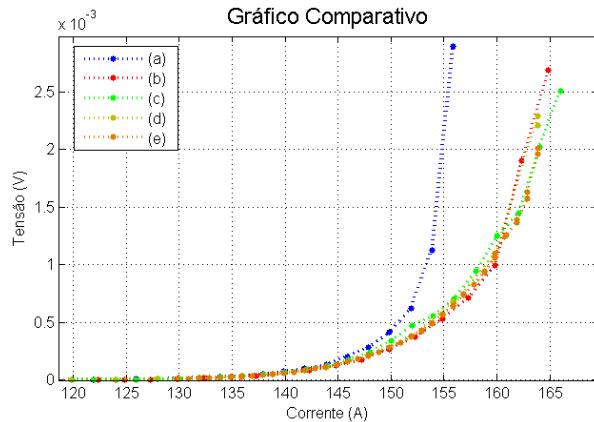


Figura 44 - Gráfico comparativo entre os ensaios sem campo (a) a (e) da segunda topologia.

Nos ensaios (f) e (g), mostrados na Figura 45 a seguir, é testada a medida segmentada, que é configurada para seguir com uma taxa de variação de corrente e automaticamente mudá-la para uma menor, com aquisição dupla. No (f) são dados incrementos de 2 A entre 0 e 80 A e incrementos de 0,5 A a partir de 80 A, em pulsos com largura de 2 s espaçados por 8 s. No (g) são dados incrementos de 5 A entre 0 e 80 A, 1 A entre 81 A e 110 A, 0,5 A entre 110 A e 120 A e 0,2 A a partir de 120 A, em pulsos com 2 s de duração espaçados de 20 s. As características dos ensaios são mostradas na Tabela 19 a seguir. Em ambos os resultados as curvas aproximadas ficaram bem ajustadas às originais, especialmente em (g).

Tabela 19 – Características dos ensaios Sem Campo (f) e (g).

Ensaio	Pulso (s)	Intervalo (s)	Corrente (A)	Incremento (A)	V_{Parada} (mV)
Sem Campo (f)	2	8	0 a 80	2	
			80,5 a 154,5	0,5	2,59
			0 a 128	5	
Sem Campo (g)	2	20	81 a 110	1	
			110,5 a 120	0,5	2,56
			120,2 a 165,4	0,2	

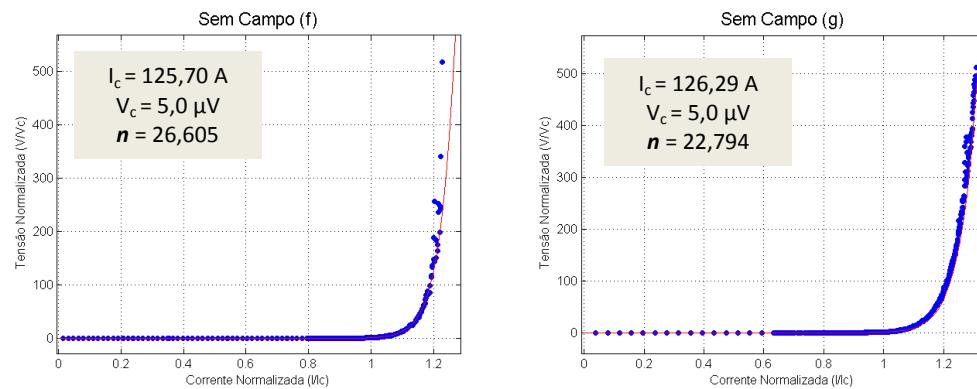


Figura 45 – Ensaios (f) e (g) sem campo magnético da segunda topologia.

Observa-se também como, novamente, a diferença nos intervalos entre os pulsos de corrente foi significativo para a determinação do fator n característico da amostra, como mencionado anteriormente.

4.2.2 Campo magnético de 100 mT

O primeiro nível de campo magnético é em 100 mT. Na Figura 46 a seguir estão os gráficos com os resultados obtidos. Os ensaios (a) e (b) foram feitos com pulsos com largura de 2 s espaçados por 2 s, sendo o (a) com incrementos de 5 A e o (b) com 5 A até 60 A e 0,5 A a partir disto. O ensaio (c) foi feito com pulsos de 3 s de largura espaçados por 21 s, incrementos de 5 A até 75 A e 1 A a partir disto. A corrente crítica sofre um pequeno decréscimo e o fator n sofreu um aumento inesperado no ensaio lento. O ensaio (b) oferece maior resolução da zona crítica, no entanto, observa-se também grande quantidade de ruídos, bem maior que nas outras medições. As características dos ensaios são mostradas na Tabela 20 a seguir.

Tabela 20 – Características dos ensaios com campo de 100 mT.

Ensaio	Pulso (s)	Intervalo (s)	Corrente (A)	Incremento (A)	$V_{\text{Parada}} (\mu\text{V})$	$\Delta I_c (\text{A})$
100 mT (a)	2	2	0 a 85	5	5,96	43
100 mT (b)	2	2	0 a 60 60,5 a 83,5	5 0,5	5,40	43
100 mT (c)	3	21	0 a 75 76 a 82	5 1	5,42	45

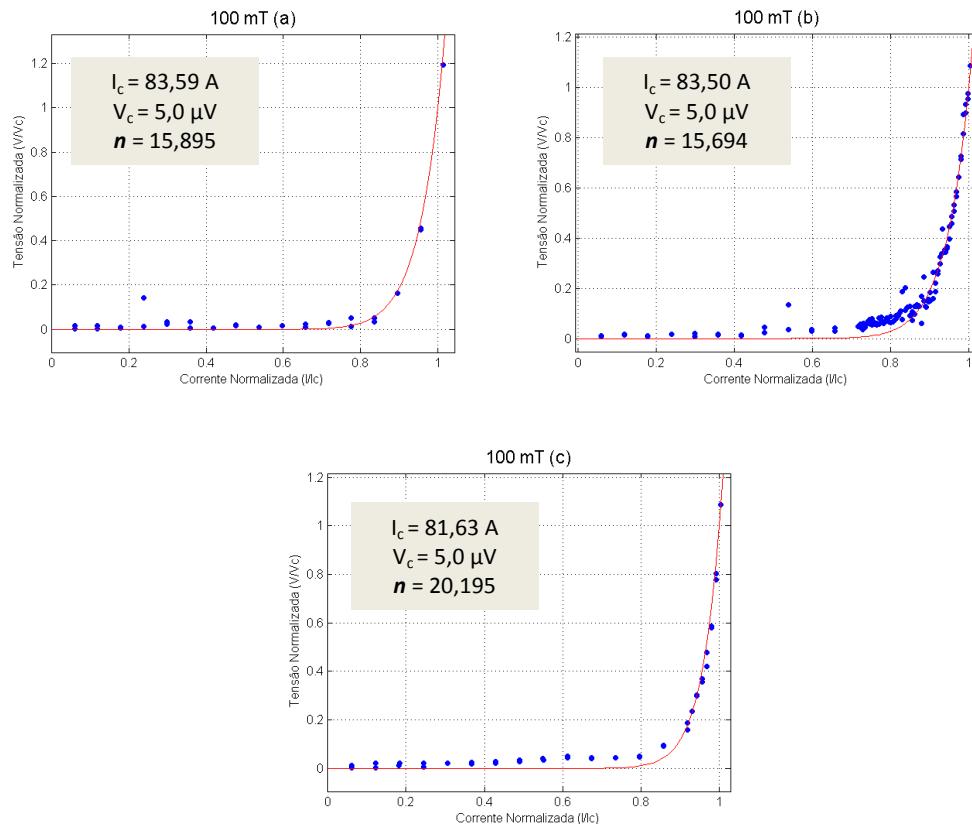


Figura 46 - Ensaios com campo magnético de 100 mT da segunda topologia.

4.2.3 Campo magnético de 200 mT

O segundo nível de campo magnético é em 200 mT. Na Figura 47 a seguir estão os gráficos com os resultados obtidos e na Tabela 21 estão as características dos ensaios executados. Os ensaios (a) e (b) foram feitos com pulsos com largura de 2 s espaçados por 2 s, com incrementos de 5 A até 60 A e 0,5 A a partir disto. O ensaio (c) foi feito com pulsos de 3 s de largura espaçados por 21 s, incrementos de 5 A até 65 A e 1 A a partir disto. A corrente crítica novamente cai um pouco e o fator n sofre um aumento no ensaio lento em comparação

a (a) e (b). Podem-se observar as mesmas características no que diz respeito à presença de ruídos que no caso anterior.

