



Universidade Federal
do Rio de Janeiro
Escola Politécnica

CARACTERIZAÇÃO DE FITAS SUPERCONDUTORAS 2G COM JUNTAS SOLDADAS

Leandro e Silva Alves

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

Orientador: Rubens de Andrade Junior

Coorientador: Flávio Goulart dos Reis Martins

Rio de Janeiro

Fevereiro de 2014

CARACTERIZAÇÃO DE FITAS
SUPERCONDUTORAS 2G COM JUNTAS
SOLDADAS

Leandro e Silva Alves

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE
DO CURSO 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.

Examinado por:

Prof. Rubens de Andrade Junior, D.Sc.

Eng. Flávio Goulart dos Reis Martins.

Prof. Felipe Sass, M.Sc.

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

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

FEVEREIRO DE 2014

Alves, Leandro e Silva

Caracterização de Fitas Supercondutoras 2G com Juntas Soldadas/
Leandro e Silva Alves. – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2014.

XII, 73 p.: il.; 29,7 cm

Orientadores: Rubens de Andrade Junior, Flávio Goulart dos Reis
Martins

Projeto de Graduação - UFRJ/ POLI/ Engenharia Elétrica, 2014.

Referências Bibliográficas: p. 64-65.

1. Caracterização de fitas supercondutoras. 2. Fitas 2G. 3. Resistividade de juntas soldadas. 4. Resistividade nula. 5. Soldagem. I. Junior, Rubens, *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Engenharia Elétrica. III. Caracterização de Fitas Supercondutoras 2G com Juntas Soldadas.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi fruto de muito esforço e dedicação para promover uma pequena contribuição no desenvolvimento tecnológico de nosso amado país. Estou grato aos que me deram esta oportunidade de estudar na Escola Politécnica da UFRJ na qual me sinto muito honrado e de atuar num dos ramos do conhecimento mais importantes da humanidade que é a engenharia elétrica, a qual tanto amo e creio que fui vocacionado.

O que pode ser possível para uns, pode ser impossível para outros, mas sou primeiramente grato a Deus pelo dom da vida e a quem pertence toda a sabedoria e todo o querer. Em segundo lugar, sou grato aos meus pais, Débora e Erivaldo, que investiram e acreditaram em mim, me dando o máximo que puderam. Muito obrigado por este amor que me deu a oportunidade de adquirir um dos bens mais valiosos que é o conhecimento. Agradeço à minha esposa, Janaína, que juntamente com minha sogra, me apoiaram nestes últimos períodos da minha graduação. Sou grato ao professor Rubens de Andrade Jr. por ter sido meu orientador neste trabalho, por ter me dado esta oportunidade acreditando no meu potencial. Agradeço não só pelo conhecimento que ele me passou, como também, por sua simpatia e humildade que foram para mim de grande valor. Aos meus coorientadores, Felipe Sass, M.Sc., que sempre esteve me acompanhando e me orientando em todas as minhas atividades no LASUP e o mestrando Flávio Goulart que me orientou e fez a revisão deste trabalho. Aos engenheiros mecânicos do LASUP, Felipe Costa e Cássia, que me ajudaram com projetos que foram utilizados em partes deste trabalho. Ao corpo de técnicos da oficina do LASUP pela usinagem das peças que foram usadas neste trabalho. Agradeço a FAPERJ pelo financiamento que nos proporcionou neste projeto e ao CEPEL pelo fornecimento da liga de Índio-Estanho. Não poderia também me esquecer do professor Renato Motta e Carolina Motta do laboratório de Engenharia Mecânica do PEM da Poli-UFRJ que me permitiram a utilização da prensa térmica, muito obrigado pela amizade. Sou grato aos professores que com dedicação e paciência passaram o conhecimento. Obrigado pela simpatia e companheirismo de todos os meus amigos e colegas de cada momento desta jornada. Os meus agradecimentos a todos que fizeram e fazem parte da minha vida.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Caracterização de Fitas Supercondutoras 2G com Juntas Soldadas

Leandro e Silva Alves

Fevereiro/2014

Orientador: Rubens de Andrade Junior

Coorientador: Flávio Goulart dos Reis Martins

Curso: Engenharia Elétrica

No presente trabalho é proposta a caracterização de fitas supercondutoras de alta temperatura crítica (High Temperature Superconductors - HTS) SCS4050 da SuperPower Inc., com juntas soldadas com ligas metálicas de baixo ponto de fusão. O objetivo é garantir a menor resistência elétrica possível nas junções, assegurando a repetibilidade do processo de junção das fitas e preservando as suas propriedades supercondutoras. Foram utilizados diferentes métodos de soldagem: o primeiro foi feito manualmente com a ponteira de uma solda eletrônica, o segundo através de um dispositivo aquecedor com resistências em cartucho e o terceiro utilizando uma prensa térmica com controle de pressão e temperatura. Para cada fita emendada de acordo com um método de soldagem, foi feita a caracterização elétrica através do teste de corrente pulsada de curta duração nas condições de temperatura do nitrogênio líquido.

Palavras-chave: fitas supercondutoras, caracterização elétrica, soldagem de fitas 2G, resistividade elétrica de ligas, magnetos supercondutores.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Electrical Engineer.

Characterization of 2G superconducting tapes with welded joints

Leandro e Silva Alves

February/2014

Advisor: Rubens de Andrade Junior

Co-advisor: Flávio Goulart dos Reis Martins

Course: Electrical Engineering

In this work we propose the characterization of Superpower Inc. SCS4050 2G superconducting wires, with welded joints containing alloys of low melting point. The goal is to ensure the lowest possible electrical resistance in the joints, ensuring wires' junction process repeatability and preserving their superconducting properties. We used different welding methods: the first was done manually with the tip of a welding machine, the second via a cartridge resistors heater device and third using a thermal press with controlled pressure and temperature. For each tape amended according to each welding method, a characterization was performed, by testing electric current pulse of short duration in liquid nitrogen temperature.

Keywords: superconducting tapes, electrical characterization, welding strips 2G, electrical resistivity of alloys, superconducting magnets.

Sumário

1. Introdução	1
1.1. Motivação	1
1.2. Supercondutores	2
1.2.1. Histórico	3
1.2.2. Fenômeno da supercondutividade	7
1.2.2.1. Resistividade nula	7
1.2.2.2. Efeito <i>Meissner</i>	8
1.2.2.3. Tipos de supercondutores	10
1.2.2.4. Dinâmica dos vórtices	14
2. Fitas supercondutoras 2G	16
3. Métodos de soldagem	20
3.1. Soldagem manual	20
3.2. Soldagem com dispositivo aquecedor	25
3.3. Soldagem com prensa térmica	29
4. Caracterização das fitas 2G soldadas	37
4.1. Equipamentos, dispositivos e instrumentos de medição	38
4.2. Processo de caracterização	41
4.3. Ensaios	50
5. Conclusões	61
6. Referências bibliográficas	64
7. Anexo	66
7.1. Manual de instruções de soldagem	66
7.2. Fitas 2G	67
7.3. Manual da Prensa Térmica	71

Índice de figuras

Figura 1 - Comparação do comportamento da resistividade dos metais com a dos supercondutores metálicos. Figura adaptada de (SASS, 2011)	4
Figura 2 – Transição supercondutora do $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ medida (WU <i>et al.</i> , 1987). Figura adaptada de (BERCHON,2013)	6
Figura 3 – Evolução da temperatura crítica máxima dos supercondutores. Figura adaptada de (BERCHON,2013)	7
Figura 4 – (a) Comportamento do fluxo magnético em um supercondutor na fase normal. (b) Expulsão do fluxo magnético no interior de um supercondutor (efeito <i>Meissner</i>). Figura adaptada de (BERCHON,2013)	9
Figura 5 – (a) O fluxo magnético atravessa o interior de um hipercondutor quando a temperatura está acima da temperatura crítica e a resistência elétrica é diferente de zero. (b) O fluxo magnético atravessa o interior de um hipercondutor quando a temperatura está abaixo da temperatura crítica e a resistência elétrica é nula. Figura adaptada de (BERCHON,2013)	9
Figura 6 – O comportamento (a) da indução magnética em função do campo aplicado; (b) da magnetização em função do campo aplicado e (c) do campo aplicado em função da temperatura para supercondutores do tipo I. Figura adaptada de (BERCHON,2013)	10
Figura 7 – O comportamento (a) da indução magnética em função do campo aplicado; (b) da magnetização em função do campo aplicado e (c) do campo aplicado em função da temperatura para supercondutores do tipo II. Figura adaptada de (BERCHON,2013)	11
Figura 8 – (a) Estrutura de vários vórtices no interior do supercondutor do tipo II. (b) Vista superior de um vórtice. Figura adaptada de (BERCHON,2013)	12
Figura 9 – Arranjo hexagonal de vórtices num supercondutor do tipo II no estado misto. Figura adaptada de (BERCHON,2013)	13

Figura 10 – Ação de forças sobre um fluxóide através de uma densidade de corrente. Figura adaptada de (Martins, 2012)	15
Figura 11 – Temperatura crítica do $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ em função da concentração do oxigênio. Figura adaptada de (BERCHON, 2013)	17
Figura 12 – Esquema estrutural da fita 2G HTS SCS4050 da Superpower em corte laminar (Referência: Anexo)	18
Figura 13 – Ilustração dos dois possíveis tipos de junções ou emendas de acordo com o fabricante (<i>Soldering Instructions</i> , da Superpower)	21
Figura 14 - Ilustração de uma junção centralizada	21
Figura 15 – Carretel de fita supercondutora 2G SCS4050 da Superpower	22
Figura 16 – Recipiente contendo Sílica Gel e os segmentos de fitas 2G soldados	23
Figura 17 – Foto da estação de solda modelo TS-9800 da Toyo	24
Figura 18 – Foto de uma amostra de dois segmentos de fita 2G SCS4050 da Superpower, com 110 mm de comprimento cada segmento, unidos pela liga de 52%In – 48%Sn com 50 mm de comprimento. A emenda foi feita pelo método de soldagem manual	25
Figura 19 – Dispositivo aquecedor com resistências cilíndricas em cartucho projetado por (SASS, 2011)	26
Figura 20 – (a) Termovisor da marca Flir, (b) Display do termovisor focalizando o dispositivo sendo aquecido	27
Figura 21 – Amostra submetida ao método de soldagem com dispositivo aquecedor durante 3 min	29
Figura 22 – Amostra submetida ao método de soldagem com dispositivo aquecedor durante 2 min	29
Figura 23 – Fotos da prensa térmica com as indicações de seus principais componentes e uma amostra inserida. Prensa térmica PLS 150 da Metalnox do PEM (Laboratório de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da UFRJ)	30

Figura 24 – Compressor da marca ERBON. Equipamento do PEM, Laboratório de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da UFRJ	31
Figura 25 – Um fio de liga 52%In – 48%Sn sendo laminado manualmente	31
Figura 26 – Imagem de uma amostra de dois segmentos de fita 2G HTS SCS4050 da Superpower totalmente sobrepostos tendo entre eles uma liga laminada de 52%In - 48%Sn com 60 mm de comprimento. A amostra está preste a ser aquecida e pressionada pela chapa metálica superior da prensa térmica	33
Figura 27 – Blocos de Alumínio postos nas extremidades para alinhamento dos segmentos de fita 2G e para dissipação de energia térmica dos segmentos quando aquecidos	34
Figura 28 – Ilustração comparativa dos métodos de soldagem com prensa térmica. a) Ilustração de um fio de 52%In – 48%Sn laminado sobre um segmento de fita 2G; b) Ilustração de uma liga de 52%In – 48%Sn fundida sobre um segmento de fita 2G, neste caso a amostra apresenta vacâncias; c) Ilustração de uma liga de 52%In – 48%Sn fundida sobre um segmento de fita 2G, neste caso foi feita a pré-soldagem com a ponteira achatada de uma estação de solda	35
Figura 29 – Esboço da curva tensão versus corrente para um segmento supercondutor de fita 2G	37
Figura 30 – Esboço da curva tensão versus corrente de dois segmentos supercondutores de fita 2G soldados com um liga metálica	38
Figura 31 – Cordoalhas de aço com 0,50 m de comprimento e 21,0 mm de largura, envolvidas por um isolante térmico (Kapton). Figura adaptada de (MARTINS, 2012)	39
Figura 32 – Nanovoltímetro Keithley 2182A sobre a fonte de corrente Agilent 6671A do LASUP	40
Figura 33 – Placa de aquisição e adaptador GPIB-USB Keithley KUSB-488B. Figura adaptada de (MARTINS, 2012)	41
Figura 34 – Foto do suporte para as amostras. Criado pela equipe do LASUP	42

Figura 35 – Suporte adaptado com placa de policarbonato para medições sem soldagem dos terminais do nanovoltímetro	43
Figura 36 – Foto do suporte adaptado imerso em nitrogênio líquido	44
Figura 37 – Foto de uma tira de folha de Índio entre a extremidade de um segmento de fita 2G e a barra de cobre	45
Figura 38 – Painel de Configuração do programa em Labview	46
Figura 39 – Painel de Entrada de Dados do programa em Labview	47
Figura 40 - Ilustração de uma sequência de pulsos de corrente mostrando a relação entre Δt , NTD e o intervalo de tempo total Δt_{TOTAL} em que a corrente é nula	47
Figura 41 – Painel de Ensaio do programa em Labview	49
Figura 42 – Exemplo de arquivo de texto com os dados de ensaio gerado pelo programa em Labview	49
Figura 43 – Curvas Características da emenda de 50 mm confeccionada pelo MM e plotadas para cada NTD	50
Figura 44 – Curvas Características da emenda de 70 mm confeccionada pelo MM e plotadas para cada Δt	52
Figura 45 - Uma ilustração de um gráfico típico $V \times I$ de emendas de fitas 2G	54
Figura 46 – Curvas Características de uma emenda de 60 mm (Amostra 1) confeccionada pelo MDA e plotadas para cada Δt	55
Figura 47 – Curvas Características da emenda de 60 mm (Amostra 2) confeccionada pelo MDA e plotadas para cada Δt	57
Figura 48 – Gráficos das Curvas Características das Amostras confeccionadas pelo MPT e plotadas de acordo com os parâmetros de ensaio da Tabela 5	60
Figura 49 – (a) Ilustração de emendas com junções em ponte, (b) Ilustração em corte longitudinal das junções em ponte. Figura adaptada de (ITO, KAWAI, <i>et al.</i> , 2006)	62

Índice de tabelas

Tabela 1 – Relação entre a resistência elétrica (R) da emenda de 50 mm, feita pelo MM, e o número de intervalos de tempo de descanso (NTD)	51
Tabela 2 – Relação entre resistência elétrica (R) e intervalo de tempo entre aquisições (Δt) para uma emenda de 70 mm feita pelo MM	53
Tabela 3 – Relação entre resistência elétrica (R) e intervalo de tempo entre aquisições (Δt) da Amostra 1 com emenda de 60 mm feita pelo MDA	54
Tabela 4 – Relação entre resistência elétrica (R) e intervalo de tempo entre aquisições (Δt) da Amostra 2 de 60 mm feita pelo MDA	56
Tabela 5 – Relação entre resistência elétrica (R) das emendas feitas pelo MPT e os parâmetros de ensaio e confecção das emendas	58

1. Introdução

A pesquisa de materiais supercondutores tem evoluído ao longo dos anos, desde que Kamerlingh ONNES (1911) descobriu que o metal mercúrio apresentava resistividade nula, quando imerso em hélio liquefeito, a uma temperatura inferior a 4,2 K. Hoje, além do mercúrio e de outros metais, há diversos materiais que são supercondutores a temperaturas cada vez maiores, dentre compostos metálicos, cerâmicos e orgânicos. Os supercondutores são, em sua maioria, utilizados pra fins de pesquisa, e seu uso ainda não é muito difundido em termos de mercado. A aplicação comercial que existe atualmente é em eletromagnetos de ressonância magnética. As fitas supercondutoras comerciais da chamada segunda geração (2G), por exemplo, possuem um filme de $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (YBCO) depositado sobre substrato, que geralmente é uma superliga, envolvido por finas camadas metálicas (cobre e prata), podendo ser empregadas em diversas pesquisas científicas, em projetos de engenharia, na construção de diversos dispositivos como parte de máquinas elétricas supercondutoras (PEI, *et al.*, 2009), veículos de levitação magnética (NICOLSKY, *et al.*, 2000, OGATA, MIYAZAKI, *et al.*, 2010), limitadores de corrente de curto-circuito (BALDAN, LAMAS, *et al.*, 2009) e outros mais. Para cada tipo de aplicação, emprega-se um tipo de fita 2G que atenda às especificações do projeto. Há aplicações em que há a necessidade de se fazer junções entre as fitas através de emendas soldadas com ligas de baixo ponto de fusão. Alguns fatores físicos e químicos podem comprometer as propriedades supercondutoras das fitas 2G quando se usa a técnica de soldagem e a imersão das fitas 2G no nitrogênio líquido, a saber: aquecimento excessivo na soldagem, deflexões das fitas no seu manuseio e corrosão da camada metálica superficial da fita devido à formação de água quando as fitas são retiradas do nitrogênio líquido. Uns dos principais problemas é a sensibilidade térmica e mecânica das fitas 2G. Devido a esses problemas citados, alguns cuidados devem ser tomados e eles serão descritos neste trabalho.