Tabela 21 – Características dos ensaios com campo de 200 mT.

Ensaio	Pulso (s)	Intervalo (s)	Corrente (A)	Incremento (A)	$V_{\text{Parada}} (\mu\text{V})$	$\Delta I_c (\text{A})$
200 mT (a)	2	2	5 a 60 60,5 a 73,8	5 0,5	5,41	10
200 mT (b)	2	2	5 a 60 60,5 a 73,8	5 0,5	5,34	11
200 mT (c)	3	21	5 a 65 66 a 72	5 1	5,39	12

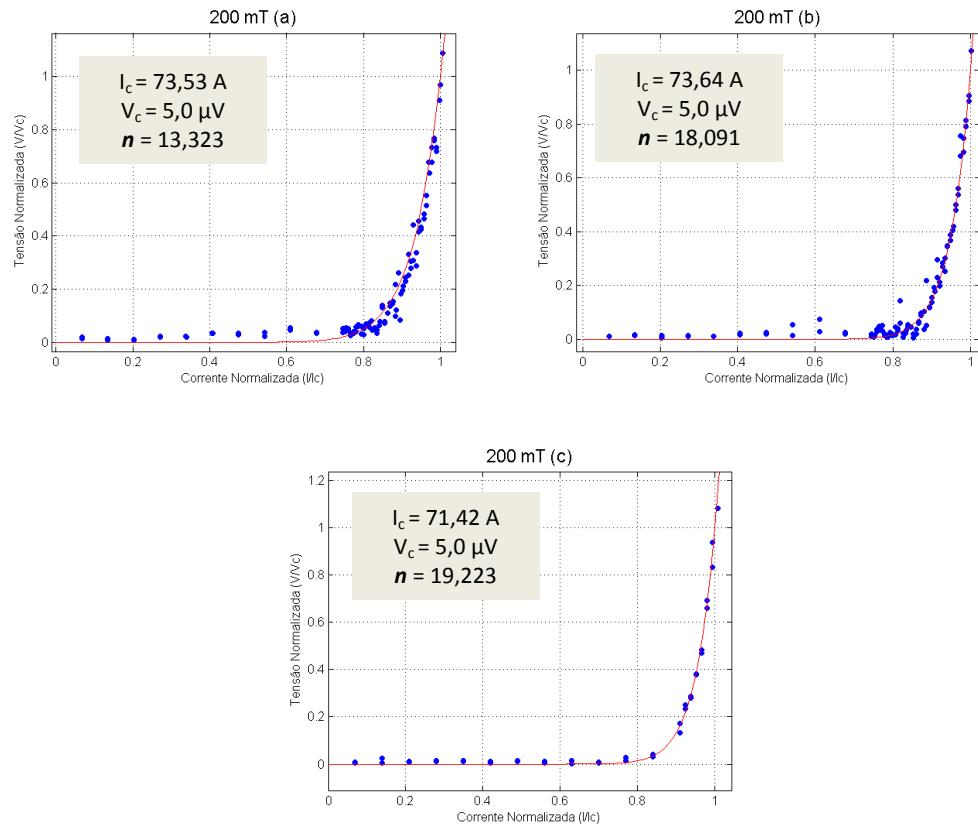


Figura 47 - Ensaios com campo magnético de 200 mT da segunda topologia.

4.2.4 Campo magnético de 300 mT

O terceiro nível de campo magnético é em 300 mT. Na Figura 48 a seguir estão os gráficos com os resultados obtidos e na Tabela 22 estão as características dos ensaios executados. Os ensaios (a) e (b) foram feitos com pulsos com largura de 2 s espaçados por 2 s, com incrementos de 5 A até 60 A e 0,5 A a partir disto. Os ensaios (c) e (d) foram feitos com pulsos de 3 s de largura espaçados por 21 s, incrementos de 5 A até 60 A e 1 A a partir disto em (c) e incrementos de 5 A até 55 A e 1 A a partir disto em (d). O mesmo comportamento com relação aos ensaios mais rápidos e mais lentos dos ensaios anteriores pode ser observado também neste caso.

Tabela 22 – Características dos ensaios com campo de 300 mT.

Ensaio	Pulso (s)	Intervalo (s)	Corrente (A)	Incremento (A)	V _{Parada} (μV)	ΔIc (A)
300 mT (a)	2	2	5 a 60 60,5 a 68,5	5 0,5	6,05	5
300 mT (b)	2	2	5 a 60 60,5 a 69,3	5 0,5	6,74	4
300 mT (c)	3	21	5 a 60 61 a 66	5 1	6,33	9
300 mT (d)	3	21	5 a 60 61 a 66	5 1	6,91	8

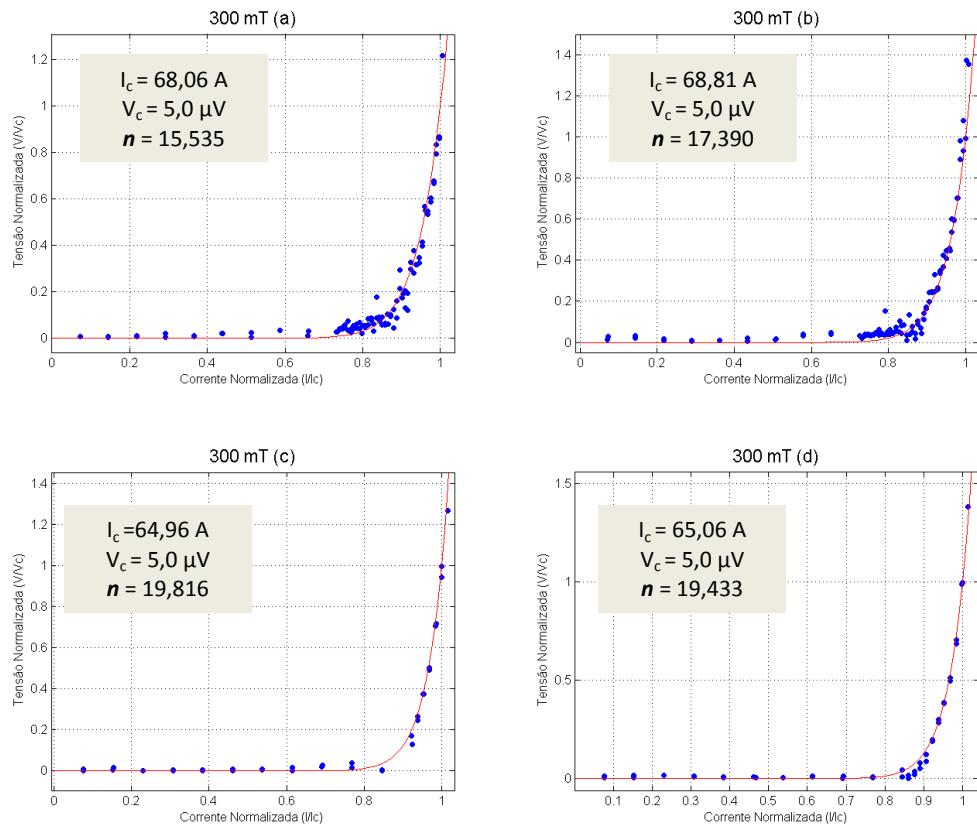


Figura 48 - Ensaios com campo magnético de 300 mT da segunda topologia.

4.2.5 Campo magnético de 400 mT

O quarto nível de campo magnético é em 400 mT. Na Figura 49 a seguir estão os gráficos com os resultados obtidos e na Tabela 23 estão as características dos ensaios executados. Os ensaios (a) e (b) foram feitos com pulsos com largura de 2 s espaçados por 2 s, com incrementos de 5 A até 60 A em (a), até 55 A em (b) e 0,5 A a partir destes.

Tabela 23 – Características dos ensaios com campo de 400 mT.

Ensaio	Pulso (s)	Intervalo (s)	Corrente (A)	Incremento (A)	V_{Parada} (μ V)	ΔI_c (A)
400 mT (a)	2	2	5 a 60 60,5 a 61	5 0,5	5,73	7
400 mT (b)	2	2	5 a 55 55,5 a 61	5 0,5	5,11	6

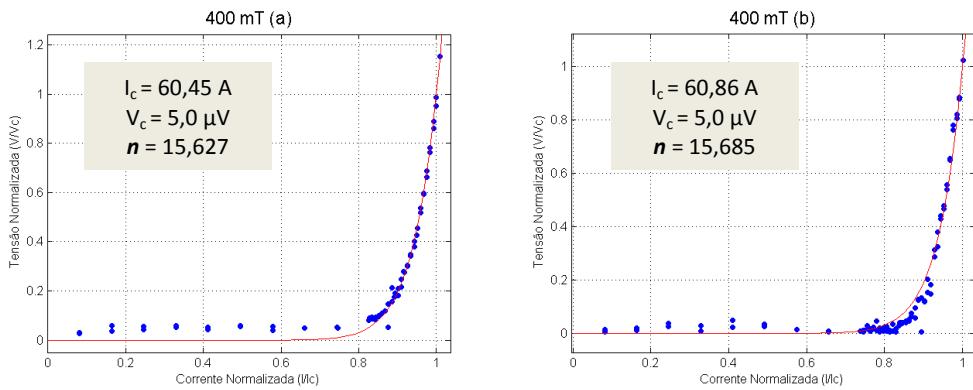


Figura 49 - Ensaios com campo magnético de 400 mT da segunda topologia.

4.2.6 Campos magnéticos de 500 mT e 600 mT

Os ensaios para campos magnéticos de 500 mT e 600 mT foram feitos com pulsos com largura de 3 s espaçados por 6 s, com incrementos de 5 A até 45 A e 0,5 A a partir deste valor. Na Figura 50 a seguir estão os gráficos com os resultados obtidos e na Tabela 24 estão as características dos ensaios executados.

Tabela 24 – Características dos ensaios com campo de 500 mT e 600 mT.

Ensaio	Pulso (s)	Intervalo (s)	Corrente (A)	Incremento (A)	$V_{\text{Parada}} (\mu\text{V})$	$\Delta I_c (\text{A})$
500 mT	3	6	5 a 45	5	5,18	3
			45,5 a 57,4	0,5		
600 mT	3	6	5 a 45	5	5,08	3
			45,5 a 54,5	0,5		

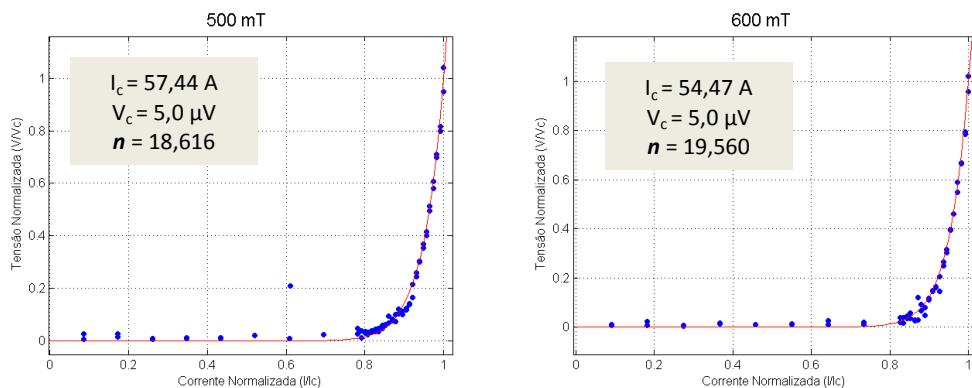


Figura 50 - Ensaios com campo magnético de 500 mT e 600 mT, respectivamente, da segunda topologia.

4.2.7 Campos magnéticos de 700 mT e 800 mT

Os ensaios para campos magnéticos de 700 mT e 800 mT foram feitos com pulsos com largura de 3 s espaçados por 6 s, com incrementos de 5 A até 40 A e 0,5 A a partir deste valor. Na Figura 51 a seguir estão os gráficos com os resultados obtidos e na Tabela 25 estão as características dos ensaios executados.

Tabela 25 – Características dos ensaios com campo de 700 mT e 800 mT.

Ensaio	Pulso (s)	Intervalo (s)	Corrente (A)	Incremento (A)	$V_{\text{Parada}} (\mu\text{V})$	$\Delta I_c (\text{A})$
700 mT	3	6	5 a 40	5	5,64	4
			40,5 a 50,5	0,5		
800 mT	3	6	5 a 40	5	5,53	2
			40,5 a 49	0,5		

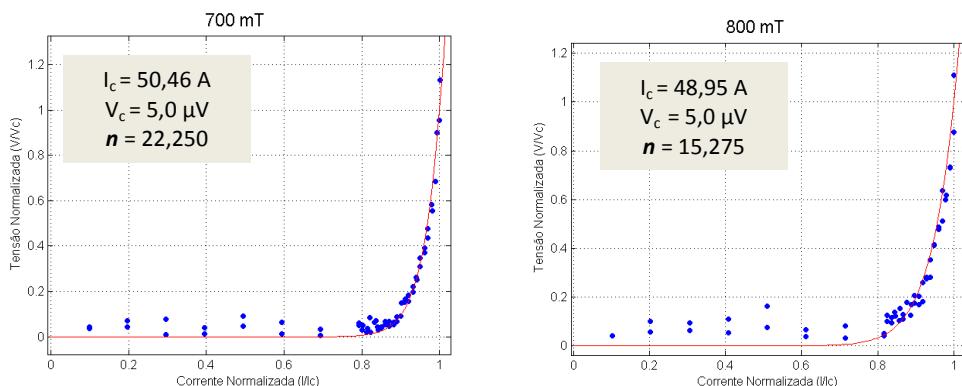


Figura 51 - Ensaios com campo magnético de 700 mT e 800 mT, respectivamente, da segunda topologia.

4.2.8 Análise comparativa dos resultados

Assim como na topologia anterior, vale a pena fazer uma comparação entre os resultados obtidos a fim de se observar os dois termos mais relevantes: I_c e o fator exponencial n de cada ensaio, dispostos na Tabela 26, a seguir, diretamente relacionados às intensidades de campos magnéticos associadas.

Tabela 26 - Análise comparativa dos resultados dos ensaios na segunda topologia.

Ensaio	Campo (mT)	I_c (A)	n
a	0	125,7	26,160
b	0	127,6	24,129
c	0	126,2	23,159
d	0	126,94	23,788
e	0	126,94	22,097
f	0	125,70	26,605
g	0	126,29	22,794
a	100	83,59	15,895
b	100	83,50	15,694
c	100	81,63	20,195
a	200	73,53	13,323
b	200	73,64	18,091
c	200	71,42	19,223
a	300	68,06	15,535
b	300	68,81	17,390
c	300	64,96	19,433
d	300	65,06	19,816
a	400	60,45	15,627
b	400	60,86	15,685
-	500	57,44	18,616
-	600	54,47	19,560
-	700	50,46	22,250
-	800	48,95	15,275

A partir dos dados da Tabela 26 anterior, faz-se novamente um levantamento gráfico, a fim de se identificar as relações diretas entre os dados. Os gráficos obtidos, relacionando I_c com campo magnético e n com campo magnético, respectivamente, estão dispostos na Figura 52, a seguir.

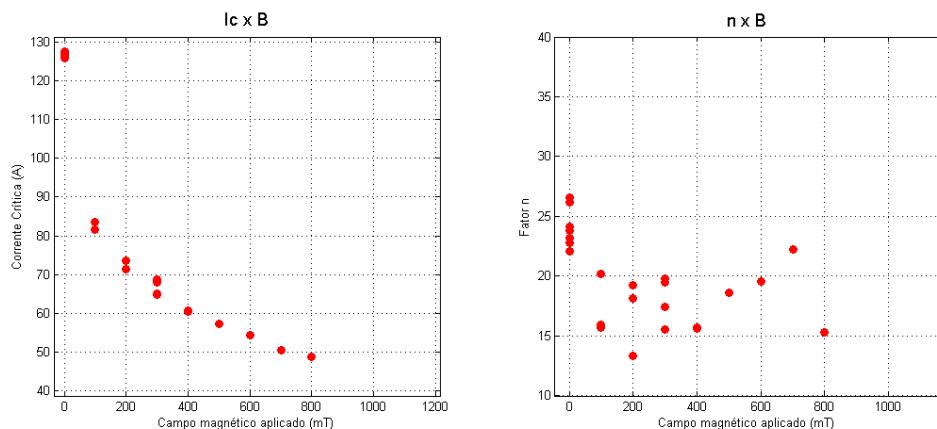


Figura 52 - Relação entre I_c e campo magnético e entre n e campo magnético, respectivamente.

Novamente, assim como na primeira topologia, é possível ver que existe uma relação bem definida entre a intensidade de campo aplicada sobre a amostra e a queda de I_c , mas no que diz respeito ao fator n , os resultados são igualmente duvidosos. Mesmo com a âncora térmica, a sensibilidade da amostra a qualquer variação térmica impossibilita a garantia de avaliar n exclusivamente relacionando-o ao campo magnético.