1.1. Motivação

O presente trabalho visa a obtenção de emendas de fitas 2G com a qualidade necessária para as aplicações no Laboratório de Aplicação de Supercondutores da EP/COPPE/UFRJ (LASUP). O objetivo é a garantia de resistência elétrica abaixo de

30 nΩ nas junções das fitas e uma resistência mecânica às trações na confecção de bobinas. A intenção é que este trabalho produza resultados satisfatórios para que num trabalho futuro possam ser construídas bobinas supercondutoras como componentes de motores elétricos e dentre outras aplicações. Para este fim, foram desenvolvidos três métodos de soldagem e um processo de caracterização das fitas 2G, sendo escolhido o método com melhor repetibilidade. Para melhor entendimento do presente trabalho, no capítulo 1, foi relatada a evolução dos supercondutores e abordados os conceitos e teorias relativos ao fenômeno da supercondutividade. Já no capítulo 2, foram apresentadas as informações sobre a estrutura e as propriedades das fitas 2G utilizadas nesse trabalho. No capítulo 3, há a descrição dos métodos de soldagem adotados mostrando vantagens e desvantagens que cada método possui na confecção das emendas. No capítulo 4, apresenta-se a explicação do processo de caracterização das fitas 2G emendadas com ligas de baixo ponto de fusão bem como sua descrição. No mesmo capítulo, mostram-se os dados experimentais e as análises dos dados obtidos através da caracterização para cada fita 2G emendada de acordo com cada método adotado. Por fim, no último capítulo, apresenta-se a melhor solução, não só em termos das grandezas físicas como resistência elétrica e mecânica, mas a garantia da repetibilidade do processo de junção das fitas 2G.

1.2. Supercondutores

Desde 1911, ano em que foi descoberto o fenômeno da supercondutividade, os cientistas de todo o mundo têm pesquisado e encontrado outros materiais supercondutores. Essa necessidade de busca por novos supercondutores se justifica pela esperança de se descobrir um material que apresente a supercondutividade a uma temperatura que possibilite a minimização dos custos com a refrigeração em que esses materiais são submetidos, a fim de torná-los melhor viáveis economicamente. Esta seção é dividida em duas subseções, na primeira subseção, há um breve relato histórico dos principais eventos que determinaram a evolução dos supercondutores. Na subseção seguinte, há uma descrição dos principais conceitos e teorias sobre o fenômeno da supercondutividade. Vale destacar algumas teorias e propriedades que contribuem para a compreensão de alguns detalhes do presente trabalho, como por exemplo, a resistividade nula, o efeito *Meissner*, os tipos de supercondutores, a dinâmica dos vórtices e as propriedades eletromagnéticas e termodinâmicas dos

supercondutores vistas nas teorias de LONDON e LONDON (1935) e GINZBURG e LANDAU (1950) também ajudarão a entender o comportamento das fitas 2G supercondutoras usadas neste trabalho, pois elas são submetidas a diversas condições físicas.

1.2.1. Histórico

No início do século passado, o físico holandês Heike Kamerlingh Onnes (1853-1926) dedicava-se à liquefação do hélio para obter temperaturas próximas do zero absoluto – ou zero grau Kelvin (0 K). Ele conseguiu a façanha em 1908, obtendo a temperatura de 4,2 K, o que lhe valeu o Prêmio Nobel de Física de 1913. A motivação para a obtenção de temperaturas tão baixas era, principalmente, o estudo da resistência elétrica dos metais em função da temperatura. De acordo com o conhecimento da época, para levar adiante esses estudos seria preciso usar amostras metálicas de alta pureza. A purificação de metais não era e continua não sendo uma tarefa fácil. Então, optou-se pelo mercúrio por ser um metal líquido à temperatura ambiente, tornando-se mais fácil a sua purificação. Assim, Onnes colocou um tubo capilar contendo mercúrio no hélio líquido e mediu-se a resistência elétrica do metal em função da temperatura. Na temperatura de 4,2 K a resistência era tão pequena que não podia ser medida. O fenômeno foi chamado de ‘supracondução’, termo usado por Onnes pela primeira vez. O fenômeno de supracondução ou supercondutividade se apresentava em outros metais, mesmo com impurezas, como por exemplo, o chumbo, descoberto por Onnes em 1913, quando submetido a temperatura de 7,2 K. A temperatura a partir da qual o material apresentava resistência elétrica nula foi chamada de temperatura crítica (T_c), sendo a resistividade nula uma das propriedades do estado supercondutor.

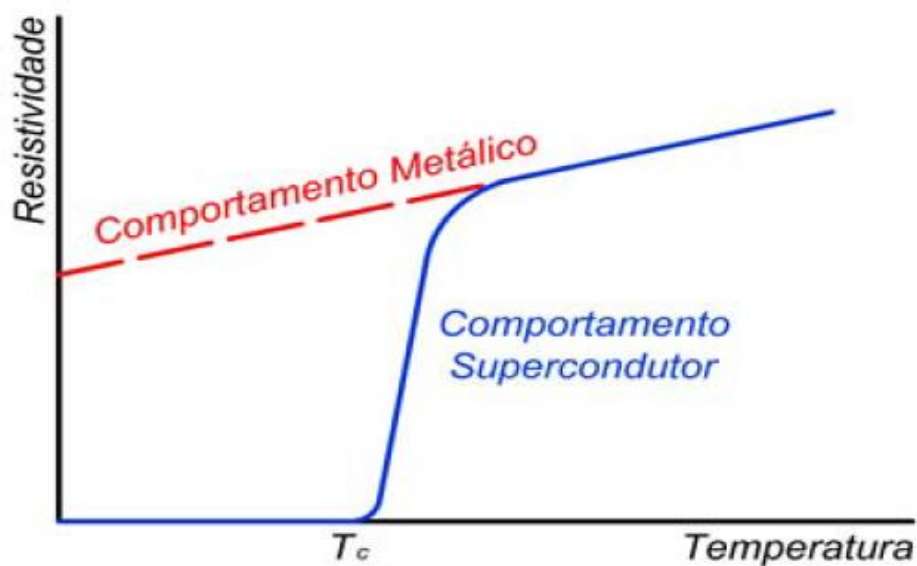


Figura 1 – Comparação do comportamento da resistividade dos metais com a dos supercondutores metálicos. Figura adaptada de (SASS, 2011).

Daí surge uma nova área de estudos da Física da Matéria Condensada que atraiu interesse de vários pesquisadores. Em 1933, Meissner e Ochsenfeld, descobriram outra importante propriedade de um material no estado supercondutor: o diamagnetismo perfeito. Eles descobriram que um campo magnético externo aplicado em um material no estado supercondutor é expulso de seu interior. Essa propriedade passou a ser chamada de Efeito Meissner-Ochsenfeld.

Todas as descobertas sobre as propriedades da supercondutividade foram descobertas através de experimentos, não havia uma teoria para explicar o fenômeno. Até que em 1935, surgiu a primeira formulação que foi capaz de explicar o efeito Meissner. Trata-se de um modelo clássico para descrever a ausência de campo magnético no interior de um material supercondutor na presença de um campo magnético externo, conhecido como teoria de London criada pelos irmãos London. A teoria tem como base as equações de Maxwell do eletromagnetismo e algumas suposições adicionais em relação aos elétrons responsáveis pelo efeito da supercondutividade. Porém, a teoria falha quando tenta explicar a penetração de fluxo quantizada nos supercondutores de Tipo II. O modelo de London não prevê o efeito Meissner parcial. Daí surge uma teoria fenomenológica, baseada em observações experimentais e alguns pressupostos que não podiam ser demonstrados através de princípios na época, mas que descreve satisfatoriamente as propriedades dos supercondutores tanto os submetidos como os não submetidos a campo magnético

externo. É a chamada teoria de Ginzburg-Landau formulada pelos físicos L.D. Landau e V.L. Ginzburg em 1950, como uma adaptação da teoria de Landau para transições de fases. A teoria tenta explicar a termodinâmica da transição entre os estados normal e supercondutor. Em 1957, Bardeen, Cooper e Schrieffer propõem uma teoria microscópica para a supercondutividade, conhecida como teoria BCS, onde é assumida a formação de pares de elétrons ligados que formam a supercorrente e a existência de um gap de energia entre os estados normal e supercondutor. Os resultados de Ginzburg e Landau são bem descritos no formalismo da teoria BCS. A teoria BCS ficou limitada a explicar apenas a supercondutividade em supercondutores com temperatura crítica de até 35 K. No mesmo ano, utilizando-se da teoria de Ginzburg-Landau, ABRIKOSOV (1957) mostra que existe uma segunda classe de supercondutores onde um campo magnético suficientemente forte pode penetrar na amostra como tubos de fluxo quantizado que tomam a forma de linhas de vórtice. A minimização da energia de interação entre os vórtices mostra um estado de equilíbrio em forma de uma rede triangular (ou hexagonal) denominada rede de Abrikosov. Esses novos supercondutores são chamados de supercondutores do tipo II. Os supercondutores do tipo II possuem uma ampla região no diagrama de fases onde o campo magnético externo penetra no interior do material formando o que foi chamado de estado misto. Devido à inviabilidade econômica dos supercondutores encontrados até então, havia a necessidade de se ter supercondutores com temperaturas críticas mais elevadas. O descobrimento em 1986 dos supercondutores de alta temperatura crítica despertou um grande interesse pela física dos vórtices. WU *et al.* (1987) descobriram um composto que se tornava supercondutor a uma temperatura acima da temperatura de ebulição do nitrogênio, apresentando transição da fase normal para a fase supercondutora aos 90 K.

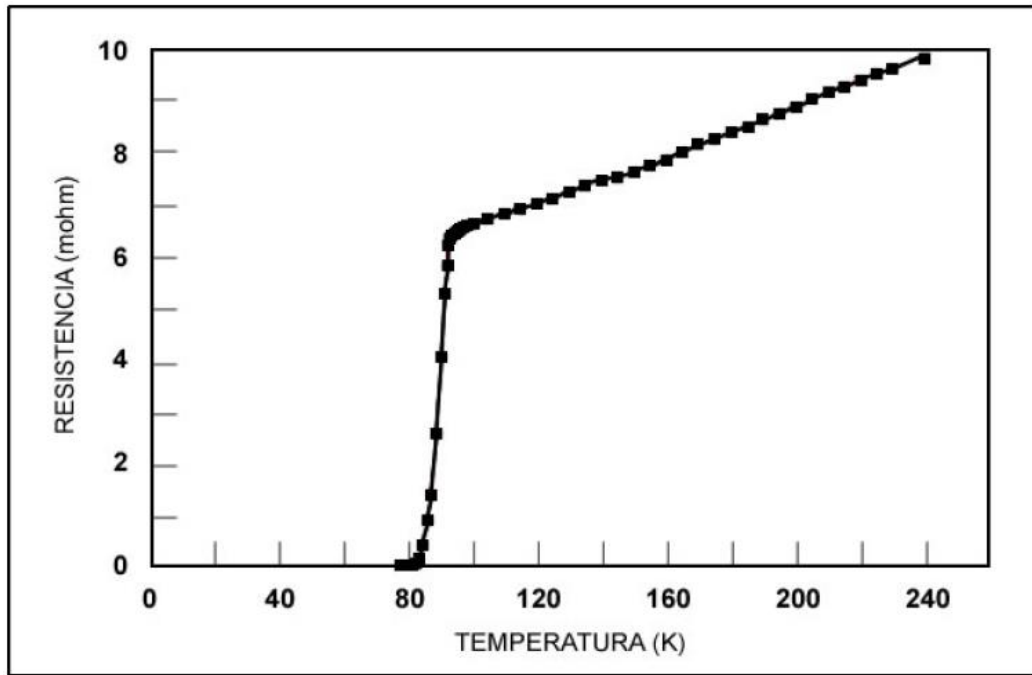


Figura 2 – Transição supercondutora do $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ medida (WU *et al.*, 1987). Figura adaptada de (BERCHON,2013).

Depois da descoberta do $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (YBCO), outros materiais com temperatura crítica ainda mais elevadas foram encontrados, como é o caso do $\text{Tl}_2\text{Ca}_2\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ que apresenta supercondutividade em 125 K e o $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_z$ em 135 K. A figura 3 mostra o aumento da temperatura crítica em relação ao tempo, onde se percebe que com a descoberta dos supercondutores de alta temperatura crítica houve uma significativa evolução na temperatura de transição, ultrapassando a temperatura de liquefação do nitrogênio.

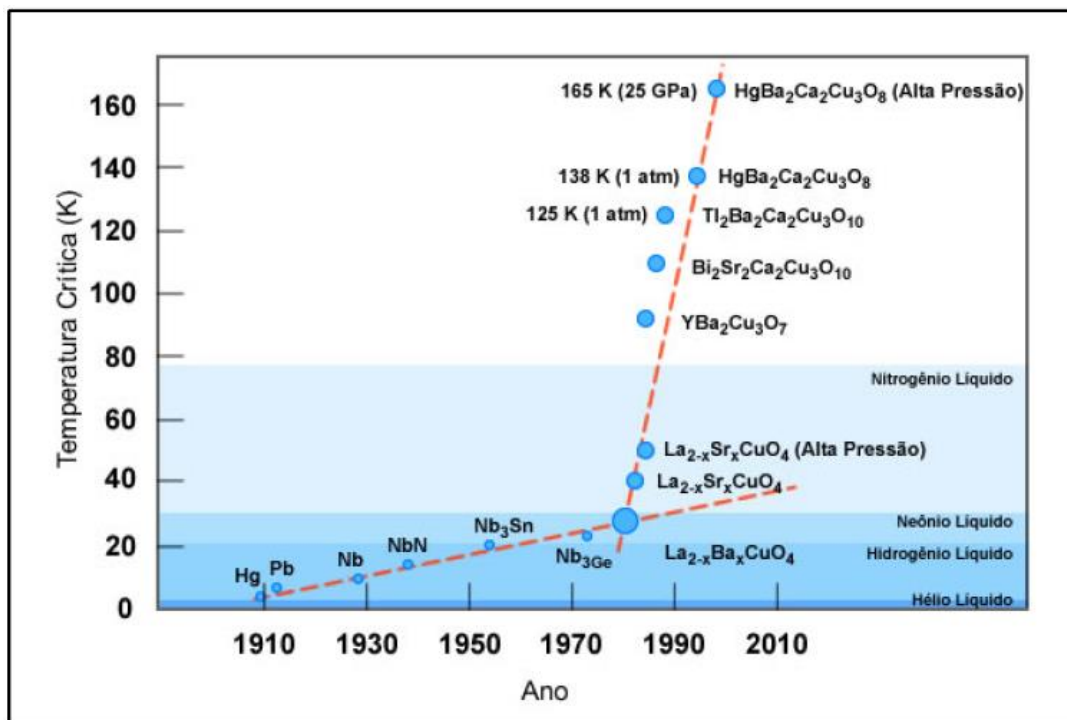


Figura 3 – Evolução da temperatura crítica máxima dos supercondutores. Figura adaptada de (BERCHON,2013).

1.2.2. Fenômeno da supercondutividade

Nesta seção é feita uma breve menção dos principais efeitos, conceitos e teorias relacionados ao fenômeno da supercondutividade.

1.2.2.1. Resistividade nula

A primeira propriedade descoberta que caracterizou a supercondutividade foi a de que todo material supercondutor, quando resfriado e atingindo determinada temperatura, a resistência elétrica caía abruptamente para valores próximos de zero. Quando o material supercondutor se encontra em condições propícias a apresentar resistividade nula, a corrente elétrica que circular por ele será tida como corrente

persistente, pois, neste caso, não haveria o efeito Joule devido ao fato de a resistência elétrica ser nula. A intensidade da corrente persistente seria constante, não decaindo com o tempo. O condutor que apresentasse essa propriedade seria tido como um condutor ideal (hipercondutor) que é diferente de um supercondutor. A diferença está no fato de que a resistência elétrica de um hipercondutor decai suavemente a zero quando a temperatura tende a 0 K, já num supercondutor, a resistência cai bruscamente a zero quando se atinge a temperatura crítica, além disso, o supercondutor apresenta o efeito Meissner e o hipercondutor não apresenta esse efeito como veremos mais adiante.

1.2.2.2. Efeito Meissner

Um material supercondutor apresenta outra propriedade característica do estado, além da propriedade de resistividade nula. Trata-se da expulsão total (Tipo I) ou parcial (Tipo II) do fluxo magnético do interior do material supercondutor quando este se encontra na presença de um campo magnético externo. Esse efeito é conhecido por efeito *Meissner*. Ao resfriar este material abaixo da temperatura crítica, esse passa para o estado supercondutor e correntes elétricas superficiais serão induzidas na superfície do material na presença de campo magnético externo. Estas correntes superficiais produzem um campo magnético com a mesma intensidade, porém de sentido contrário ao campo externo, cancelando o fluxo magnético no interior do material, como pode ser visto na Figura 4 (b). Desta forma os supercondutores comportam-se como diamagnetos perfeitos.