4.3 Análise comparativa entre as topologias

Munidos dos resultados (ainda que incompletos na segunda topologia) é possível fazer uma comparação entre eles nas diferentes montagens a fim de se identificar alguma alteração a mais além das já observadas anteriormente. Para isso foram unidos em dois gráficos comparativos com as relações entre I_c com campo magnético e n com campo magnético em ambas as topologias, respectivamente, dispostos na Figura 53, a seguir. Os pontos em azul são referentes à primeira topologia e os em vermelho, à segunda.

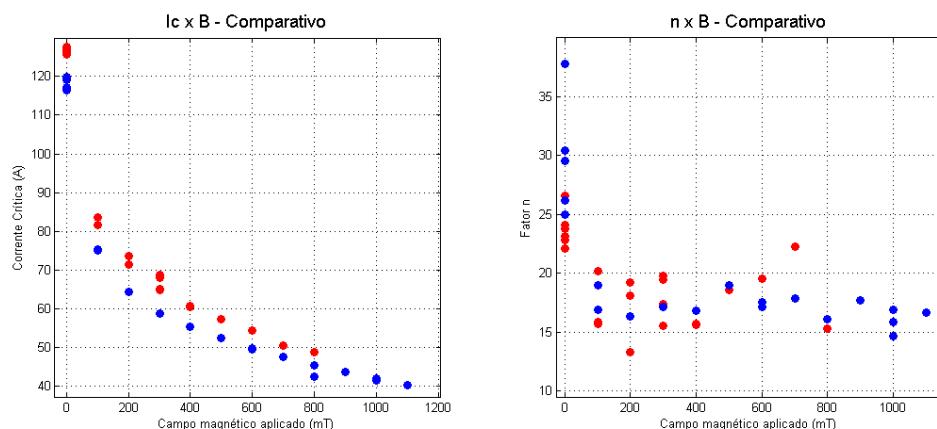


Figura 53 – Comparativos da relação entre I_c e campo magnético e entre n e campo magnético nas duas topologias, respectivamente.

Quaisquer relações envolvendo os resultados para o fator n continuam um mistério, no entanto, observa-se um aumento na I_c dos resultados para a segunda topologia.

5 Conclusões e Trabalhos Futuros

A primeira conclusão a que este trabalho permite chegar é que nenhum dos métodos utilizados é capaz de garantir que o fator n possa ser definido isoladamente em função da variação do campo magnético aplicado sobre a amostra e percebe-se o quanto sensível ele é a pequenas variações de temperatura internas à amostra, onde não é possível controlá-la. Sabe-se que o J_c também depende da temperatura, mas este se mostrou bem menos sensível a pequenas variações.

Um fato interessante observado é que os bons comportamentos analisados sob diferentes formas de ensaio sem campo magnético não puderam ser extrapolados com sucesso para os ensaios com campo magnético, provavelmente devido ao grande aumento de ruídos e incertezas nas leituras. Possivelmente, a posição dos equipamentos pode interferir nas leituras. O nanovoltímetro, um equipamento de altíssima precisão e sensibilidade, está apoiado sobre a fonte de corrente contínua do eletromagneto, de forma que os chaveamentos dos semicondutores em alta frequência talvez induzam ruídos significativos, da ordem de grandeza das próprias leituras.

Além disso, os parâmetros dos supercondutores são extremamente sensíveis a qualquer variação na incidência de campos magnéticos, de forma que pequenas variações, imperceptíveis a olho nu, como na inclinação da amostra ou distância entre as peças polares, possam ter implicações significativas nas leituras. Para isso, é necessário um aprimoramento no equipamento objetivando garantir o máximo de estabilidade e precisão mecânica possível para os ensaios.

Dos diferentes métodos de ensaio, a descoberta mais relevante foi com relação ao tempo de acomodação térmica, alterando significativamente as propriedades da fita 2G quando os pulsos de corrente são intervalados por cerca de 20 s ou mais. Tal efeito pode ser explicado pelo fato de que, dado tempo suficiente entre os pulsos de corrente, a amostra é capaz de resfriar totalmente e entrar em equilíbrio térmico com o nitrogênio líquido. Com intervalos menores, pode haver interferência de efeitos residuais de uma aquisição anterior.

Há também a possibilidade de a duração dos pulsos de corrente (2 s ou 3 s) estar sendo muito longa, de forma que seja suficiente para causar uma alteração na temperatura interna da amostra. Uma proposta de análise posterior é sobre resultados da realização de ensaios com pulsos de corrente menores, da ordem de 1 s ou menos.

No geral, todo o sistema de caracterização de fitas 2G desenvolvido atendeu às expectativas e, com as diversas experimentações com ele realizadas, foi possível compreender um pouco mais, não apenas do método de caracterização em si, mas também com relação à sensibilidade das fitas supercondutoras a uma série de detalhes e pequenas interferências externas, que devem ser estudadas mais atentamente a fim de se melhorar todo processo de caracterização e, através de resultados mais confiáveis, alcançar um desempenho cada vez melhor das fitas 2G.

6 Referências Bibliográficas

- [1] Sass, F., “*Mancais Magnéticos Supercondutores Utilizando Fitas de Segunda Geração*”, Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2011.
- [2] 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.
- [3] Lamas, S. J., “*Projeto e Construção de Limitador de Corrente Supercondutor Utilizando Fitas de YBCO*”, Dissertação de M.Sc, EEL/USP, Lorena, São Paulo, 2009.
- [4] Ogata, M., Miyazaki, Y., Hasegawa, H., et al., “*Basic Study of HTS Magnet Using 2G Wires for Maglev Train*”, Physica C, pp. 1-5, 2010.
- [5] 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.
- [6] Hazelton, D. W., Selvamanickam, V., “*SupoPower’s YBCO Coated High-Temperature Superconducting (HTS) Wire and Magnet Applications*”, Proceedings of the IEEE, v. 97, n. 11, pp. 1831-1836, 2009.
- [7] 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.
- [8] Sotelo, G. G., *Proposta de um Mancal Magnético Supercondutor com Fita YBCO de Segunda Geração*. Projeto Final para o grau de Engenheiro Eletricista, DEE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2008.
- [9] Sass, F., Sotelo, G. G., Polasek, A., et al., “*Application of 2G-Tape for Passive and Controlled Superconductivity Levitation*”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2010 (Aceito para publicação em edições futuras).
- [10] 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 (Aceito para publicação em edições futuras).

- [11] Onnes, H.K., “*The Superconductivity of Mercury*”, Comm. Phys. Lab., University Leiden, 1911.
- [12] Rose Innes, A. C., Rhoderick, E. H., “*Instruction to Superconductivity*”, 2^a ed., Oxford, Pergamon Press, 1978.
- [13] Batista de Souza, W. T., “*Simulações e Ensaios com Limitadores de Corrente de Curto-Círcito Supercondutores do Tipo Resistivo*”, Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2011.
- [14] Fernandes, R. P., “*Desenvolvimento de um Sistema de Mapeamento de Densidade de Fluxo Magnético*”, Projeto Final para o grau de Engenheiro Eletricista, DEE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2011.
- [15] Meissner, W., Ochsenfeld, W., “Ein neuer Effekt bei Eintritt der Supraleitfähigkeit”, Naturwissenschaften 21, 787, 1933.
- [16] London, F., London, H., “The electromagnetic equations of the superconductor”, Proc. Roy. Soc. (London) A 149, 71, 1935.
- [17] Ginzburg, V. L., Landau, L. D., “On the theory of superconductivity” Zh. Eksperim. Teor. Fiz. 20, 1064, 1950.
- [18] Cooper, L. N., “Bound electron pairs in a degenerate Fermi gas”, Phys. Rev. 104, 1189, 1956.
- [19] Dias, D.H.N., “*Comportamento da Força de Levitação em Mancais Lineares frente a Oscilações do Supercondutor*”, Projeto Final para o grau de Engenheiro Eletricista, DEE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2010.
- [20] Silva, F. R., “*Efeito da Relaxação de Fluxo Magnético na Força de Levitação em Mancais Supercondutores*”, Projeto Final para o grau de Engenheiro Eletricista, DEE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2010.
- [21] Dias, D. H. N., “*Modelagem de Mancais Lineares Supercondutores Considerando o Resfriamento na Presença de Campo Magnético*”, Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2009.
- [22] Artigo “*IEEE-488*” em <http://en.wikipedia.org/wiki/IEEE-488>, acessado às 00:35 de 25 de Janeiro de 2012.