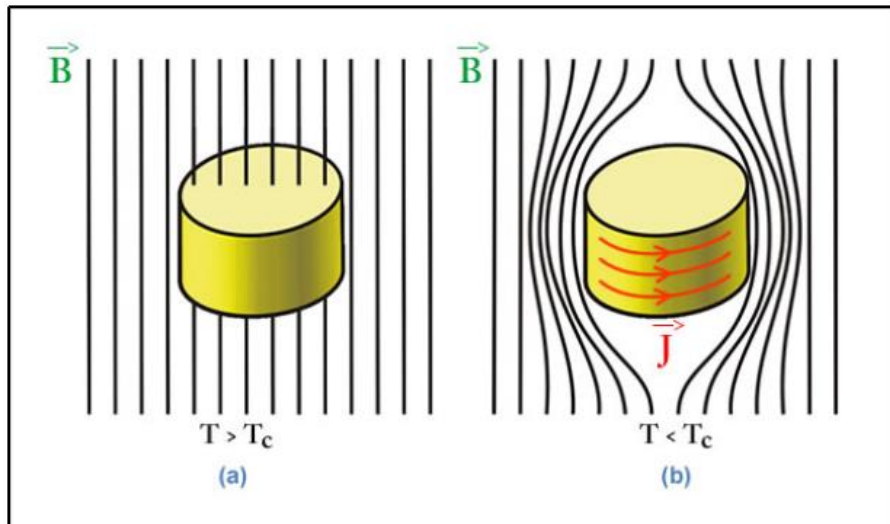


Figura 4 – (a) Comportamento do fluxo magnético em um supercondutor na fase normal. (b) Expulsão do fluxo magnético no interior de um supercondutor (efeito *Meissner*). Figura adaptada de (BERCHON, 2013).

Um condutor ideal na presença de um campo magnético externo se comportaria de forma diferente como podemos verificar através da figura a seguir:

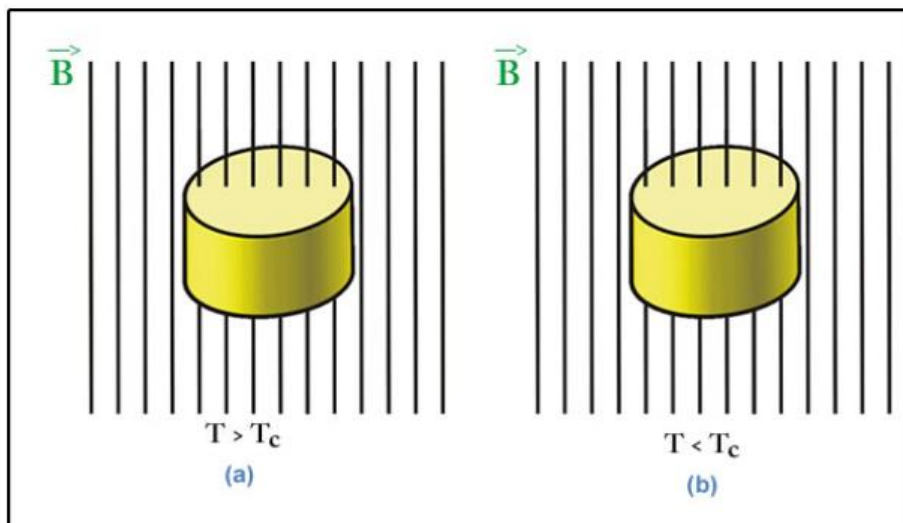


Figura 5 – (a) O fluxo magnético atravessa o interior de um hipercondutor quando a temperatura está acima da temperatura crítica e a resistência elétrica é diferente de zero. (b) O fluxo magnético atravessa o interior de um hipercondutor quando a temperatura está abaixo da temperatura crítica e a resistência elétrica é nula. Figura adaptada de (BERCHON,2013).

O efeito é obtido em todos supercondutores desde que sejam aplicados campos magnéticos suficientemente fracos sobre eles. A resposta desses materiais à presença de campo magnético indica a sua classificação: supercondutores do tipo I ou supercondutores do tipo II.

1.2.2.3. Tipos de supercondutores

Um supercondutor pode ser classificado como um supercondutor do tipo I ou do tipo II. O supercondutor do tipo I pode apresentar dois estados: o estado normal ou o estado supercondutor com o efeito *Meissner*. Aplica-se um campo magnético sobre o material e dependendo do valor da temperatura, o material estará em um desses dois estados. A fronteira entre esses dois estados depende do valor do campo magnético crítico (H_c) que depende da temperatura, ver Figura. Abaixo de H_c a expulsão do fluxo magnético é total e para campos maiores que H_c o estado supercondutor é totalmente suprimido. Geralmente, o valor de H_c é muito fraco, o que mostra a pouca aplicação para esse tipo de supercondutor. A maioria dos elementos metálicos são supercondutores do tipo I.

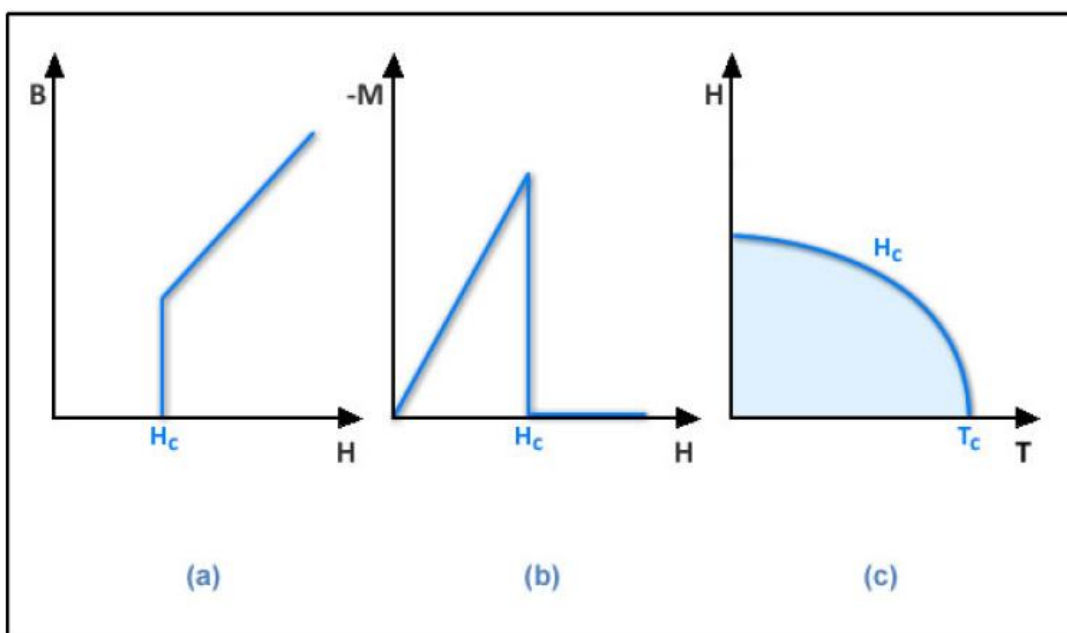


Figura 6 – O comportamento (a) da indução magnética em função do campo aplicado; (b) da magnetização em função do campo aplicado e (c) do campo aplicado em função da temperatura para supercondutores do tipo I. Figura adaptada de (BERCHON,2013).

Já no supercondutor do tipo II pode ser observado não só os estados que o supercondutor do tipo I apresenta como também um terceiro estado que é chamado de estado misto. O estado misto é caracterizado com a observância de uma penetração parcial de fluxo magnético no interior do material, ou seja, ocorre a supercondutividade, porém com parte do fluxo magnético no interior do material. Podemos também dizer que ocorre o efeito *Meissner* de forma incompleta. Para campos magnéticos aplicados abaixo do valor do campo magnético crítico H_{C2} o material estaria no estado supercondutor apresentando o efeito *Meissner*, para um campo aplicado entre os valores dos campos magnéticos críticos H_{C1} e H_{C2} o material estaria no estado misto e para campos aplicados acima do valor de H_{C2} o material estaria no estado normal. As fronteiras que dividem os estados são os campos críticos que dependem da temperatura.

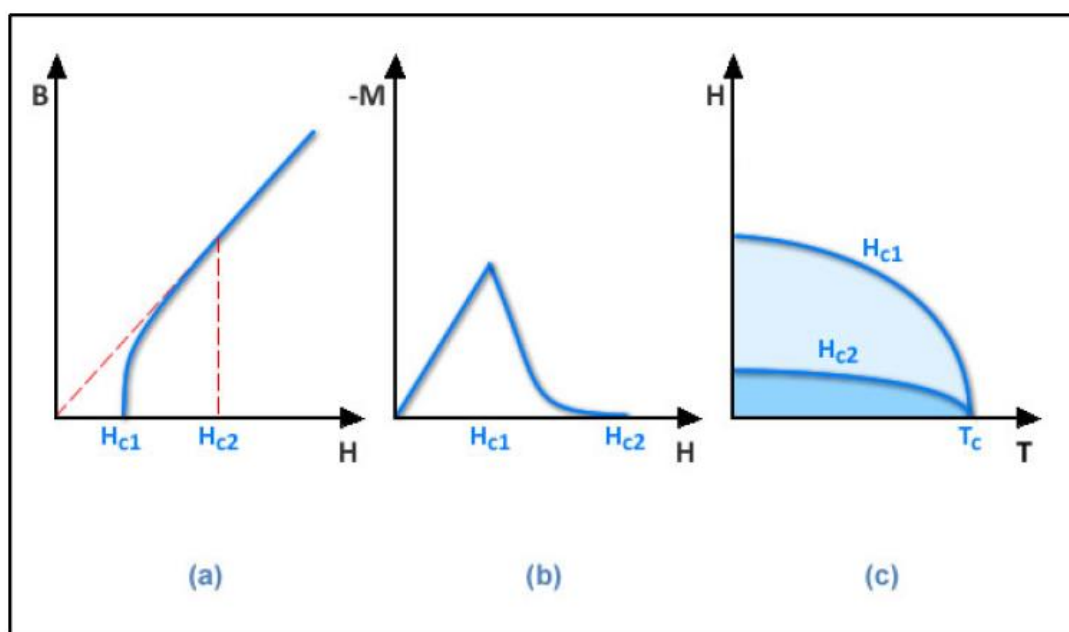


Figura 7 – O comportamento (a) da indução magnética em função do campo aplicado; (b) da magnetização em função do campo aplicado e (c) do campo aplicado em função da temperatura para supercondutores do tipo II. Figura adaptada de (BERCHON,2013).

No estado misto, a penetração do fluxo ocorre na forma de vórtices, ou fluxóides, que apresentam a estrutura de um núcleo cilíndrico circundado por supercorrentes de blindagem. A orientação dos fluxóides é paralela às linhas de

indução magnética e no núcleo de cada vórtice o material apresenta estado normal, veja Figura 8. Cada vórtice é atravessado por apenas um quantum de fluxo magnético que é dado por:

$$\varphi_0 = \frac{\hbar}{2e} = 2,068 \cdot 10^{-15} \text{ Wb}$$

, em que \hbar é a constante de *Planck* e e é a carga elementar.

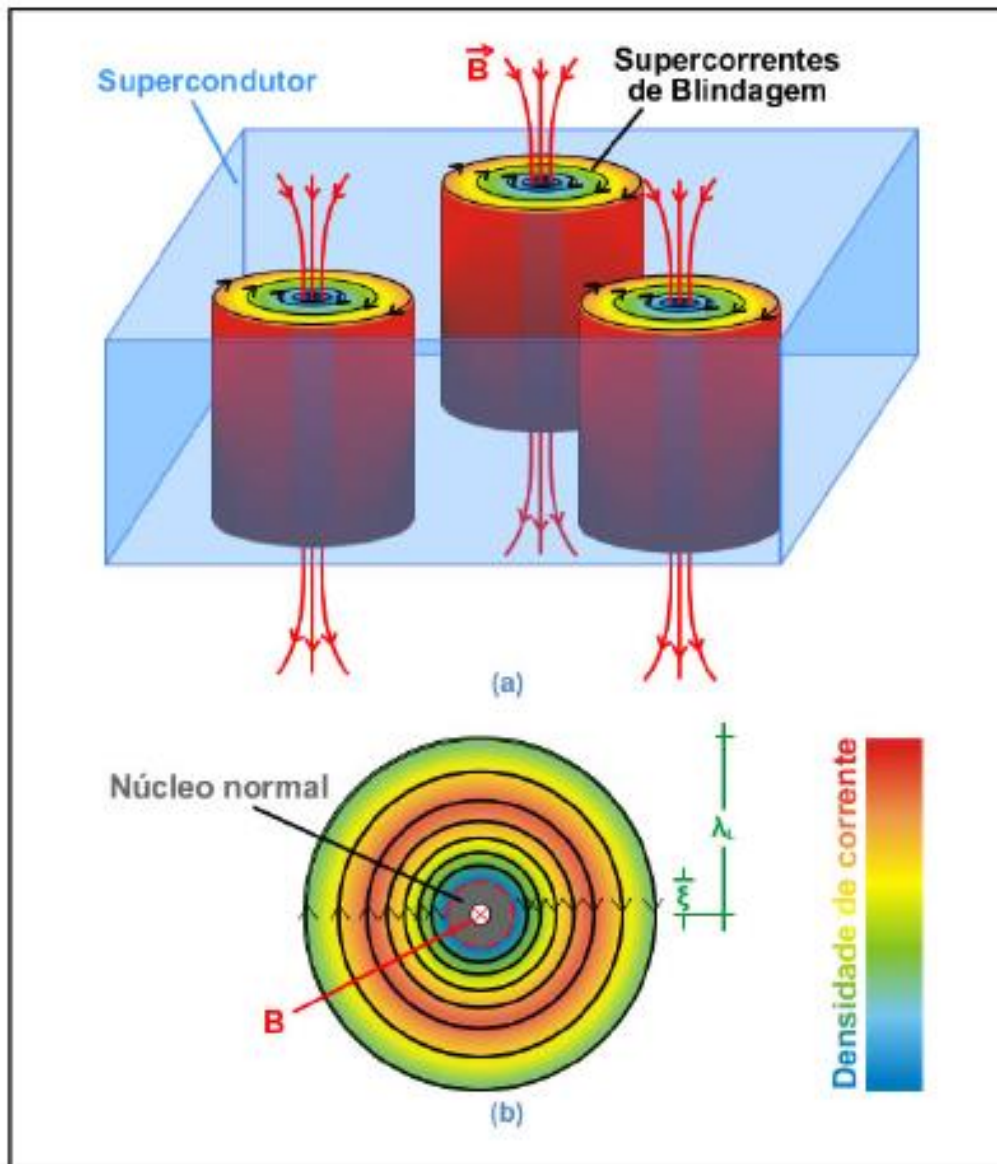


Figura 8 – (a) Estrutura de vários vórtices no interior do supercondutor do tipo II. (b) Vista superior de um vórtice. Figura adaptada de (BERCHON,2013).

Como pode ser visto na Figura - (b), o núcleo normal tem raio igual à ξ , comprimento de coerência de *Ginzburg-Landau*, enquanto que a espessura máxima

da distribuição das correntes de blindagem é igual ao comprimento de penetração λ_L . A distribuição desses vórtices no supercondutor do tipo II ocorre de acordo com a teoria de *Abrikosov*. Essa teoria diz que os vórtices se repelem entre si através da força de *Lorentz*, pois as linhas de fluxo magnético são circundadas por supercorrentes de blindagem, tendendo a formar uma rede de vórtices com geometria hexagonal ou triangular de estrutura periódica, chamada rede de *Abrikosov*, veja Figura 9. A rede hexagonal ou triangular corresponde à estrutura mais estável, ou seja, o estado de menor energia.

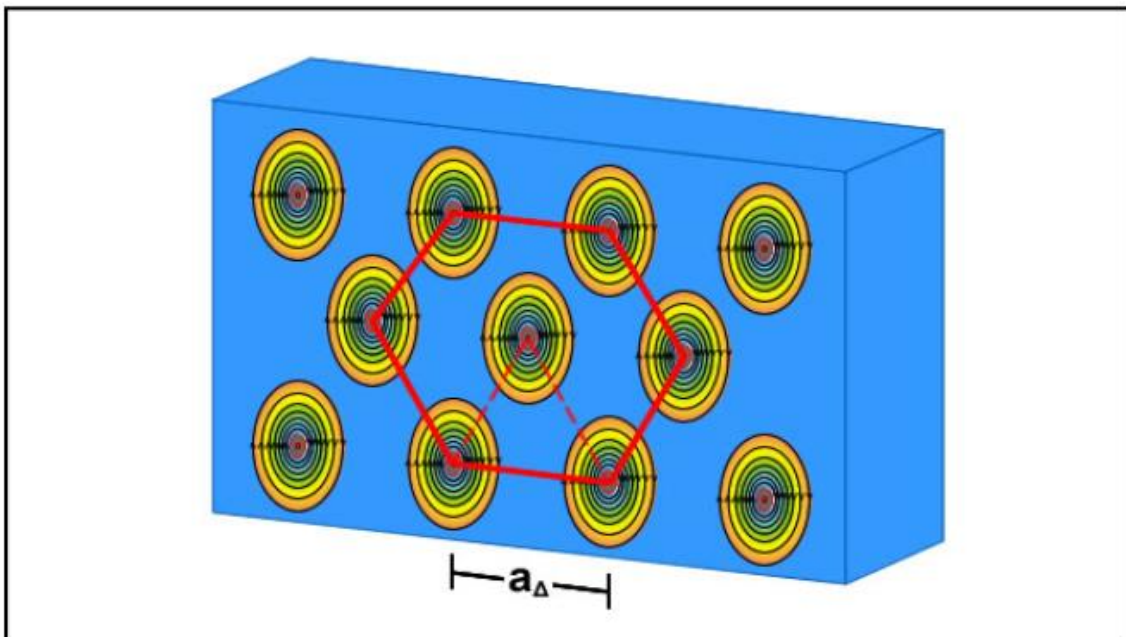


Figura 9 – Arranjo hexagonal de vórtices num supercondutor do tipo II no estado misto. Figura adaptada de (BERCHON,2013).

Nessa configuração a distância de separação entre os vórtices é dada por

$$a_{\Delta} = 1,075 \sqrt{\frac{\varphi_0}{B}}$$

Note que com o aumento da indução magnética B , a distância a_{Δ} diminuiria. Quando a_{Δ} for da ordem do comprimento de coerência ξ , então os núcleos normais tenderiam a se sobreporem, destruindo a supercondutividade do material. Neste ponto o material passaria do estado misto para o estado normal, onde é determinado o campo crítico H_{C2} .

1.2.2.4. Dinâmica dos vórtices

Os supercondutores de alta temperatura crítica são classificados como supercondutores do tipo II apresentando o efeito da supercondutividade de acordo com o que já foi dito anteriormente. Nas seções anteriores, os parâmetros críticos que estabelecem as fronteiras entre os estados supercondutor, misto e normal são a temperatura crítica T_C e os campos magnéticos críticos H_{C1} e H_{C2} . Há outro parâmetro crítico que é a densidade de corrente crítica (J_C) que depende da temperatura (T) e da intensidade de campo magnético (H). A corrente crítica (I_C) é um parâmetro derivado de J_C e que depende da geometria do material. Suponha um supercondutor do tipo II ideal, ou seja, sem imperfeições na rede cristalina, estando no estado misto e na presença de campo magnético, quando percorrido por uma densidade de corrente J_S , perpendicular ao campo aplicado. Surgirá uma força defletora (F_L) em cada vórtice, fazendo-os se moverem com uma velocidade V_D numa mesma direção e sentido, perpendicular ao plano formado pelos vetores densidade de corrente e campo magnético aplicado. Desta forma, a força total sobre a rede de vórtices (por unidade de volume) é uma força de *Lorentz* que é dada por

$$F_{LT} = J_S \times B$$

Por consequência, o deslocamento dos vórtices com velocidade V_D gerado pela força F_{LT} induz um campo elétrico, antiparalelo a J_S , dado por

$$E_{ind} = B \times V_D$$

Assim, o campo elétrico induzido E_{ind} faz com que o transporte de densidade de corrente pelo material supercondutor seja dissipativo. Esse fato acarretaria o aquecimento do material elevando a sua temperatura, tornando-o mais propenso a transitar para o estado normal. Porém, na prática, a estrutura de um supercondutor não é ideal e possui defeitos na microestrutura do material que geram forças de aprisionamento F_R , também chamada de força *Pinning*, veja a Figura 10.

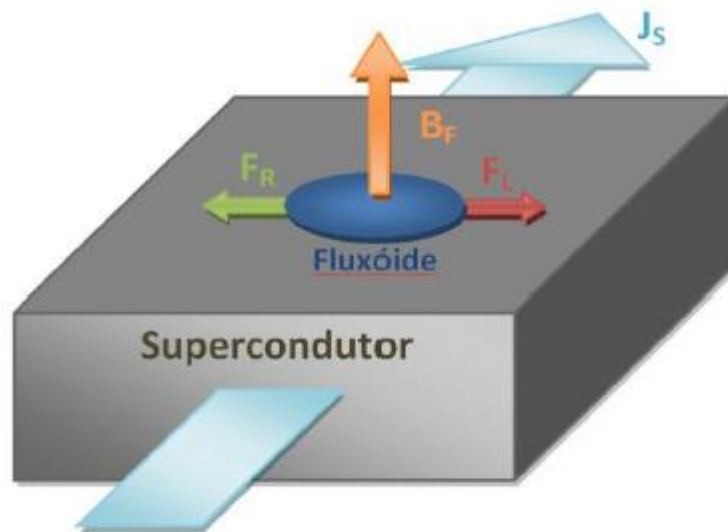


Figura 10 – Ação de forças sobre um fluxóide através de uma densidade de corrente.
Figura adaptada de (Martins, 2012).

Como os vórtices interagem repulsivamente, então bastam alguns vórtices aprisionados para imobilizar a rede como um todo. A força *Pinning* é sempre igual ou menor que a de *Lorentz* e ela funciona como um atrito estático. Quando a força de *Lorentz* se torna maior que a de *Pinning*, então a densidade de corrente assume o valor crítico (J_C). Portanto, a densidade de corrente crítica (J_C), que depende de T e de H , é mais um parâmetro, além da temperatura crítica T_C e os campos magnéticos críticos H_{C1} e H_{C2} para um material supercondutor de alta temperatura crítica que é a classe de supercondutor das fitas 2G usadas neste trabalho.

2. Fitas supercondutoras 2G

Após a descoberta dos supercondutores de alta temperatura crítica (High Temperature Superconductors – HTS) diversas aplicações foram possíveis. Uma importante aplicação que surgiu foi a da levitação magnética de um ímã permanente através de supercondutores maciços de YBCO (“bulks”). No entanto, o processo de fabricação dos “bulks” sempre demonstrou dificuldade em garantir o padrão de qualidade no que tange a homogeneidade das amostras e, além disso, a produção em pequena escala foi um fator determinante de sua inviabilidade. A razão pela qual, atualmente, há uma ampla aplicação das fitas supercondutoras em substituição aos “bulks”, deve-se ao fato de a produção dessas fitas serem em escala industrial e de apresentarem homogeneidade das propriedades supercondutoras ao longo de quilômetros de fita.

A primeira geração de fitas supercondutoras comerciais foi desenvolvida no período de 2000 à 2005, conhecidas como fitas supercondutoras 1G, composta pelo supercondutor Bi-2223, encapsulado na forma de fita e com uma matriz de prata. Apesar de todas as vantagens citadas, as fitas 1G tiveram a sua produção limitada por fatores econômicos, mas tendo a sua produção até hoje.

A segunda geração de fitas supercondutoras (fitas 2G) foi uma solução às fitas 1G. Semelhantemente, consistem em um material HTS, encapsulado na forma de fita, neste caso, o YBCO. As fitas 2G apresentam grandes vantagens sobre os “bulks”, pois possuem um elevado grau de orientação entre as fronteiras dos grãos, comportando-se como um monocristal, além de possuir uma maior capacidade de aprisionamento de fluxo magnético que, por consequência, proporciona um maior valor de densidade de corrente crítica. Já em relação às fitas 1G, possui um maior valor na intensidade de campo magnético crítico. Detalhes sobre a estrutura e propriedades químicas do composto YBCO pode ser obtido (BERCHON, 2013). Vale ressaltar que a temperatura crítica tem relação com a concentração do oxigênio nas moléculas de YBCO conforme pode ser visto na Figura 11.

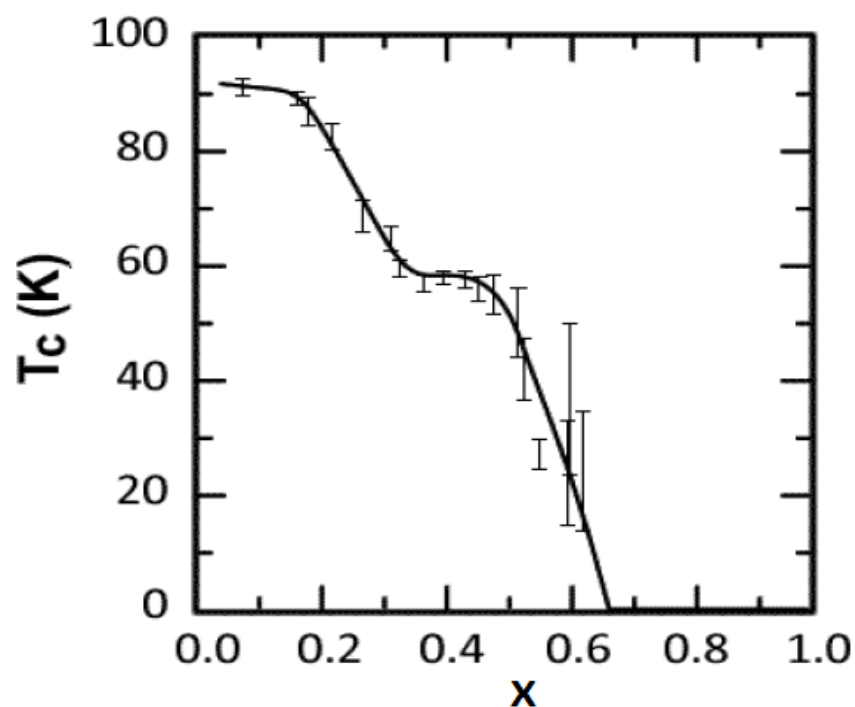


Figura 11 – Temperatura crítica do $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ em função da concentração do oxigênio. Figura adaptada de (BERCHON, 2013).

Este fato mostra o quão intrínseca é a transição entre os estados normal e supercondutor do YBCO. Neste trabalho foi usada somente a fita 2G SCS4050 da Superpower que tem 40 mm de largura e cerca de 0,1 mm de espessura. Como na maioria das fitas 2G, ela é composta por várias camadas de materiais, a fim de conferir estabilidade térmica, bom contato elétrico, proteção ao material supercondutor e flexibilidade, além disso, possui camadas estabilizantes e passivantes que orientam a estrutura cristalina do YBCO na fabricação do filme. Uma ilustração da estrutura em camadas da fita 2G SCS4050 pode ser vista na Figura 12.

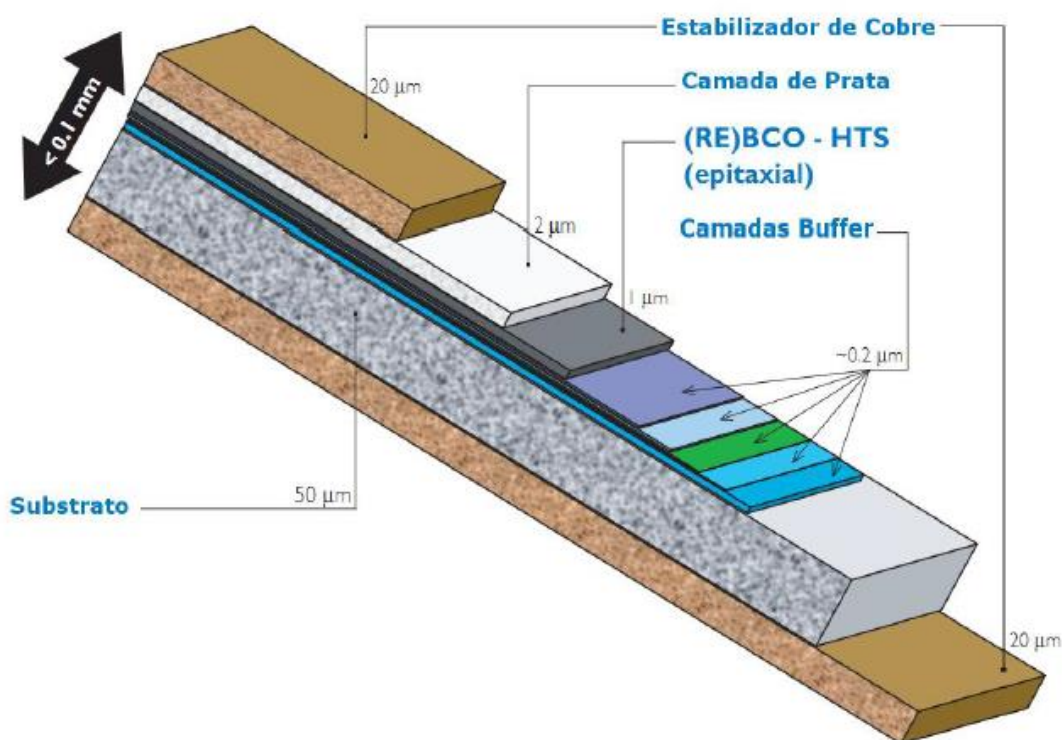


Figura 12 – Esquema estrutural da fita 2G HTS SCS4050 da Superpower em corte laminar (Referência: Anexo 9.2).

A camada de substrato é uma liga de níquel HASTELOY C276 com 50 μm de espessura e tem a finalidade de dar suporte às demais camadas, pois, além de ser adequada ao devido funcionamento da fita, possui características ideais para o processamento de filmes finos, tendo resistência a altas temperaturas, expansão térmica compatível às camadas buffer e YBCO, alta resistividade e não-magnética.

Já as duas camadas de cobre possuem 20 μm de espessura cada uma, protegendo ambos os lados da fita de agressões externas por oferecer resistência mecânica e têm a finalidade de garantir estabilidade térmica ao material supercondutor durante a transição de fases, pois o cobre possui ótima condutibilidade térmica. Embora seja possível emendar cabos convencionais por delaminação da camada externa do cabo, a delaminação da camada externa de uma fita supercondutora 2G não é factível devido às espessuras das camadas que compõem a fita serem da ordem de micrometros, além do fato de não ser possível fazer uma soldagem convencional nem na prata e nem no YBCO, pois a solda não adere a esses materiais e sim somente no cobre. A camada de 2 μm de prata tem por finalidade garantir o escoamento de corrente elétrica durante as transições de fases, protegendo a camada

de material supercondutor YBCO. Essa camada possui 1 μm de espessura e permite a passagem de corrente elétrica sem resistência. A camada buffer é composta de várias camadas de diferentes materiais com espessura de aproximadamente 0,2 μm . Outras informações sobre a fita 2G da Superpower podem ser vista no Anexo 9.2.

3. Métodos de soldagem

A soldagem das fitas 2G é um processo delicado que exige diversos cuidados de manuseio e de conservação de suas propriedades que garantem a supercondutividade. O método de soldagem deve visar à qualidade da emenda nos aspectos de garantia de resistência mecânica à tração e na propiciação de um baixo valor da resistência elétrica da emenda, na ordem de nano-ohms. Os métodos adotados também visaram à praticidade e à repetibilidade do processo de soldagem. Os métodos de soldagem adotados neste trabalho foram o método de soldagem manual, o método de soldagem por dispositivo aquecedor, o método de soldagem com prensa térmica e os métodos de soldagem combinados que serão descritos nas seções seguintes deste capítulo.

3.1. Soldagem manual

A soldagem manual é o método mais simples, porém exige maior habilidade manual do operador. O método consiste na soldagem das extremidades de dois segmentos de fitas 2G através da fusão de uma liga de baixo ponto de fusão com o manuseio de uma ponteira de uma estação de solda, como é feito na soldagem de componentes eletrônicos nas placas de circuitos impressos. A emenda deve ser feita conforme as instruções de soldagem do fabricante que podem ser encontradas no Anexo 9.1. Existem dois tipos de emendas de acordo com o fabricante: “Lap Joint” e “Bridge Joint”.

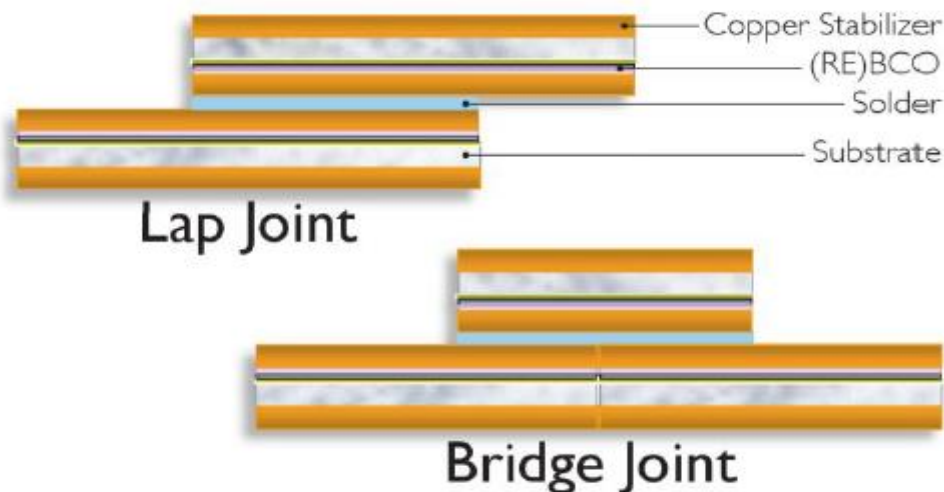


Figura 13 – Ilustração dos dois possíveis tipos de junções ou emendas de acordo com o fabricante (*Soldering Instructions*, da Superpower).