7 Apêndices

7.1 Rotina em *Matlab* para construção dos gráficos

```
% Rotina para a organização dos pares ordenados (I,V) característicos
% das amostras de fita supercondutora obtidos do programa em LabView,
% normalização em função de tensão e corrente críticos (Vc e Ic),
% plotagem dos gráficos das curvas (I,V) normalizadas e obtenção do
% expoente 'n' da equação da curva ajustada: E/Ec = (J/Jc)^n.

% Obs.: Os arquivos .txt obtidos diretamente do programa estão em um
% formato incompatível com a sintaxe do Matlab. Os arquivos devem
% antes ser editados para tal, excluindo-se as colunas 1, 4 e 5 e
% substituindo-%se as VÍRGULAS dos valores por PONTOS. As colunas 2 e
% 3 são as únicas relevantes: São os valores de corrente medida e
% tensão medida, respectivamente.

close
clear
clc

%Caminho do diretório onde estão os arquivos prontos para usar
cd('G:\Projeto Final\Medidas\AMOSTRA')

%Nome do arquivo com as medidas de toda a curva:
curva=abs(load('ensaio_A.txt'));

%Nome do arquivo com as medidas de refinamento da região crítica:
joelho=abs(load('ensaio_B.txt'));

%Arrumação da matriz com valores de corrente diferentes de zero:

L1= size(curva,1);
L2= size(joelho,1);

i=0;
for x=1:L1
    if (curva(x,1) > 0.5) & (curva(x,1) < joelho(1,1))
        i=i+1;
        toda(i,:)= curva(x,:);
    end;
end;

for y=1:L2
    if (joelho(y,1) > 0.5)
        i=i+1;
        toda(i,:)= joelho(y,:);
    end;
end;

LT=size(toda,1);
```

```

% Normalização da curva em função de tensão e corrente críticos:
% (pode ser necessário reconfigurar o condicional)

a=0;
for c=1:LT
    if toda(c,2) > 1e-6 && toda(c,2)
        a=a+1;
        curta(a,1) = toda(c,1);
        curta(a,2) = toda(c,2);
        toda(:,2)=toda(:,2)+1e-9;
    end
end

Ic = interp1(curta(:,2),curta(:,1),5e-6)

toda= [toda(:,1)/Ic toda(:,2)/5e-6];

% Aplicação da função Logarítmico Natural aos pontos da parte crítica
% para que a função exponencial vire uma reta:

% Obs.: Pode ser que, pelos valores das medidas, seja necessário
% variar o valor limite do condicional para que ele esteja ajustado ao
% intervalo relevante!

k=0;
for z=1:i
    if toda(z,2) > 0.5
        k=k+1;
        line(k,:)= log(toda(z,:));
    end
end

% Plotagem da nova função linearizada sob a qual será feita a
% regressão linear (opcional):

figure
plot(line(:,1),line(:,2), 'bo')

% Regressão linear da função line(x,y) pela função polyfit:

n= polyfit(line(:,1),line(:,2),1)

% Criação da função exponencial ajustada:
% (pode ser necessário alterar o limite superior de A para acomodar
% melhor o gráfico)

A= 0:0.01:1.1;
B= A.^n(1,1);

```

```

% Plotagem dos gráficos das curvas medida normalizada e curva
% ajustada (os pontos azuis são as medidas e a curva vermelha é a
% ajustada)

figure1 = figure('Color',[1 1 1]);
axes1 = axes('Parent',figure1,'YGrid','on','XGrid','on');
box(axes1,'on');
hold(axes1,'all');
plot(toda(:,1),toda(:,2),'MarkerFaceColor',[0 0
1],'MarkerSize',4,'Marker','o',...
'LineStyle','none',...
'Color',[0 0 1],...
'DisplayName','toda(:,2) vs. toda(:,1)');

plot(A,B,'Color',[1 0 0],'DisplayName','B vs. A');
xlabel('Corrente Normalizada (I/Ic)');
ylabel('Tensão Normalizada (V/Vc)');

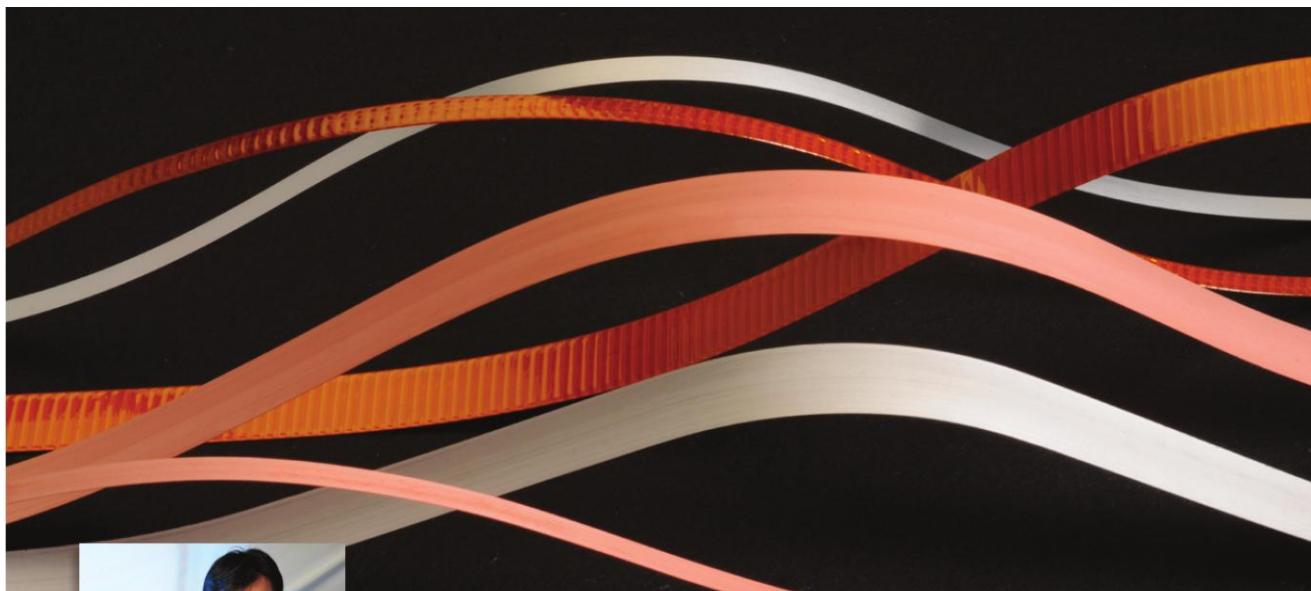
% Mudar o título do gráfico!
title('TÍTULO','FontSize',14);

% FIM

```

8 Anexos

8.1 Datasheet da Fita Superpower 2G-HTS SCS4050



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.