O segundo tipo de junção proporciona o dobro de resistência elétrica que o primeiro. Desta forma, todas as emendas neste trabalho foram do tipo “Lap Joint”, exceto algumas emendas feitas pelo método de soldagem com prensa térmica em que a emenda produzida é a união dos dois segmentos de fita 2G pelas suas partes centrais e não unidos pelas suas extremidades, ou seja, os segmentos são totalmente sobrepostos, mas unidos somente pelas suas partes centrais conforme mostra a Figura 14.



Figura 14 - Ilustração de uma junção centralizada

Esse tipo de emenda não segue os padrões de soldagem do fabricante, mas foi feita por questões de alinhamento das fitas e será visto mais a frente. Cada segmento de fita 2G deve ser unido pelo lado mais próximo da camada de material supercondutor, pois assim a corrente elétrica passará por uma resistência elétrica menor de uma camada supercondutora a outra. As fitas 2G SCS4050 da Superpower são vendidas em carretéis o que facilita na identificação do lado mais próximo da

camada supercondutora da fita que é o lado externo ao carretel. A Figura 15 mostra a foto de um carretel.

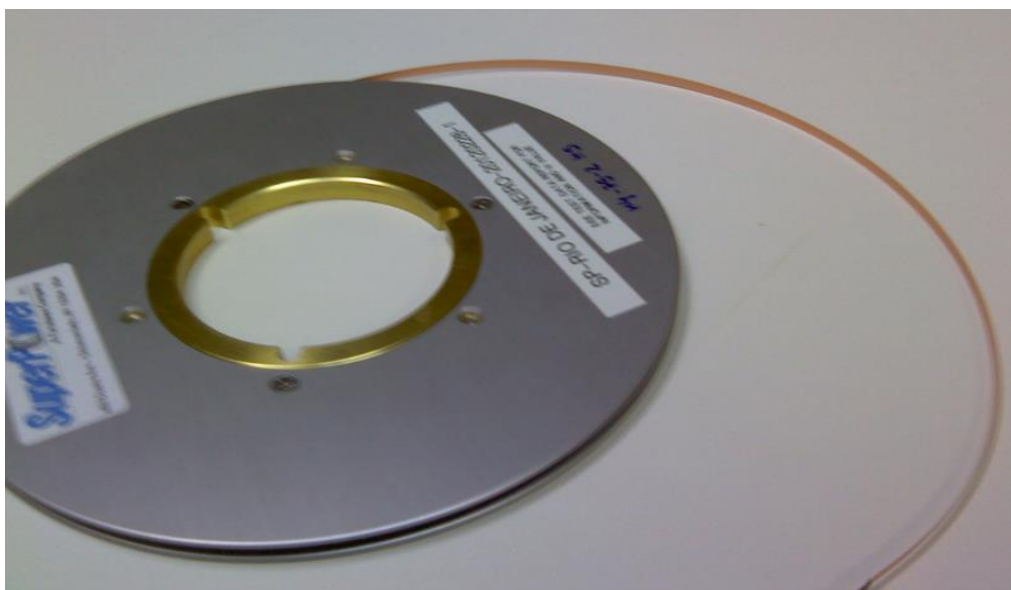


Figura 15 – Carretel de fita supercondutora 2G SCS4050 da Superpower.

O corte da fita 2G em segmentos é feito com tesoura comum e deve ser rápido e preciso para evitar a deflexão ou dobra da fita. Esforços por tração nas fitas e sua torção devem ser evitados também, pois a camada supercondutora poderá se desprender do substrato ou ser fracionada devido à deflexão da fita, diminuindo, conseqüentemente, o valor da densidade de corrente crítica J_C e seus efeitos de supercondutividade. A fita 2G é revestida de cobre que se oxida facilmente com o ar úmido do ambiente ou com o suor das mãos, por isso o manuseio das fitas 2G deve ser feito com luvas descartáveis e os segmentos de fitas guardados em recipientes contendo sílica gel para evitar a sua oxidação. A Figura 16 mostra o recipiente contendo a sílica gel e os segmentos de fitas 2G emendados.



Figura 16 – Recipiente contendo Sílica Gel e os segmentos de fitas 2G soldados.

Depois do corte da fita em segmentos, cada segmento deverá ter a sua superfície limpa com um fluxo de solda, neste caso específico foi utilizado o fluxo de solda Alpha260HF da Cookson Eletronics. O fluxo de solda remove partículas de óxido e demais impurezas proporcionando uma maior aderência da liga fundida ao segmento de fita 2G e a diminuição do ponto de fusão da liga. A limpeza pode ser feita manualmente com um chumaço de algodão ou um cotonete molhado no fluxo de solda e deverá ser suave evitando-se a deflexão do segmento de fita 2G. Dois tipos de ligas foram utilizados, a liga de 37%Pb – 63%Sn com ponto de fusão de 183°C e a liga de 52%In – 48%Sn com ponto de fusão entre 135°C e 140°C. A última liga citada é preferível devido ao fato de ter menor ponto de fusão e apresentar menor resistência elétrica. Essas ligas foram escolhidas, conforme as instruções do fabricante, por terem um ponto de fusão abaixo da temperatura máxima de 250°C que a fita 2G SCS4050 pode ser submetida. Uma vez limpos, um dos segmentos é posto sobre uma superfície plana e com a ponteira achatada de uma estação de solda ajustada na temperatura de 180°C, neste caso o modelo TS-9800 da Toyo mostrado na Figura 17, deposita-se a liga fundida sobre o segmento, espalhando a solda apenas pela extremidade do segmento com a ponteira de forma uniforme e com a menor espessura possível. O comprimento da liga fundida sobre o segmento de fita 2G pode variar de 30 a 100 mm de acordo com as orientações do fabricante.



Figura 17 – Foto da estação de solda modelo TS-9800 da Toyo.

Esse procedimento de deposição da solda sobre o segmento deverá ser feito em um intervalo de tempo o mais curto possível evitando-se o aquecimento excessivo da fita. A temperatura na fita 2G não deverá ultrapassar os 250 °C conforme as instruções do fabricante, pois acima desta temperatura ocorre a delaminação das camadas que compõem a fita. O próximo passo é colocar os dois segmentos parcialmente sobrepostos e alinhados, a fim de se obter a junção tipo “Lap Joint”, e com a ponteira de solda na mesma temperatura passar sobre a área sobreposta até provocar a fusão da liga novamente. Neste momento, deve-se prestar atenção no alinhamento dos segmentos, na uniformidade da solda entre os segmentos e na garantia de uma menor espessura da emenda. Por fim, a fita emendada é etiquetada e guardada no recipiente contendo Sílica Gel. Este método é trabalhoso por ser manual e dificilmente garante uma melhor uniformidade da solda, em contra partida é um método menos agressivo à fita em termos de aquecimento. A Figura 18 mostra uma amostra feita pelo método de soldagem manual.



Figura 18 – Foto de uma amostra de dois segmentos de fita 2G SCS4050 da Superpower, com 110 mm de comprimento cada segmento, unidos pela liga de 52%In – 48%Sn com 50 mm de comprimento. A emenda foi feita pelo método de soldagem manual.

3.2. Soldagem com dispositivo aquecedor

O método de soldagem com dispositivo aquecedor é uma alternativa de aperfeiçoamento do método de soldagem manual, pois permite uma melhor uniformidade da distribuição de calor sobre a solda com controle da temperatura através de instrumentos de medição. O processo de soldagem se inicia com a deposição da liga fundida com a ponteira achatada da estação de solda sobre apenas uma das extremidades de um dos segmentos de fita 2G. Todo o procedimento de limpeza é feito antes conforme foi dito na seção anterior. Logo após, os dois segmentos são sobrepostos, tipo junção “Lap Joint”, no interior do dispositivo de aquecimento do conjunto. O dispositivo aquecedor consiste em dois blocos de alumínio que se encaixam. Cada bloco possui uma cavidade cilíndrica aonde se encaixa a resistência cilíndrica do tipo cartucho. Cada resistência está acoplada a um termopar regulável e estão conectadas ao plugue de 220 V. No encaixe do bloco inferior, colocam-se os segmentos devidamente sobrepostos e com o bloco superior se faz o encaixe e a compressão do conjunto através de seu próprio peso. A Figura 19 mostra o dispositivo. O dispositivo aquece a amostra por condução e deve ser posto sobre um material isolante térmico para se evitar perdas.

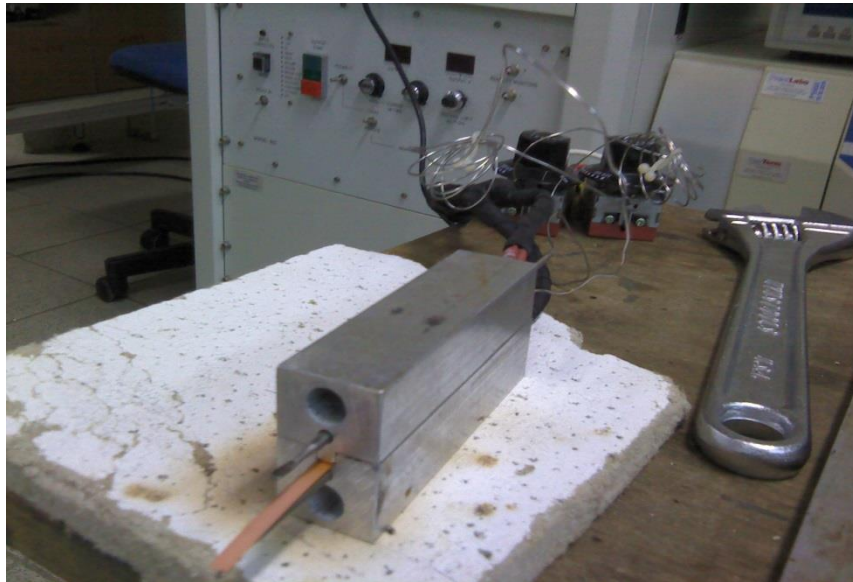
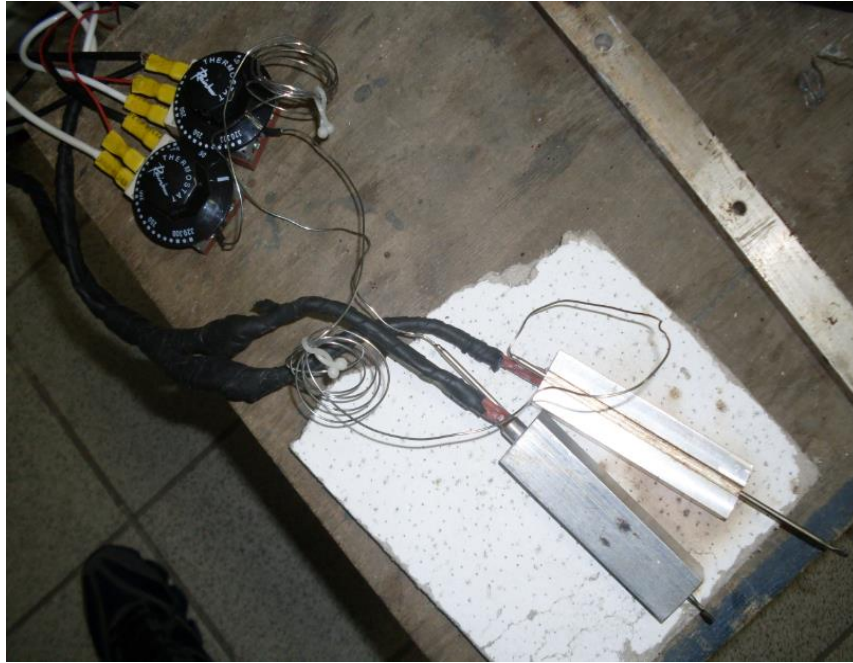


Figura 19 – Dispositivo aquecedor com resistências cilíndricas em cartucho projetado por (SASS, 2011).

Quando ligado à rede elétrica, o dispositivo pode ser aquecido a uma determinada temperatura pré-estabelecida pelo ajuste dos termopares. No caso, o ajuste sempre foi feito para 150°C, pois foram feitos testes antes que constataram que para temperaturas acima de 150°C a amostra sofria aquecimento excessivo e para temperaturas abaixo de 150°C não ocorria fusão da liga. Apesar de a temperatura estar acima do ponto de fusão da liga 52%In – 48%Sn, a temperatura de 150°C é

necessária, pois há gradiente de temperatura ao longo do dispositivo de acordo com a lei de Fourier para condução térmica, fazendo com que a temperatura na amostra seja inferior ao valor da ajustada pelo termopar. Para uma melhor garantia da temperatura de fusão na amostra durante o processo de soldagem pelo dispositivo, foi utilizado um medidor de temperatura, o termovisor da marca Flir mostrado na Figura 20, para monitorar a temperatura da amostra durante todo o processo de soldagem.



(a)

(b)

Figura 20 – (a) Termovisor da marca Flir, (b) Display do termovisor focalizando o dispositivo sendo aquecido.

O termovisor indica pelo seu display a temperatura média do objeto e a distribuição de temperatura através da variação da tonalidade de cores legendadas. A radiação térmica emitida pelo dispositivo, na forma de infravermelho, é captada pelo termovisor, permitindo ao usuário a medição de temperatura sem o contato do instrumento de medição com o objeto proporcionando uma medição mais precisa. O instrumento é bastante sensível aos ruídos, como por exemplo, a iluminação local. Por causa deste fato, deve-se ter o cuidado de focalizar o objeto de um ângulo que proporcione menor incidência luminosa sobre o receptor do instrumento. Nas medições de temperatura do dispositivo, a temperatura média registrada pelo termovisor foi de 130°C a 140°C. Apesar do monitoramento de temperatura e do alinhamento dos segmentos, o método de soldagem com o dispositivo aquecedor é bastante agressivo se a amostra for submetida a um aquecimento demorado (aconselhável não ultrapassar 3 min), pois o aquecimento ocorre de forma rápida

devido ao fato de a condução térmica ser feita através de blocos de alumínio. Atingindo-se a temperatura de fusão, o dispositivo deverá ser imediatamente desligado e o bloco superior levemente pressionado por alguns segundos (não mais do que 15 s para não haver excesso de aquecimento) para que haja o espalhamento da solda entre os segmentos de fita 2G e a redução da espessura da emenda. Depois desses procedimentos, o bloco de alumínio superior é retirado, o dispositivo resfriado com um ventilador e, por fim, a amostra é retirada. Na maioria das vezes a amostra fica aderida a um dos blocos de alumínio. A amostra deve ser resfriada com ventilador e os blocos resfriados por contato. A retirada da amostra deve ser feita com cautela para não provocar a sua deflexão. Devido ao fato de a largura da guia de encaixe dos blocos ser praticamente igual à largura da fita 2G, não sobra espaço para o excesso de solda vazar, ocorrendo o vazamento de parte da solda por sobre a amostra. A deposição do excesso de solda sobre a amostra não é desejável, pois esse fato pode comprometer a qualidade da emenda em termos de resistência mecânica à tração. Porém, este fato é inevitável, assim o vazamento do excesso de solda pode ser reduzido utilizando-se menos quantidade de liga. As Figuras 21 e 22 mostram emendas confeccionadas por este método. A primeira imagem mostra uma amostra bastante agredida por ter sido aquecida por 3 min e, a segunda, uma emenda feita num tempo de 2 min. O tempo recomendável varia, pois depende de o dispositivo já estar aquecido ou não. Esse tempo é o intervalo de tempo de aquecimento do dispositivo mais o intervalo de tempo entre o desligamento do dispositivo e a retirada da amostra. Apesar de a maioria das amostras submetidas a esse método apresentarem pequenas agressões (manchas avermelhadas na superfície da amostra), o método de soldagem com o dispositivo é um dos métodos que proporciona menores valores de resistência elétrica como será visto nos dados experimentais expostos mais a frente.



Figura 21 – Amostra submetida ao método de soldagem com dispositivo aquecedor durante 3 min.



Figura 22 – Amostra submetida ao método de soldagem com dispositivo aquecedor durante 2 min.

3.3. Soldagem com prensa térmica

O método de soldagem com prensa térmica é um método menos agressivo à fita, a forma de aquecimento da amostra se mostra branda e há um controle mais preciso da pressão e da temperatura. Além disso, a distribuição de temperatura e de pressão sobre a amostra é mais uniforme. Esse método se mostra mais prático do que os anteriores e foi uma alternativa de solução aos problemas encontrados no método da seção anterior. O equipamento principal utilizado é uma prensa térmica, modelo PLS 150 da Metalnox com estabilizador e controlador de temperatura, tendo 0,5 kW, 220 V e 2,3 A que são os dados nominais especificados pelo fabricante. Apesar de ser um equipamento projetado para a estampagem de tecidos, o equipamento operou de forma adequada no processo de soldagem dos segmentos de fitas 2G, pois a temperatura máxima suportável pelo equipamento é de 250°C e a temperatura de operação é cerca de 140°C. Foram feitos testes com algumas amostras com as mesmas características e comprovou-se que a temperatura que deve ser ajustada no equipamento para promover a fusão da liga de 52%In – 48%Sn é de 143°C e para a liga de 37%Pb – 63%Sn uma temperatura de 205°C. Já com relação à pressão aplicada sobre a amostra, não se deve ultrapassar o valor de 35 psi, pois, do contrário, as placas de vidro que dão suporte a amostra podem trincar e quebrar. O tempo de aquecimento para promover a fusão da liga nas amostras variou entre 1,5 min e 2,5 min. Esse tempo pode ser programado no display de controle do equipamento. Para um intervalo de tempo programado fora dessa faixa de tempo, a liga não se fundiu ou ocorreu o superaquecimento da amostra. A Figura 23 mostra detalhes da prensa térmica utilizada.

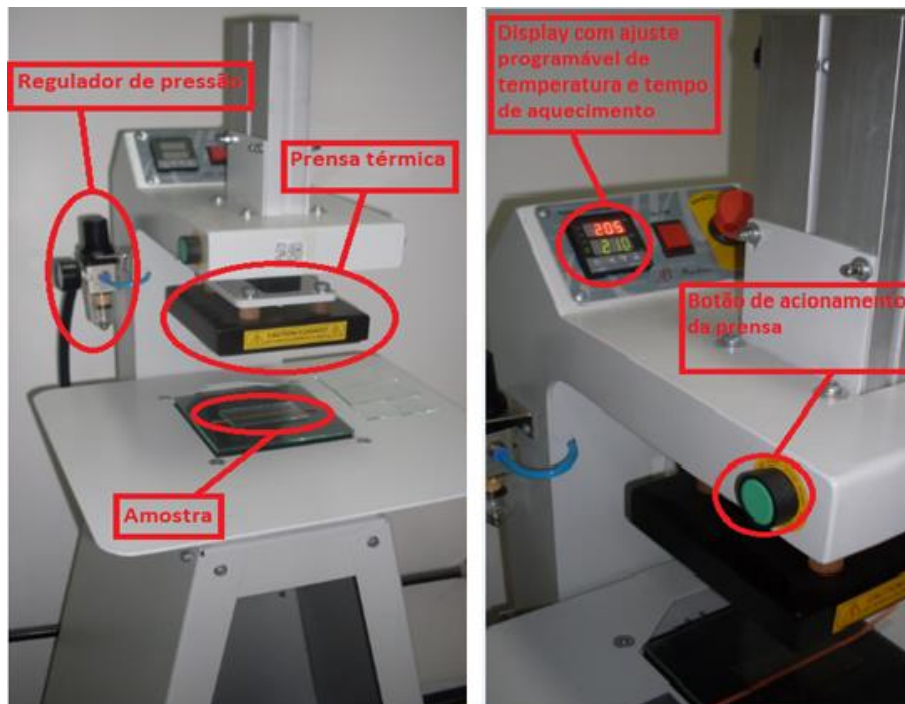


Figura 23 – Fotos da prensa térmica com as indicações de seus principais componentes e uma amostra inserida. Prensa térmica PLS 150 da Metalnox do PEM (Laboratório de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da UFRJ).

A prensa térmica deve estar acompanhada de um compressor que tem a função de gerar vácuo suficiente para se produzir os níveis de pressões ajustáveis pelo regulador de pressão. A figura 24 mostra o compressor utilizado e pertencente ao PEM (Laboratório de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica UFRJ).



Figura 24 – Compressor da marca ERBON. Equipamento do PEM, Laboratório de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da UFRJ.

Neste método, com o fim de se poupar o aquecimento da amostra por duas vezes, foi feita a laminação da liga. A liga laminada possibilita a sua inserção entre os dois segmentos de fita 2G para posteriormente colocá-los no aquecimento da prensa térmica. A soldagem manual da liga sobre um dos segmentos de fita 2G e depois a colocação desses segmentos na prensa térmica faria com que a amostra fosse aquecida duas vezes. O processo de laminação de um fio de liga é feito manualmente com um rolo cilíndrico de alumínio. Basta comprimir o fio de liga rolando o cilindro sobre o fio em movimentos repetidos sucessivamente até que o fio se torne laminado. A Figura 25 mostra um fio de liga de 52%In – 48%Sn sendo laminado.



Figura 25 – Um fio de liga 52%In – 48%Sn sendo laminado manualmente.

O fio laminado é cortado em tiras com comprimentos que variam de 30 a 70 mm. O comprimento da liga laminada aumenta entre os segmentos quando aquecida até a fusão na prensa térmica. Esse aumento do comprimento da liga é maior quanto maior for a pressão aplicada e o intervalo de tempo de aquecimento. Foram feitas várias emendas com o intuito de se otimizar a qualidade através da variação dos parâmetros intervalo de tempo de aquecimento, temperatura e pressão aplicados sobre cada amostra. Elas possuem as mesmas características, ou seja, mesmo comprimento de liga, mesmo tipo de liga e mesmo comprimento de segmentos de fita 2G, e foram submetidas à soldagem com a configuração dos três parâmetros citados distintos para cada amostra. Foi feito o seguinte: primeiro fixou-se a pressão em 30 psi e o tempo de aquecimento em 2,5 min diminuindo a temperatura com variação de 5°C até não mais ocorrer a fusão da liga. Como resultado, obteve-se uma temperatura mínima de 143°C para a liga 52%In – 48%Sn e 205°C para a liga 37%Pb – 63%Sn.

Essa temperatura mínima é a menor temperatura que promove a fusão de cada liga. Depois foi fixada a temperatura no valor de temperatura mínima, de acordo com cada tipo de liga, a pressão permaneceu em 30 psi e o tempo de aquecimento foi ajustado para 2,5 min, 2,0 min e 1,5 min. Foi constatado que para um intervalo de tempo de 1,5 min a fusão não ocorria ou ocorria de forma incompleta. Por esse motivo, adotou-se o tempo de 2,0 min como sendo o tempo mínimo de aquecimento das amostras. E por fim, fixando a temperatura em 143°C e o tempo de aquecimento em 2,0 min, no caso da liga 52%In – 48%Sn, aumentou-se a pressão de 30 psi para 35 psi. Com o aumento de pressão, como era de se esperar, o comprimento de liga entre os segmentos se tornava consideravelmente maior. Para pressões acima de 35 psi, as placas de vidro trincavam-se, limitando a pressão a somente 35 psi. A Figura 26 mostra com detalhes uma amostra de dois segmentos de 110 mm totalmente sobrepostos, tendo entre eles a liga laminada.



Figura 26 – Imagem de uma amostra de dois segmentos de fita 2G HTS SCS4050 da Superpower totalmente sobrepostos tendo entre eles uma liga laminada de 52%In - 48%Sn com 60 mm de comprimento. A amostra está preste a ser aquecida e pressionada pela chapa metálica superior da prensa térmica.

As placas de vidro comum servem para evitar a aderência dos segmentos na superfície quente da prensa térmica. Apesar de o vidro ser um isolante térmico, as placas de vidro possuem uma superfície mais lisa do que a de uma placa metálica, permitindo uma melhor distribuição de pressão sobre a amostra, além de tornar a

limpeza das placas mais fácil para uma posterior reutilização. A placa de vidro superior deverá ter menor espessura possível, pois o aquecimento ocorre por condução térmica vindo somente da parte superior e ocorre depois da descida da chapa metálica aquecida da prensa térmica sobre a amostra. A placa superior usada neste trabalho, mede 2 mm de espessura, tendo 45 mm de largura e 85 mm de comprimento. A placa inferior tem a função de reforçar o isolamento térmico do suporte de base que é uma espuma de um material isolante térmico, por isso essa placa poderá ter uma espessura maior, no caso foi usada uma placa de 5 mm de espessura com 150 mm de largura e comprimento. Neste método, não é possível fazer uma junção do tipo “Lap Joint”, pois quando a prensa termina o aquecimento ela sobe, provocando um pequeno desalinhamento devido ao fato de a superfície da placa superior ficar fracamente aderida à superfície da chapa metálica da prensa. Colocando-se os dois segmentos totalmente sobrepostos o desalinhamento diminuí. Outro fator que dificulta a confecção de uma junção “Lap Joint” tanto por este método como no método visto na seção anterior, é o posicionamento dos segmentos, pois os segmentos possuem curvaturas, o que torna o processo trabalhoso e demorado. O problema de alinhamento dos segmentos pode ser resolvido com a aplicação de dois blocos de alumínio com guias de alinhamento postos cada um em uma extremidade da amostra conforme mostra a Figura 27. Os blocos funcionam também como dissipadores poupando o aquecimento desnecessário ao longo da amostra. Um pequeno desalinhamento pode influenciar bastante no valor da resistência elétrica de uma amostra, aumentando consideravelmente o seu valor.

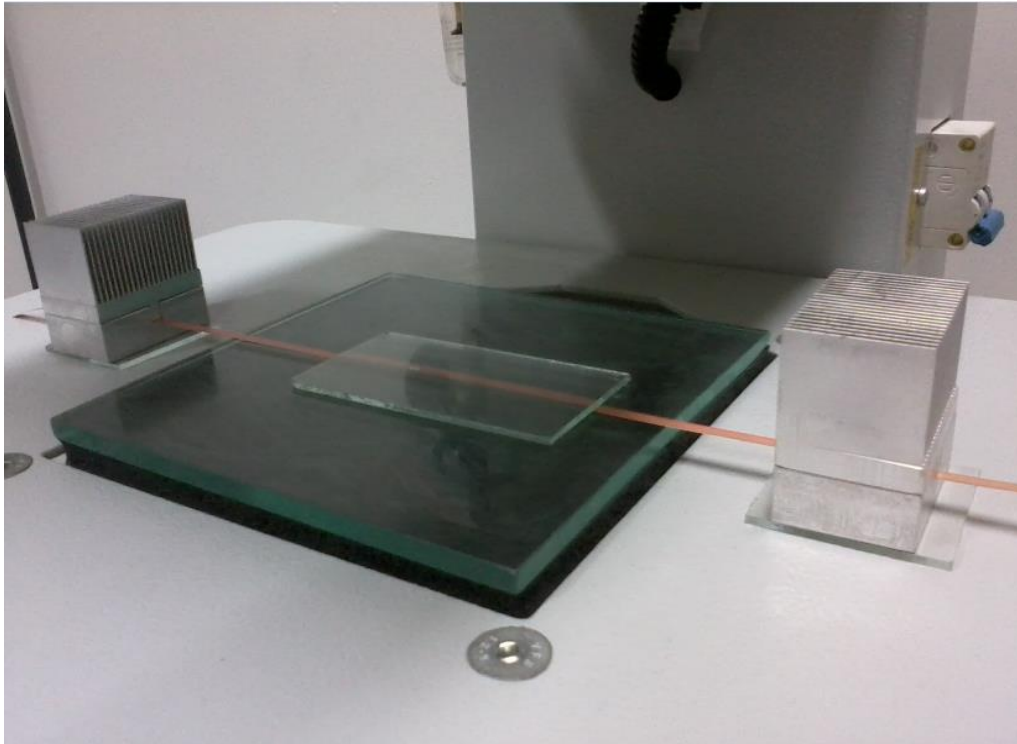


Figura 27 – Blocos de Alumínio postos nas extremidades para alinhamento dos segmentos de fita 2G e para dissipação de energia térmica dos segmentos quando aquecidos.

O método com a prensa térmica precisou ser aperfeiçoado, pois na maior parte das medidas de resistência elétrica das junções, os valores se mostraram altos, cerca de 70 n Ω . Cogitou-se que a causa do alto valor de resistência elétrica nas junções fosse devido à ocorrência de certas vacâncias entre as junções soldadas, isto é, espaços não ocupados pela solda. A Figura 28 ilustra de forma comparativa os casos.

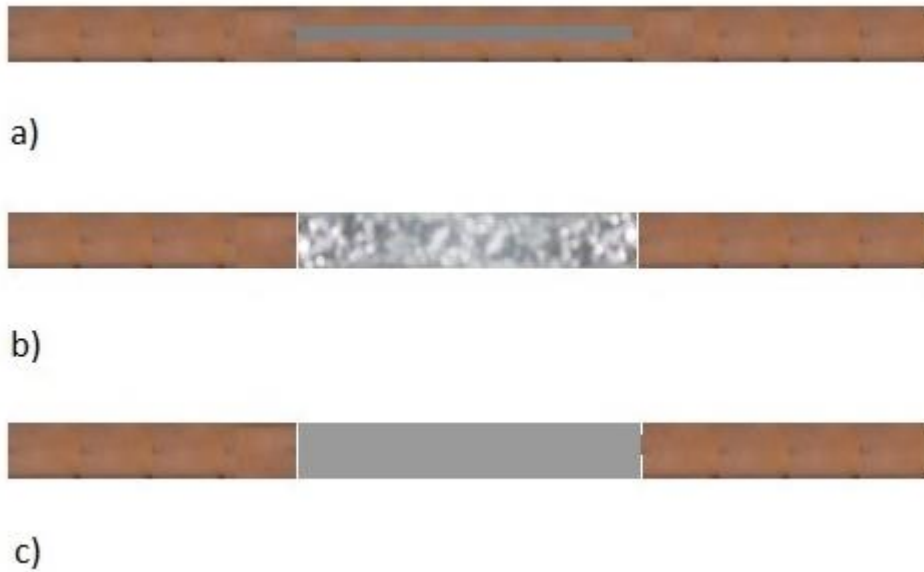


Figura 28 – Ilustração comparativa dos métodos de soldagem com prensa térmica.

- a) Ilustração de um fio de 52%In – 48%Sn laminado sobre um segmento de fita 2G; b) Ilustração de uma liga de 52%In – 48%Sn fundida sobre um segmento de fita 2G, neste caso a amostra apresenta vacâncias; c) Ilustração de uma liga de 52%In – 48%Sn fundida sobre um segmento de fita 2G, neste caso foi feita a pré-soldagem com a ponteira achatada de uma estação de solda.

O método com a prensa se mostrou menos agressivo aos segmentos de fita 2G, proporcionou melhor alinhamento e menor espessura de solda, porém a distribuição da solda ao longo da junção não se mostrou adequada. Uns dos parâmetros de qualificação das emendas e o motivo para o aperfeiçoamento deste método se baseiam na segunda lei de Ohm. Essa lei passa a ideia de que quanto menor for a espessura e quanto maior for a área do condutor, então menor será o valor da resistência elétrica sendo considerado o valor da resistividade constante. De fato, as emendas consideradas, confeccionadas com a prensa térmica, foram todas submetidas a 143°C no caso da liga de 52%In – 48%Sn e 183°C para a liga de 37%Pb – 63%Sn, podendo a resistividade das junções ser consideradas praticamente constantes. A causa provável para a existência de vacâncias nas junções é a fusão incompleta da liga ou um espalhamento não uniforme da liga fundida entre os dois segmentos de fita 2G. Esse fato pôde ser comprovado com testes feitos com a liga laminada e com a liga espalhada através da ponteira achatada da estação de solda. Os testes mostraram que as vacâncias ocorriam de forma expressiva somente nas emendas feitas com liga laminada proporcionando maiores valores de resistência

elétrica. A liga já fundida e espalhada com a ponteira da estação de solda facilita a devida distribuição da solda entre os segmentos, garantindo uma melhor uniformidade da liga. Os resultados comparativos dos valores de resistência elétrica das emendas poderão ser constatados no capítulo 5.

4. Caracterização das fitas 2G soldadas

Neste capítulo, será descrito o processo de caracterização das fitas 2G soldadas e os equipamentos, dispositivos e instrumentos de medição utilizados. A caracterização elétrica dos segmentos de fitas 2G soldados consiste em se medir o valor da resistência elétrica da emenda, pois nas condições físicas em que as amostras são submetidas, a única resistência elétrica apresentada deve-se ao condutor metálico que une os segmentos de fitas 2G. De acordo com o que foi visto nas seções 2.1 e 2.2.1, nas condições físicas de temperatura do nitrogênio líquido, um segmento de fita 2G submetido a uma diferença de potencial, apresentaria resistência elétrica nula desde que esteja no seu estado supercondutor. Já dois segmentos de fita 2G emendados por um condutor metálico, nas mesmas condições da suposição anterior, apresentaria uma resistência elétrica devido às características do material que une os dois segmentos. O comportamento da curva da tensão em função da corrente seria linear pelo fato de o material que une os segmentos ser uma liga metálica.

No esboço da Figura 29, partindo da origem até o ponto A, a resistência é nula, pois nesse intervalo o material se apresenta no seu estado supercondutor. Entre os pontos A e B ocorre transição da fase supercondutora para a fase normal. Após o ponto B, o material se encontra em seu estado normal possuindo uma resistência elétrica.