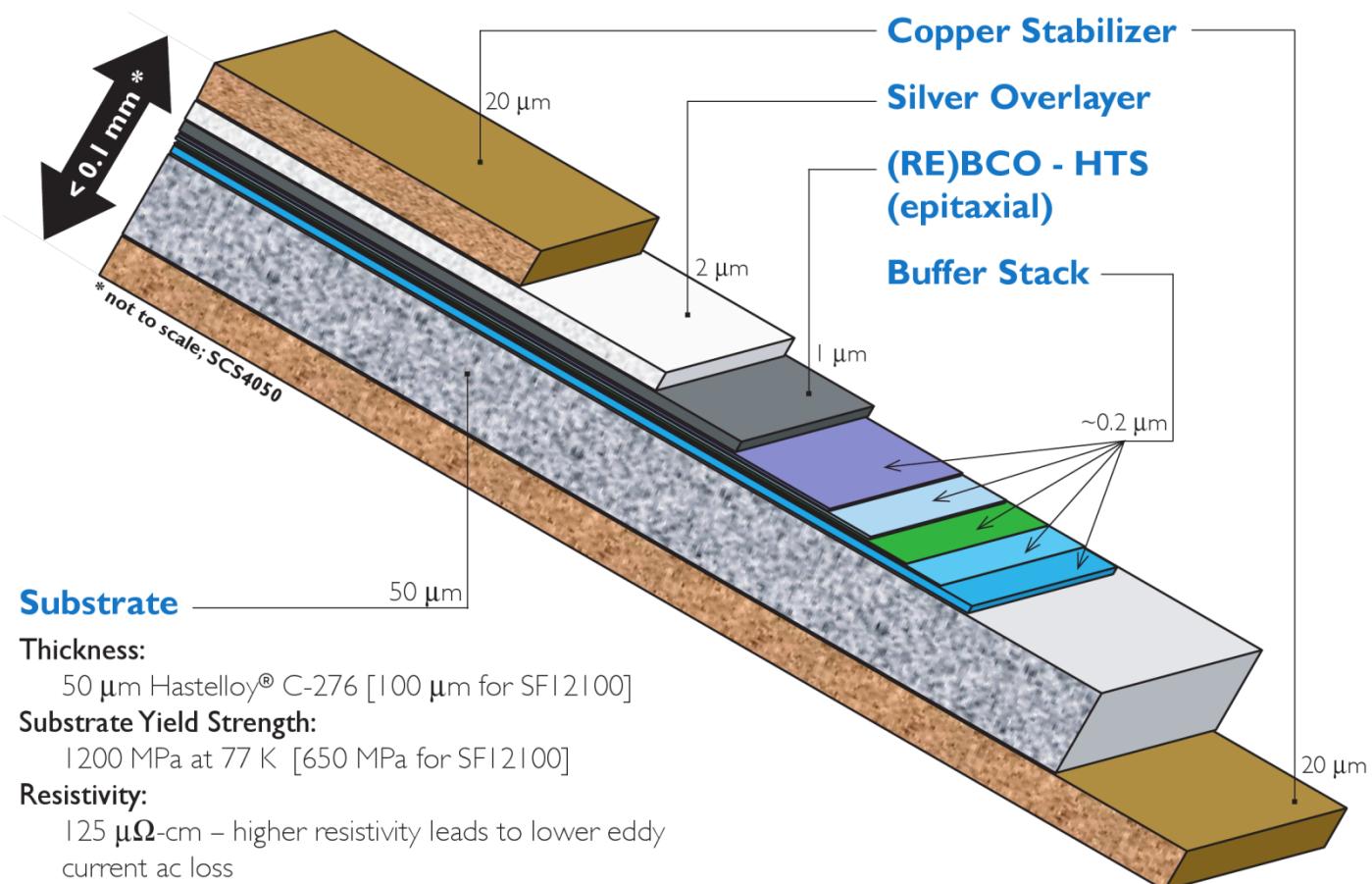
Once the wire has been slit into device-specific widths, Surround Copper Stabilizer (SCS) is applied to completely encase the wire. Overcurrent capability in SCS wire can be tailored to the specific application. The stabilizer protects the conductor and produces rounded edges that are beneficial for 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
Inc.
superior performance.
powerful technology.

SuperPower® is a registered trademark of SuperPower, Inc.

SuperPower® 2G HTS Wire Specifications

Spec	SF2050	SF4050	SCS4050	SF6050	SCS6050	SF12050
SF = Stabilizer Free SCS = Surround Copper Stabilizer						
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



SCS12050	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:

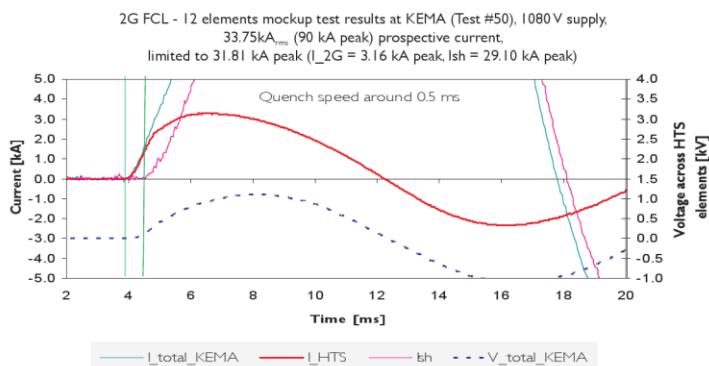
- The world's first in-grid Power Cables utilizing 4 mm wide 2G HTS wire were fabricated by Sumitomo Electric Industries with SuperPower's wire



- Measured AC losses in a sample cable were 0.36 W/m at $1000A_{rms}$ ($I_{top/peak}/I_c \sim 65\%$, 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.

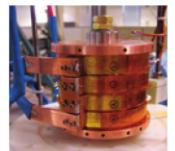
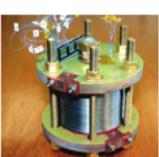
- Standardized testing provided with all wire deliveries
- Hermeticity - 24 hrs, 10 bar, LN₂, no change in I_c & thickness
- I_c uniformity in long lengths of 2G HTS wire: STDEV less than 10%
- Insulated wire is available (see back page for details)
- I_c values range from 80-110 Amps at 77 K in 4 mm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

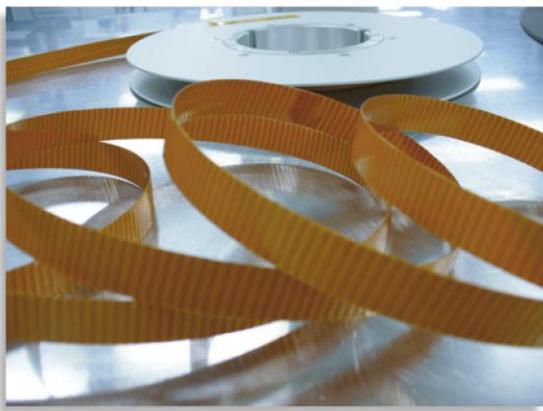
Other custom configurations are available.

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:

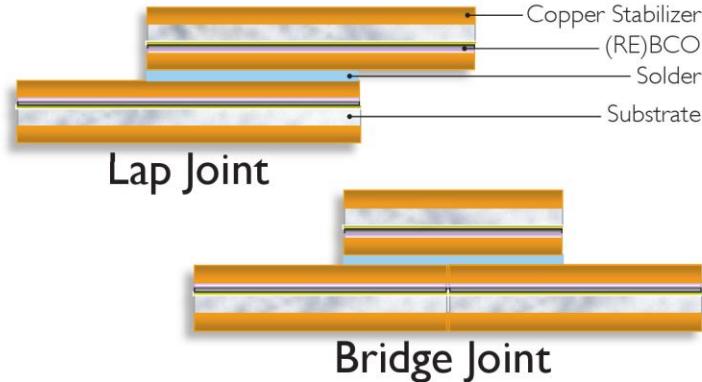
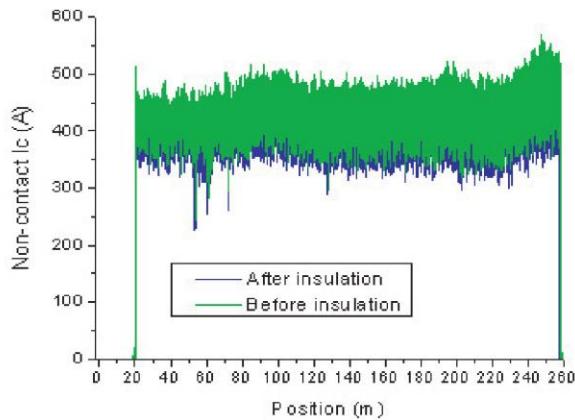
- 2006: High field coil fabricated with 2G HTS wire achieved a record magnetic field of 2.4 Tesla at 64K 
- 2007: High field magnet coil fabricated with 2G HTS wire and tested at NFM achieved a record magnetic field of 26.8 Tesla in 19 Tesla background field at 4.2K 
- 2008: Coil fabricated by NFM with SuperPower® 2G HTS Wire was tested at 4.2K in 31 Tesla background field at NFM 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.



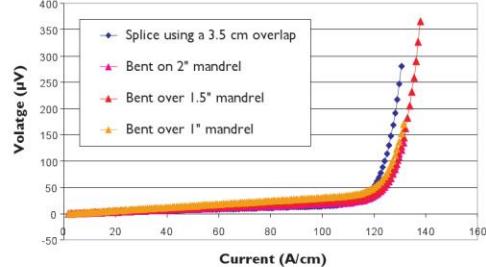
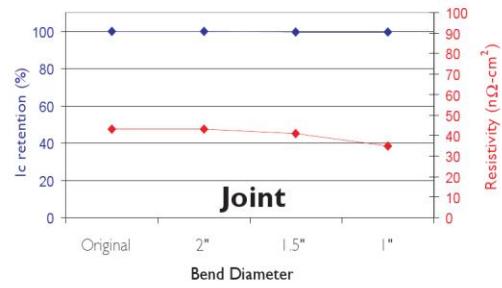
High Quality Joints

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 ($1 \mu\text{V}/\text{cm}$) 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 = $40-50 \text{ n}\Omega \cdot \text{cm}^2$



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

8.2 Instruções de Soldagem da Fita



Soldering Instructions

SuperPower® 2G HTS Wire has excellent soldering characteristics.