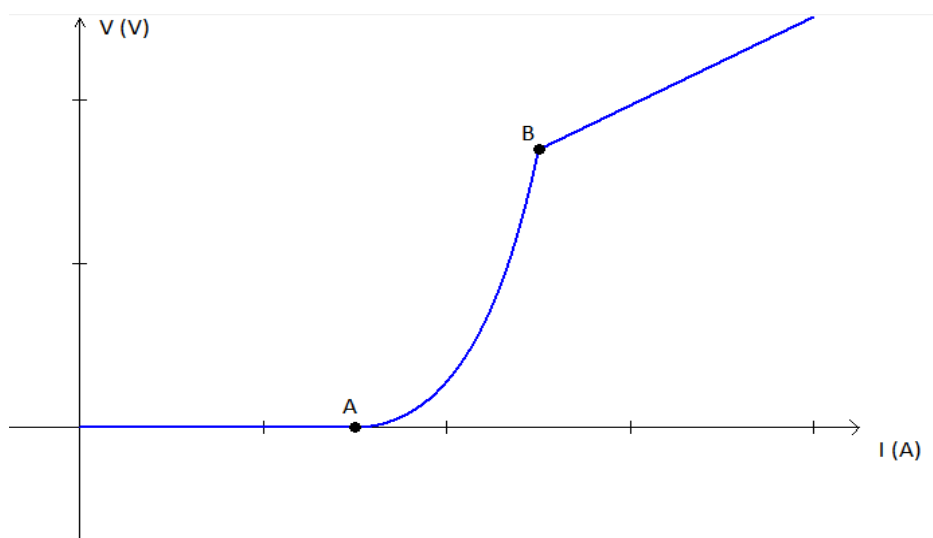


Figura 29 – Esboço da curva tensão versus corrente para um segmento supercondutor de fita 2G.

Já no esboço da Figura 30, partindo da origem até o ponto A, apesar de os segmentos de fita 2G estarem no estado supercondutor, a liga metálica que os une possui uma resistência elétrica não nula e, neste trabalho, deverá ter o menor valor possível (entre 10 nΩ e 30 nΩ). Da mesma forma que o caso anterior, entre os pontos A e B ocorre transição de fases. Após o ponto B, a amostra estará no estado normal possuindo uma resistência elétrica que é a soma da resistência da liga metálica mais a resistência do material supercondutor.

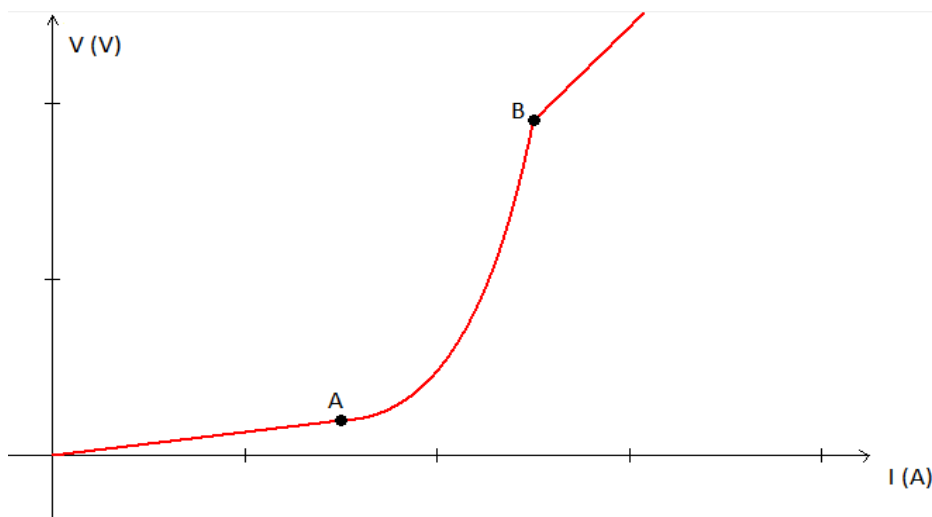


Figura 30 – Esboço da curva tensão versus corrente de dois segmentos supercondutores de fita 2G soldados com um liga metálica.

4.1. Equipamentos, dispositivos e instrumentos de medição

A caracterização da fita 2G modelo SCS4050, soldadas com ligas de baixo ponto de fusão, é feita com a utilização de uma fonte de corrente, um nanovoltímetro, uma placa de aquisição de dados e um programa para o controle dos equipamentos. A fonte de corrente que alimenta a fita 2G soldada é uma fonte Agilent 6671A, ligada à rede elétrica em 220 V. Esta 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 aos terminais de cobre, que fazem contato com a fita 2G, foram usados dois cabos trifásicos isolados de 3 x 4,0 mm de diâmetro com as extremidades

soldadas. A imersão dos cabos em nitrogênio líquido torna o isolamento extremamente quebradiço. Portanto, foram adicionadas cordoalhas envoltas por Kapton, pois as cordoalhas são flexíveis mesmo nas condições de temperatura do nitrogênio líquido. A Figura 31 mostra as cordoalhas usadas neste trabalho.



Figura 31 – Cordoalhas de aço com 0,50 m de comprimento e 21,0 mm de largura, envolvidas por um isolante elétrico (Kapton). Figura adaptada de (MARTINS, 2012).

A aquisição dos valores de tensão foi feita através de um nanovoltímetro Keithley 2182A. O nanovoltímetro Keithley é otimizado para caracterização de baixas resistências, com medições estáveis, rápida aquisição e baixo ruído, sendo um instrumento adequado para medições da ordem de nanovolts a microvolts que é o caso apresentado neste trabalho. Esse instrumento também possui uma porta GPIB usada para seu controle. A Figura 32 mostra o nanovoltímetro sobre a fonte de corrente usados neste trabalho.



Figura 32 – Nanovoltímetro Keithley 2182A sobre a fonte de corrente Agilent 6671A do LASUP.

A interface entre a fonte de corrente, o nanovoltímetro e o computador é toda feita através de um sistema GPIB (General Purpose Interface Bus). A interface possui 24 fios (8 para transferência bidirecional de sinal, 3 para handshake, 5 para gerenciamento de barramento e 8 para aterramento) e permite a comunicação em série de até 14 equipamentos através de um único barramento com um cabo de até 20 m de comprimento (MARTINS, 2012). Na montagem deste trabalho estão conectados em série a fonte de corrente, o nanovoltímetro e a placa de aquisição Keithley KUSB-488B. A placa de aquisição faz a conversão para a entrada USB do computador. A Figura 33 mostra um adaptador GPIB usado neste trabalho.



Figura 33 – Placa de aquisição e adaptador GPIB-USB Keithley KUSB-488B.

Figura adaptada de (MARTINS, 2012).

Para o controle do sistema de caracterização das fitas 2G soldadas e para aquisição de dados através da interface GPIB utilizou-se um programa em Labview criado pelo engenheiro Felipe Sass, M.Sc., que permite a configuração, a entrada de dados e o ensaio em tempo real.

4.2. Processo de caracterização

Cada ensaio, de forma resumida, segue a seguinte rotina: primeiro, monta-se o sistema de caracterização fazendo as conexões e contatos entre os equipamentos e a amostra, segundo, imergir a amostra em nitrogênio líquido e, em terceiro, faz-se a configuração dos parâmetros e depois a simulação do ensaio em tempo real pelo programa em Labview. A amostra deverá ser posta em um suporte eletricamente isolado para que não haja corrente de fuga e, além disso, o suporte deverá possuir uma inércia térmica considerável para não provocar variações de temperatura significativas na amostra devido aos possíveis desequilíbrios térmicos provocados pela troca de calor entre a amostra, o suporte e o nitrogênio líquido. O suporte para as amostras foi feito pela equipe do LASUP e foi utilizado nos primeiros ensaios. A Figura 34 mostra o suporte usado.



Figura 34 – Foto do suporte para as amostras. Criado pela equipe do LASUP.

O suporte é constituído por uma barra de cobre de 38 mm de largura, 260 mm de comprimento e 12 mm de espessura envolvida por Kapton. Blocos metálicos fazem o encaixe e a união dos terminais feitos também de barras de cobre e a barra de cobre envolta por Kapton através de parafusos e porcas. O cobre é um material que serve como uma âncora térmica e o Kapton isola eletricamente a amostra do suporte. A amostra fica presa entre os terminais de cobre e a barra de cobre envolta por Kapton. Nos terminais das barras de cobre do suporte da amostra, conectam-se as cordoalhas de aço envoltas por Kapton e, nos outros terminais das cordoalhas, os cabos trifásicos da fonte de corrente. A conexão é feita pelo ajuste de parafusos e porcas somente. Já para a conexão dos terminais de saída do nanovoltímetro, utilizam-se dois fios de cobre de 0,65 mm de diâmetro, esmaltados e entrelaçados. O esmalte e o entrelaçamento dos fios servem para evitar possíveis ruídos e interferências nas medições pelo nanovoltímetro. As extremidades dos fios são desmaltadas por lixamento para haver o contato elétrico. Os terminais do nanovoltímetro são conectados nos fios por parafusos e porcas, mas os outros terminais dos fios são soldados na amostra. A distância entre os terminais dos fios soldados sobre a amostra deverá ser suficiente para conter todo o comprimento da emenda. Em cada amostra, cada um dos terminais dos fios foram soldados a uma distância de no mínimo 10 mm de uma das extremidades da emenda. Antes de se colocar a amostra no suporte, ela deverá ser limpa com o fluxo de solda já informado neste trabalho. A limpeza da

amostra permite uma melhor aderência da solda aos segmentos de fita 2G proporcionando uma ligação permanente, mesmo estando imersos no nitrogênio líquido, os terminais de fios vindos do nanovoltímetro permanecem devidamente fixos à amostra. Soldar os terminais de fios na amostra é um processo trabalhoso e que submete os segmentos de fita 2G novamente a um aquecimento. Após o término do ensaio, a solda dos terminais de fios será outra vez aquecida, desta vez para a retirada dos terminais de fios ligados a amostra. Assim a amostra é guardada em recipiente contendo sílica gel e os terminais de fios reutilizados no ensaio seguinte. Pensando na praticidade do processo e na redução de ruídos de medição, criou-se um suporte que permitisse que os terminais de fios fossem ligados à amostra por contato somente, poupando-a da soldagem. O projeto desse suporte foi criado com a ajuda do engenheiro mecânico Felipe Costa e da oficina de usinagem do LASUP. O novo suporte possui a mesma estrutura do anterior, mas contém uma placa de policarbonato com quatro furos, onde se podem aparafusar pinos de cobre com contatos de Índio soldados. Os pinos ao serem aparafusados, com a mão ou com uma chave de fenda, fazem o contato com a amostra e, assim, os fios conectados ao nanovoltímetro são conectados aos pinos. Neste caso, a conexão dos fios nos pinos foi feita com conectores do tipo “boca de jacaré”. A Figura 35 mostra o suporte adaptado com a placa de policarbonato e os conectores.

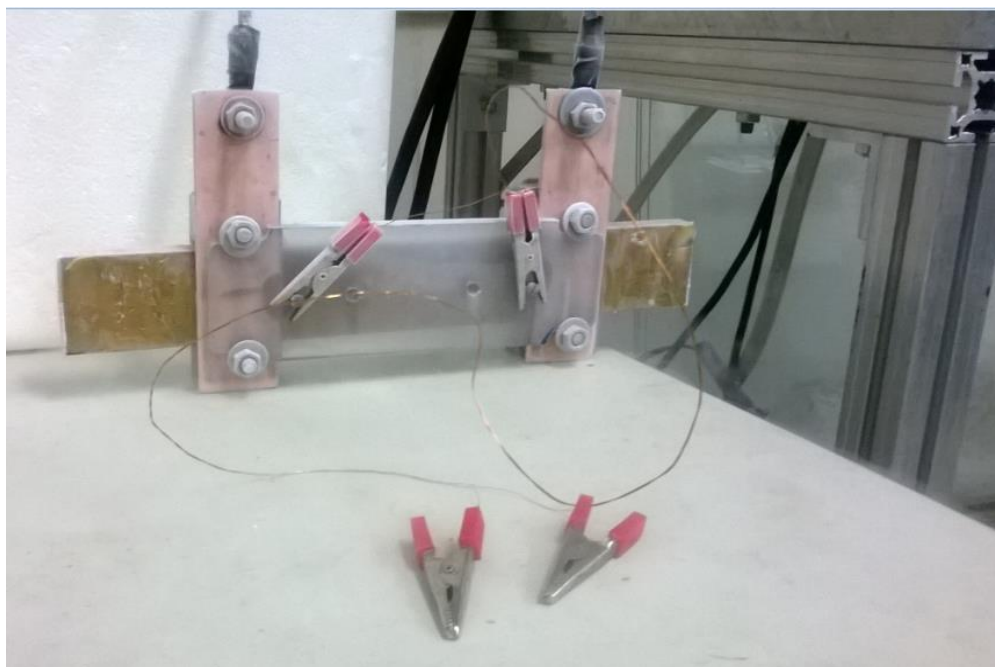


Figura 35 – Suporte adaptado com placa de policarbonato para medições sem soldagem dos terminais do nanovoltímetro.

Feita as conexões dos terminais do nanovoltímetro e da fonte de corrente, coloca-se o suporte no interior de uma caixa de isopor e derrama-se paulatinamente o nitrogênio líquido dentro da caixa de isopor até cobrir a amostra conforme mostra a Figura 36.



Figura 36 – Foto do suporte adaptado imerso em nitrogênio líquido

Antes de iniciar o ensaio, a amostra, o suporte e o nitrogênio líquido deverão atingir o equilíbrio térmico que pode ser constatado, razoavelmente, com a diminuição do borbulhamento do nitrogênio líquido. O suporte adaptado pode apresentar problemas de contato elétrico, pois a água contida no ar próximo a ele pode se condensar dificultando a passagem de corrente elétrica. Uma alternativa de solução é colocar pequenas tiras de folha de Índio entre as barras de cobre e a amostra, o que aumenta consideravelmente o contato elétrico. A figura 37 mostra uma das tiras de folha de Índio sobre a amostra e uma das barras de cobre a ser encaixada.



Figura 37 – Foto de uma tira de folha de Índio entre a extremidade de um segmento de fita 2G e a barra de cobre

Após todo esse procedimento, os parâmetros de ensaio deverão ser definidos através do programa em Labview. O programa em Labview, desenvolvido pelo engenheiro Felipe Sass, M.Sc., permite a simulação do ensaio em tempo real, o controle e o levantamento da curva Tensão (V) versus Corrente (A). A configuração dos parâmetros de ensaio é feita em três etapas: Configuração, Entrada de dados e Ensaio.

1. Configuração: Nesta primeira etapa é definido o número de pontos previstos para o ensaio através do preenchimento do campo Número de Aquisições. A duração de cada pulso de aquisição é estabelecida no campo Intervalo Entre Aquisições (unidade em segundos). A duração de pulsos é um dos parâmetros importantes neste trabalho, pois através de sua variação pode-se assegurar a medida mais adequada. Já a determinação do critério de parada é feita através do campo Campo Elétrico Máximo (na unidade de $\mu\text{V} / \text{mm}$). O campo Comprimento da Amostra (unidade em mm) não é o comprimento da emenda, mas sim, a distância entre os terminais do nanovoltímetro. Finalmente, o campo Tensão Máxima na Amostra (unidade em μV) é preenchido automaticamente com o preenchimento dos demais e é um parâmetro que interrompe o ensaio estando em função do critério de parada e do campo Comprimento da Amostra. O painel Configuração é mostrado na Figura 38.