When soldering, the instructions listed below should be kept in mind:

SuperPower Wire Types SCS4050, SCS6050 and/or SCS12050 with surround copper stabilizer:

1. Clean the surface of the 2G HTS wires and the area on the fixture or current lead to which the 2G wires are to be soldered.
2. Typical resin flux, e.g., Kester® SP-44 Rosin Paste Flux, and either commercial solder material (e.g., 40Pb-60Sn) or Indium may be used.
3. Tin the fixture or current leads, and the 2G wire ([RE]BCO side) with solder material.
4. Gently press the 2G wire with (RE)BCO side facing to the fixture or the current lead to the (RE)BCO side of the 2G wire, and apply appropriate heat until solder material melts.
5. The soldering temperature should be kept below ~ 250°C, especially for elongated processing time (e.g., a few hours), to avoid possible degradation in superconductivity.

SuperPower Wire Types SF4050, SF6050, SF12100 and/or SF12050 with only silver overlayer:

1. Clean the surface of the fixture to which the HTS wires are to be soldered.
2. Typical resin flux, e.g., Kester® SP-44 Rosin Paste Flux, and commercial solder material, e.g., 40Pb-60Sn, may be used.
3. Tin the fixture or current leads, and the 2G wire ([RE]BCO side) with solder material, gently press the 2G wire with (RE)BCO side facing to the fixture or the current lead to the (RE)BCO side of the 2G wire, and apply appropriate heat until solder material melt.
4. The soldering temperature should be kept below ~ 250°C to avoid possible degradation in superconductivity.
5. When tinning the 2G wire surface, the process should be quick and brief to avoid the thin silver overlayer being scavenged.

PHILIPS

SuperPower, Inc. is a subsidiary of Royal Philips Electronics N.V.
SuperPower® is a registered trademark of SuperPower, Inc.

Rev. 3/2009 | 2G Marketing/Marketing Collateral/Working Sheets/2009 Working Sheets/2P_Soldering Instructions_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

8.3 Datasheet do Kapton

General Information

General Information

Kapton® polyimide film possesses a unique combination of properties that make it ideal for a variety of applications in many different industries. The ability of Kapton® to maintain its excellent physical, electrical, and mechanical properties over a wide temperature range has opened new design and application areas to plastic films.

Kapton® is synthesized by polymerizing an aromatic dianhydride and an aromatic diamine. It has excellent chemical resistance; there are no known organic solvents for the film. Kapton® does not melt or burn as it has the highest UL-94 flammability rating: V-0. The outstanding properties of Kapton® permit it to be used at both high and low temperature extremes where other organic polymeric materials would not be functional.

Adhesives are available for bonding Kapton® to itself and to metals, various paper types, and other films.

Kapton® polyimide film can be used in a variety of electrical and electronic insulation applications: wire and cable tapes, formed coil insulation, substrates for flexible printed circuits, motor slot liners, magnet wire insulation, transformer and capacitor insulation, magnetic and pressure-sensitive tapes, and tubing. Many of these applications are based on the excellent balance of electrical, thermal, mechanical, physical, and chemical properties of Kapton® over a wide range of temperatures. It is this combination of useful properties at temperature extremes that makes Kapton® a unique industrial material.

Three types of Kapton® are described in this bulletin:

- Kapton® Type HN, all-polyimide film, has been used successfully in applications at temperatures as low as -269°C (-452°F) and as high as 400°C (752°F).

Type HN film can be laminated, metallized, punched, formed, or adhesive coated. It is available as $7.5\text{ }\mu\text{m}$ (0.3 mil), $12.5\text{ }\mu\text{m}$ (0.5 mil), $19\text{ }\mu\text{m}$ (0.75 mil), $25\text{ }\mu\text{m}$ (1 mil), $50\text{ }\mu\text{m}$ (2 mil), $75\text{ }\mu\text{m}$ (3 mil), and $125\text{ }\mu\text{m}$ (5 mil) films.

- Kapton® Type VN, all-polyimide film with all of the properties of Type HN, plus superior dimensional stability. Type VN is available as $12.5\text{ }\mu\text{m}$ (0.5 mil), $19\text{ }\mu\text{m}$ (0.75 mil), $25\text{ }\mu\text{m}$ (1 mil), $50\text{ }\mu\text{m}$ (2 mil), $75\text{ }\mu\text{m}$ (3 mil), and $125\text{ }\mu\text{m}$ (5 mil) films.
- Kapton® Type FN, a Type HN film coated on one or both sides with Teflon® FEP fluoropolymer resin, imparts heat sealability, provides a moisture barrier, and enhances chemical resistance. Type FN is available in a number of combinations of polyimide and Teflon® FEP thicknesses (see **Table 16**).

Note: In addition to these three types of Kapton®, films are available with the following attributes:

- antistat
- thermally conductive
- polyimides for fine line circuitry
- cryogenic insulation
- corona resistant
- pigmented for color
- conformable
- other films tailored to meet customers' needs

Data for these films are covered in separate product bulletins, which can be obtained from your DuPont representative.

The Chemical Abstracts Service Registry Number for Kapton® polyimide film is [25036-53-7].

Physical and Thermal Properties

Kapton® polyimide films retain their physical properties over a wide temperature range. They have been used in field applications where the environmental temperatures were as low as -269°C (-452°F) and as high as 400°C (752°F).

Complete data are not available at these extreme conditions, and the majority of technical data presented in this section falls in the 23 to 200°C (73 to 392°F) range.

Table 1
Physical Properties of Kapton® Type 100 HN Film, $25\text{ }\mu\text{m}$ (1 mil)

Physical Property	Typical Value at		Test Method
	23°C (73°F)	200°C (392°F)	
Ultimate Tensile Strength, MPa (psi)	231 (33,500)	139 (20,000)	ASTM D-882-91, Method A*
Yield Point at 3%, MPa (psi)	69 (10,000)	41 (6000)	ASTM D-882-91
Stress to Produce 5% Elongation, MPa (psi)	90 (13,000)	61 (9000)	ASTM D-882-91
Ultimate Elongation, %	72	83	ASTM D-882-91
Tensile Modulus, GPa (psi)	2.5 (370,000)	2.0 (290,000)	ASTM D-882-91
Impact Strength, N-cm (ft-lb)	78 (0.58)		DuPont Pneumatic Impact Test
Folding Endurance (MIT), cycles	285,000		ASTM D-2176-89
Tear Strength—Propagating (Elmendorf), N (lbf)	0.07 (0.02)		ASTM D-1922-89
Tear Strength—Initial (Graves), N (lbf)	7.2 (1.6)		ASTM D-1004-90
Density, g/cc or g/mL	1.42		ASTM D-1505-90
Coefficient of Friction—Kinetic (Film-to-Film)	0.48		ASTM D-1894-90
Coefficient of Friction—Static (Film-to-Film)	0.63		ASTM D-1894-90
Refractive Index (Sodium D Line)	1.70		ASTM D-542-90
Poisson's Ratio	0.34		Avg. Three Samples Elongated at 5%, 7%, 10%
Low Temperature Flex Life	Pass		IPC TM 650, Method 2.6.18

*Specimen Size: 25×150 mm (1×6 in); Jaw Separation: 100 mm (4 in); Jaw Speed: 50 mm/min (2 in/min); Ultimate refers to the tensile strength and elongation measured at break.

Table 2
Thermal Properties of Kapton® Type 100 HN Film, $25\text{ }\mu\text{m}$ (1 mil)

Thermal Property	Typical Value	Test Condition	Test Method
Melting Point	None	None	ASTM E-794-85 (1989)
Thermal Coefficient of Linear Expansion	20 ppm/ $^{\circ}\text{C}$ (11 ppm/ $^{\circ}\text{F}$)	-14 to 38°C (7 to 100°F)	ASTM D-696-91
Coefficient of Thermal Conductivity, W/m·K cal cm·sec· $^{\circ}\text{C}$	0.12 2.87×10^{-4}	296 K 23°C	ASTM F-433-77 (1987) ¹
Specific Heat, J/g·K (cal/g· $^{\circ}\text{C}$)	1.09 (0.261)		Differential Calorimetry
Flammability	94V-0		UL-94 (2-8-85)
Shrinkage, %	0.17 1.25	30 min at 150°C 120 min at 400°C	IPC TM 650, Method 2.2.4A ASTM D-5214-91
Heat Sealability	Not Heat Sealable		
Limiting Oxygen Index, %	37		ASTM D-2863-87
Solder Float	Pass		IPC TM 650, Method 2.4.13A
Smoke Generation	DM = <1	NBS Smoke Chamber	NFPA-258
Glass Transition Temperature (T_g)	A second order transition occurs in Kapton® between 360°C (680°F) and 410°C (770°F) and is assumed to be the glass transition temperature. Different measurement techniques produce different results within the above temperature range.		

Table 3
Physical and Thermal Properties of Kapton® Type VN Film

Property	Typical Value for Film Thickness				Test Method
	25 μm (1 mil)	50 μm (2 mil)	75 μm (3 mil)	125 μm (5 mil)	
Ultimate Tensile Strength, MPa (psi)	231 (33,500)	234 (34,000)	231 (33,500)	231 (33,500)	ASTM D-882-91
Ultimate Elongation, %	72	82	82	82	ASTM D-882-91
Tear Strength—Propagating (Elmendorf), N	0.07	0.21	0.38	0.58	ASTM D-1922-89
Tear Strength—Initial (Graves), N	7.2	16.3	26.3	46.9	ASTM D-1004-90
Folding Endurance (MIT), $\times 10^3$ cycles	285	55	6	5	ASTM D-2176-89
Density, g/cc or g/mL	1.42	1.42	1.42	1.42	ASTM D-1505-90
Flammability	94V-0	94V-0	94V-0	94V-0	UL-94 (2-8-85)
Shrinkage, %, 30 min at 150°C (302°F)	0.03	0.03	0.03	0.03	IPC TM 650 Method 2.2.4A
Limiting Oxygen Index, %	37	43	46	45	ASTM D-2863-87

Table 4
Physical Properties of Kapton® Type FN Film*

Property	Typical Value for Film Type**		
	120FN616	150FN019	250FN029
Ultimate Tensile Strength, MPa (psi)			
23°C (73°F)	207 (30,000)	162 (23,500)	200 (29,000)
200°C (392°F)	121 (17,500)	89 (13,000)	115 (17,000)
Yield Point at 3%, MPa (psi)			
23°C (73°F)	61 (9000)	49 (7000)	58 (8500)
200°C (392°F)	42 (6000)	43 (6000)	36 (5000)
Stress at 5% Elongation, MPa (psi)			
23°C (73°F)	79 (11,500)	65 (9,500)	76 (11,000)
200°C (392°F)	53 (8000)	41 (6000)	48 (7000)
Ultimate Elongation, %			
23°C (73°F)	75	70	85
200°C (392°F)	80	75	110
Tensile Modulus, GPa (psi)			
23°C (73°F)	2.48 (360,000)	2.28 (330,000)	2.62 (380,000)
200°C (392°F)	1.62 (235,000)	1.14 (165,000)	1.38 (200,000)
Impact Strength at 23°C (73°F), N·cm (ft·lb)	78 (0.58)	68.6 (0.51)	156.8 (1.16)
Tear Strength—Propagating (Elmendorf), N (lbf)	0.08 (0.02)	0.47 (0.11)	0.57 (0.13)
Tear Strength—Initial (Graves), N (lbf)	11.8 (2.6)	11.5 (2.6)	17.8 (4.0)
Polyimide, wt%	80	57	73
FEP, wt%	20	43	27
Density, g/cc or g/mL	1.53	1.67	1.57

*Test methods for **Table 4** are the same as for **Table 1**.

**Because a number of combinations of polyimide film and fluorocarbon coating add up to the same total gauge, it is necessary to distinguish among them. A three-digit system is used in which the middle digit represents the nominal thickness of the base Kapton® film in mils. The first and third digits represent the nominal thickness of the coating of Teflon® FEP fluoropolymer resin in mils. The symbol 9 is used to represent 13 μm (0.5 mil) and 6 to represent 2.5 μm (0.1 mil). Example: 120FN616 is a 120-gauge structure consisting of a 25 μm (1 mil) base film with a 2.5 μm (0.1 mil) coating of Teflon® on each side.

Electrical Properties

Electrical Properties

The most common electrical properties of Kapton® polyimide film of various gauges are shown in **Tables 6** and **7**. These values were measured at 23°C (73°F) and 50%

relative humidity. The effect of such factors as humidity, temperature, and frequency on these basic values can be found in **Table 9** and **Figures 11–13**.

Table 7
Typical Electrical Properties of Kapton® Type HN and VN Films

Property Film Gauge	Typical Value		Test Condition	Test Method
Dielectric Strength	V/ μ m (kV/mm)	(V/mil)		
25 μ m (1 mil)	303	(7700)	60 Hz	ASTM D-149-91 ^{e1}
50 μ m (2 mil)	240	(6100)	1/4 in electrodes	
75 μ m (3 mil)	205	(5200)	500 V/sec rise	
125 μ m (5 mil)	154	(3900)		
Dielectric Constant			1 kHz	ASTM D-150-92
25 μ m (1 mil)	3.4			
50 μ m (2 mil)	3.4			
75 μ m (3 mil)	3.5			
125 μ m (5 mil)	3.5			
Dissipation Factor			1 kHz	ASTM D-150-92
25 μ m (1 mil)	0.0018			
50 μ m (2 mil)	0.0020			
75 μ m (3 mil)	0.0020			
125 μ m (5 mil)	0.0026			
Volume Resistivity	Ω ·cm			ASTM D-257-91
25 μ m (1 mil)	1.5×10^{17}			
50 μ m (2 mil)	1.5×10^{17}			
75 μ m (3 mil)	1.4×10^{17}			
125 μ m (5 mil)	1.0×10^{17}			

Table 8
Typical Electrical Properties of Kapton® Type FN Film

Property	120FN616	150FN019	250FN029
Dielectric Strength, V/ μ m (V/mil)	272 (6900)	197 (5000)	197 (5000)
Dielectric Constant	3.1	2.7	3.0
Dissipation Factor	0.0015	0.0013	0.0013
Volume Resistivity, Ω ·cm at 23°C (73°F)	1.4×10^{17}	2.3×10^{17}	1.9×10^{17}
at 200°C (392°F)	4.4×10^{14}	3.6×10^{14}	3.7×10^{14}

Kapton® Film Type Information

Table 15
Type and Thickness

Type	Nominal Thickness		Area Factor	
	μm	mil	m ² /kg	ft ² /lb
30HN	7.6	0.3	93	455
50HN	12.7	0.5	56	272
75HN	19.1	0.75	37	181
100HN	25.4	1.0	28	136
200HN	50.8	2.0	14	68
300HN	76.2	3.0	9.2	45
500HN	127	5.0	5.5	27
50VN	12.7	0.5	56	272
75VN	19.1	0.75	37	181
100VN	25.4	1.0	28	136
200VN	50.8	2.0	14	68
300VN	76.2	3.0	9.2	45
500VN	127	5.0	5.5	27
100FN099	25.4	1.0	23	110
120FN616	30.5	1.2	21	104
150FN999	38.1	1.5	14	68
150FN019	38.1	1.5	16	77
200FN011	50.8	2.0	11	54
200FN919	50.8	2.0	11	54
250FN029	63.5	2.5	10	49
300FN021	76.2	3.0	8.0	39
300FN929	76.2	3.0	8.0	39
400FN022	101.6	4.0	5.5	27
400FN031	101.6	4.0	6.1	30
500FN131	127	5.0	4.7	23
600FN051	152.4	6.0	4.3	21

Nominal Construction, Type FN

In the Kapton® Type FN order code of three digits, the middle digit represents the nominal thickness of the base Kapton® in mils. The first and third digits represent the nominal thickness of the coating of Teflon® FEP fluoropolymer resin in mils. The symbol 9 is used to represent 12.7 μm (0.5 mil) and 6 to represent 2.54 μm

(0.1 mil). Example: 120FN616 is a 120-gauge structure consisting of a 25.4 μm (1 mil) base film with a 2.54 μm (0.1 mil) coating of Teflon® on each side. Illustrated in **Table 16** are several examples of the many film types available.

Table 16
Type FN Film Constructions

Type	Construction					
	FEP		HN		FEP	
	μm	mil	μm	mil	μm	mil
100FN099			12.7	0.50	12.7	0.50
120FN616	2.54	0.10	25.4	1.00	2.54	0.10
150FN999	12.7	0.50	12.7	0.50	12.7	0.50
150FN019			25.4	1.00	12.7	0.50
200FN011			25.4	1.00	25.4	1.00
200FN919	12.7	0.50	25.4	1.00	12.7	0.50
250FN029			50.8	2.00	12.7	0.50
300FN021			50.8	2.00	25.4	1.00
300FN929	12.7	0.50	50.8	2.00	12.7	0.50
400FN022			50.8	2.00	50.8	2.00
400FN031			76.2	3.00	25.4	1.00
500FN131	25.4	1.00	76.2	3.00	25.4	1.00
600FN051			127	5.00	25.4	1.00