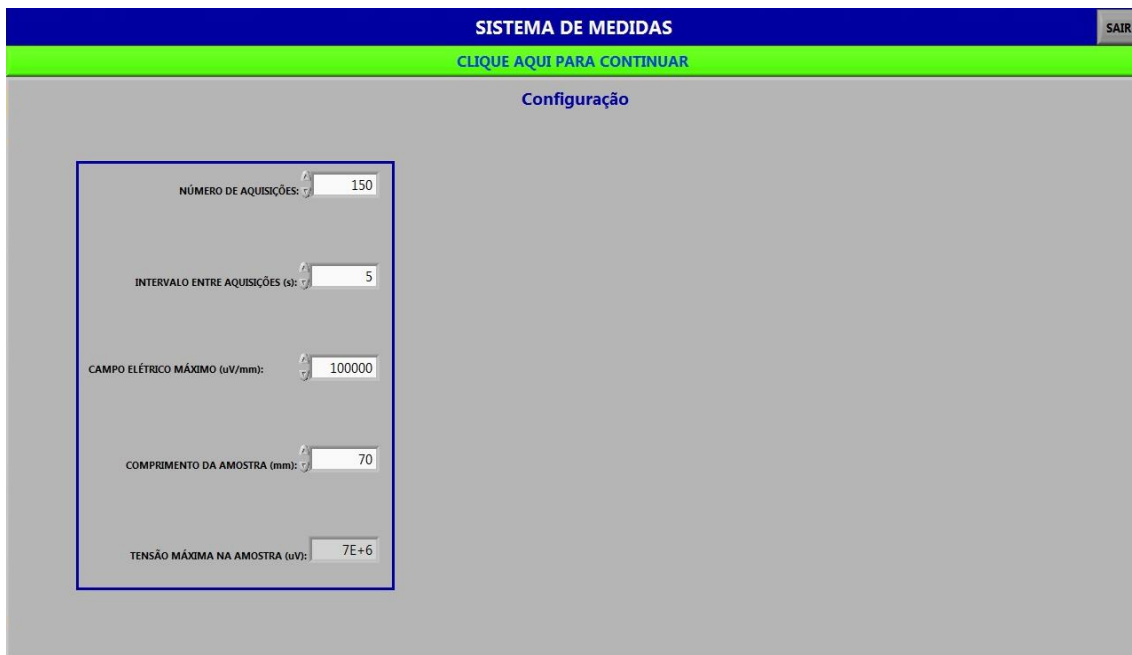


Figura 38 – Painel de Configuração do programa em Labview

2. Entrada de dados: nesta etapa é programada a progressão do ensaio ao longo do intervalo de pontos definidos anteriormente. Os campos Posição Inicial e Posição Final define o intervalo de pontos aos quais será aplicada uma determinada sequência de pulsos. A sequência de pulsos é especificada pelos campos Posição Inicial, incremento de corrente a cada pulso, que é definida pelo campo Variação de Corrente (unidade em A), e pelo número de intervalos em que os pulsos de corrente são nulos, que é definido pelo campo Incremento de Posição. O campo Incremento de Posição, também chamado neste trabalho de número de intervalos de tempo de descanso (NTD), é um dos parâmetros importantes, pois juntamente com o valor do parâmetro intervalo de tempo entre aquisições (Δt), estabelecido no painel Configurações, permitem que a amostra tenha um tempo para dissipar a energia térmica recebida a cada pulso de corrente passada, evitando possíveis interferências entre cada medição. Os valores desses dois parâmetros devem ser ajustados de tal maneira a se ter ensaios otimizados. A Figura 39 mostra a relação entre esses dois parâmetros de ensaio.

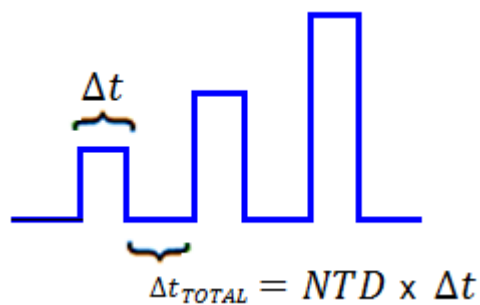


Figura 39 - Ilustração de uma sequência de pulsos de corrente mostrando a relação entre Δt , NTD e o intervalo de tempo total Δt_{TOTAL} em que a corrente é nula.

Uma coluna 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, conforme o que foi programado anteriormente. A Figura 40 mostra o painel Entrada de dados.



Figura 40 – Painel de Entrada de Dados do programa em Labview

3. Ensaio: nesta última etapa, os dados pré-estabelecidos são carregados através do botão Carregar Dados. O painel Ensaio apresenta uma planilha com 5 colunas a saber: Corrente Planejada (A), Corrente Medida (A), Tensão (V), Instante (ms) e Data. Os valores de correntes definidos anteriormente aparecem na coluna Corrente Planejada (A) após o carregamento de dados. Os valores das demais colunas serão preenchidos automaticamente após o início do ensaio através do clique no botão

verde Iniciar Ensaio. Ao acionar o início do ensaio, uma tarja com ajuste automático do nanovoltímetro aparece, dando início ao ensaio. Durante o ensaio os dados coletados podem ser vistos não só nas quatro colunas mencionadas acima, como também, através de dois gráficos que se localizam abaixo da referida planilha. Um gráfico mostra cada ponto com coordenadas de tensão e corrente sendo plotado em tempo real e, o outro, a progressão do ensaio através da sobreposição entre a sequência de pulsos de corrente estabelecida (em azul) e a medida (em vermelho) com o tempo em segundos. A qualquer momento o ensaio pode ser interrompido manualmente através da tarja vermelha com o comando Interromper Ensaio. Os campos Resistência (ohms) e R-quadrado mostram os valores da resistência elétrica instantânea da emenda e o valor percentual de melhor ajuste da curva (reta) a dispersão de pontos obtidos respectivamente. O R-quadrado, também chamado de coeficiente de determinação, é uma medida de ajuste, neste caso, da Regressão Linear, em relação aos valores observados. Neste caso, ele mede a proporção da variabilidade em V (tensão elétrica sobre a amostra) que é explicada por I (corrente gerada pela fonte). É uma função direta da correlação entre as variáveis V e I, ou seja, pode ser expresso, no caso de uma variável explicativa, por

$$R - \text{quadrado} = \frac{[\sum_{i=1}^n (I_i - \bar{I})(V_i - \bar{V})]^2}{[\sum_{i=1}^n (I_i - \bar{I})^2][\sum_{i=1}^n (V_i - \bar{V})^2]}$$

O valor de n representa o número de pontos utilizados na plotagem, I_i e V_i são os valores de corrente e tensão observados e \bar{I} e \bar{V} são os valores médios de corrente e tensão respectivamente. Os melhores ajustes lineares de R-quadrado estão abaixo e próximos de 1,0000, do contrário, o resultado obtido pode ser descartado. Assim, o R-quadrado serve para avaliar se a medição da variável independente corrente (I) explica de forma satisfatória a variável dependente tensão (V). Neste trabalho foram considerados valores de R-quadrado entre 0,9900 e 1,0000 como sendo satisfatório. Vale ressaltar que foi utilizada uma estatística com distribuição normal embora existam outras possibilidades de distribuição estatística e os erros associados às medições da fonte de corrente e do nanovoltímetro são irrisórios frente aos valores do R-quadrado, por isso não foram considerados no cálculo da resistência elétrica. Os valores finais de resistência elétrica e de R-quadrado indicados pelo programa não são confiáveis, pois o programa considera nos cálculos desses parâmetros os pontos da região linear e os pontos da região de transição de estado, devendo-se usar um programa apropriado que permita a seleção dos pontos da região do estado supercondutor (região linear) para a obtenção de resultados fidedignos. A Figura 41 mostra o painel Ensaio.



Figura 41 – Painel de Ensaio do programa em Labview

Uma vez terminado o ensaio, seja por interrupção forçada, término da sequência de pontos programada ou alcance do critério de parada, o programa gera um arquivo de texto puro com extensão em “txt” contendo os dados nas cinco colunas mencionadas que pode ser salvo através do botão Salvar Dados. A Figura 42 mostra um exemplo de arquivo de texto gerado pelo programa.

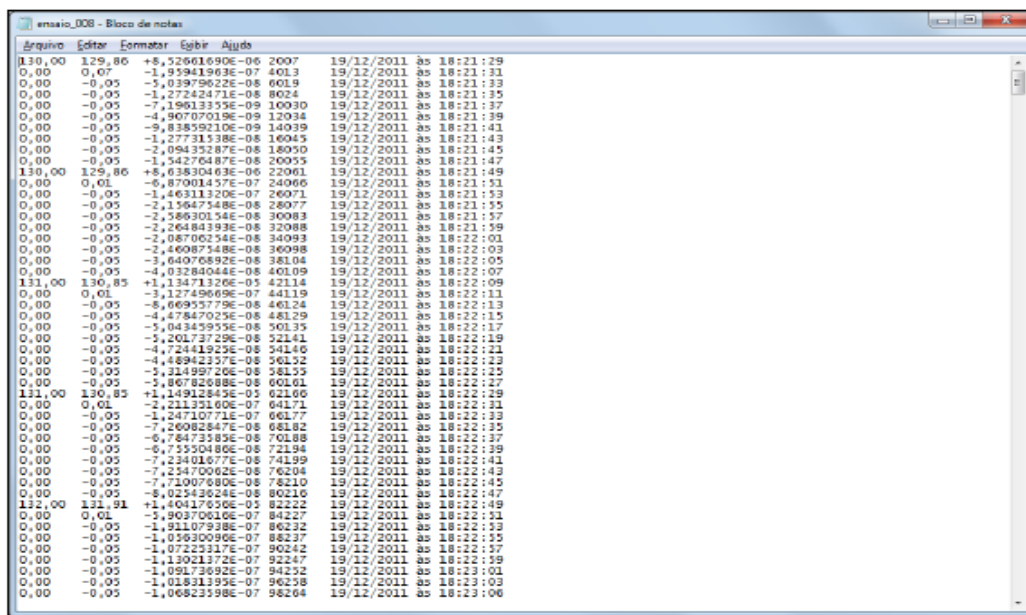


Figura 42 – Exemplo de arquivo de texto com os dados de ensaio gerado pelo programa em Labview. Figura adaptada (MARTINS, 2012)

Os dados obtidos do ensaio, através do arquivo de texto gerado por ele, são preparados para plotagem de gráficos $V \times I$ no Excel. Desta forma, são obtidos os valores de resistência elétrica e o valor do R-quadrado. A Figura 43 mostra um esboço de um gráfico típico para estes tipos de experimentos.

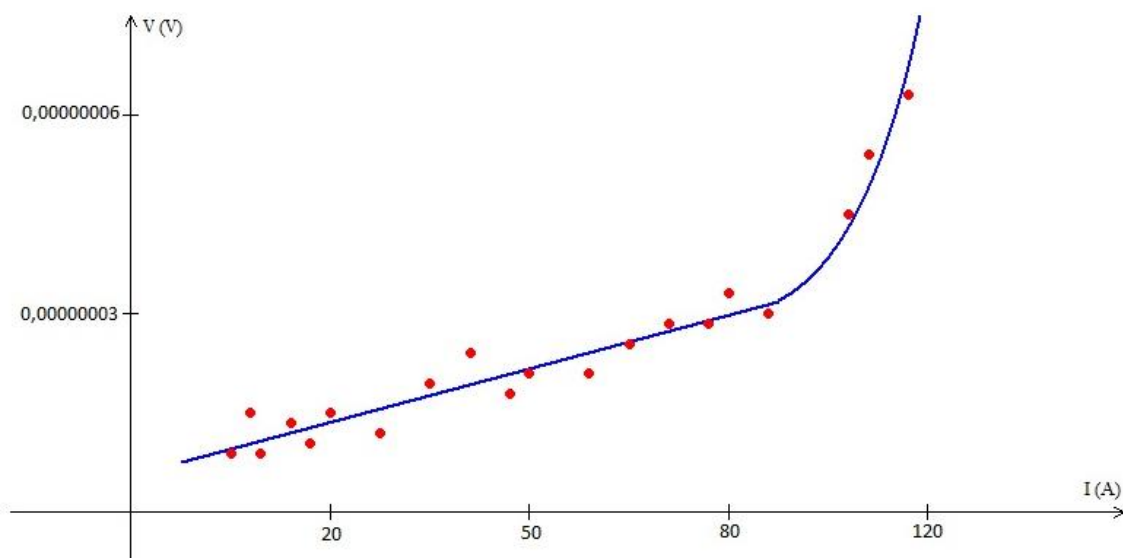


Figura 43 - Uma ilustração de um gráfico típico $V \times I$ de emendas de fitas 2G

4.3. Ensaio

Nesta seção, serão apresentados os dados e resultados experimentais de cada emenda confeccionada por um dos três métodos de soldagem mostrados no capítulo 4. Os resultados consistem nos valores de resistência elétrica das emendas, considerando um valor de R-quadrado mais próximo de 1. Os dados e resultados são apresentados através de gráficos e tabelas que contêm alguns parâmetros de configuração de ensaio e de confecção da emenda, a fim de caracterizar as amostras. Resultados:

1. Amostras feitas pelo Método de Soldagem Manual (MM)

Os primeiros resultados mostrados a seguir são de amostras com emendas de liga de 52%In-48%Sn unindo dois segmentos de fita 2G, tendo cada segmento 11 mm

de comprimento. A estação de solda foi ajustada para 180°C na confecção destas emendas. A primeira emenda possui 50 mm de comprimento e foram feitos vários experimentos com ela para um mesmo intervalo de tempo entre aquisições (Δt) igual a 2 s. Para cada experimento, utilizou-se um número de intervalos de tempo de descanso (NTD) diferente. A Tabela 1 mostra os resultados obtidos com essa primeira amostra.

Tabela 1 – Relação entre a resistência elétrica (R) da emenda de 50 mm, feita pelo MM, e o número de intervalos de tempo de descanso (NTD).

NTD	R (nΩ)	R-quadrado
2	22,83	0,9164
5	24,45	0,9839
8	23,96	0,9358
11	26,39	0,8937
14	24,60	0,9331

Os experimentos terminavam quando se atingia a tensão máxima que era de 5 μV na qual a corrente era cerca de 110 A (corrente crítica I_c). Os dados de tensão e corrente, para o cálculo das resistências da Tabela 1 e de todas as demais tabelas apresentadas neste trabalho, foram considerados até a corrente de 80 A que é a corrente crítica mínima segundo o manual da fita 2G SCS4050 da SuperPower. Pela Tabela 1, a resistência média é igual a 24,45 nΩ e o desvio padrão igual a 1,3. Com o aumento do NTD, espera-se que o valor da resistência elétrica aumente, pois o intervalo de tempo entre cada pulso diminui. Perceba, porém, que pela Tabela 1 isso não acontece quando NTD é igual a 8 ou igual a 14. Uma explicação para esse desvio de comportamento da curva de caracterização pode ser obtida pelo gráfico mostrado abaixo, conforme mostra a Figura 44.

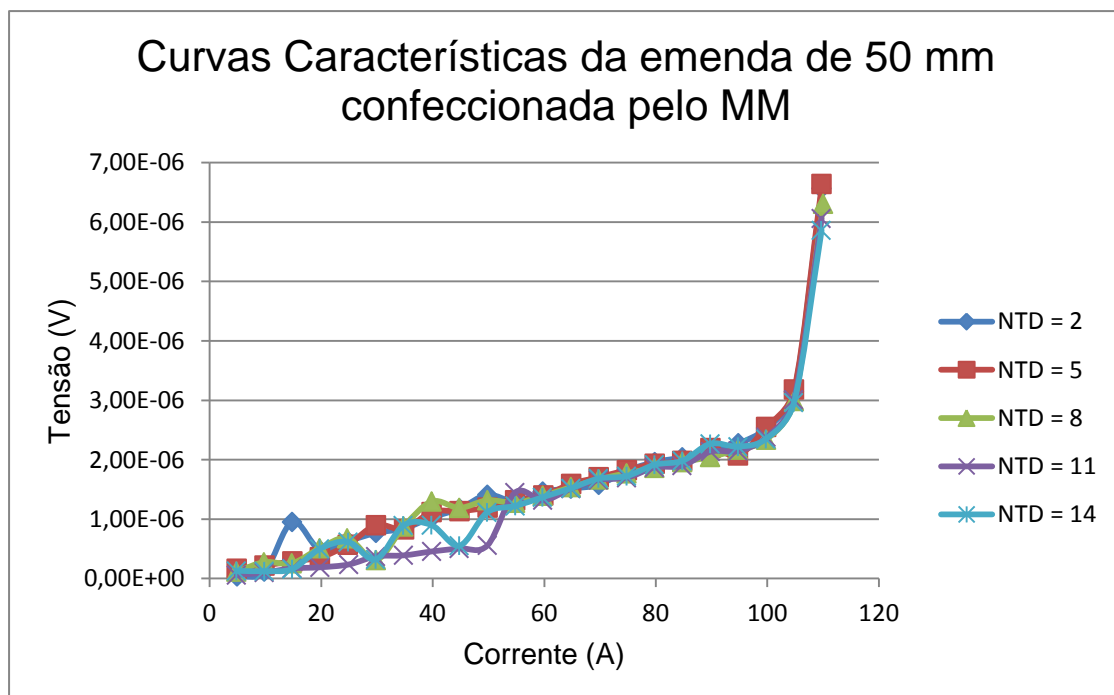


Figura 44 – Curvas Características da emenda de 50 mm confeccionada pelo MM e plotadas para cada NTD

Na Figura 44, observe que as curvas para NTD igual a 8 e para NTD igual a 14 há alguns pontos muito dispersos da tendência linear das suas curvas, fato que não ocorre com as demais curvas. Na curva para NTD igual a 8 há um ponto em que a tensão está muito abaixo do valor que se deveria ter para aquela corrente. O mesmo ocorre na curva para NTD igual a 14, onde há dois pontos muito abaixo da linha de tendência. A causa para tal fato, pode ser devido a ruídos ou interferências na medição em tais pontos, devido à variação de temperatura na amostra que ocorre geralmente no início das medições. A causa de tais interferências entre uma medição e outra pode ser o fato de o intervalo de tempo entre aquisições ser igual a 2 s, um tempo relativamente curto.

Os próximos resultados são oriundos de outra amostra com uma emenda de 70 mm. Os procedimentos de confecção de emenda são os mesmos da primeira amostra. Sendo que, agora, o NTD foi fixado no valor igual a 5 e fez-se variar o Δt . Os resultados são mostrados pela Tabela 2 e pelo gráfico da Figura 45.

Tabela 2 – Relação entre resistência elétrica (R) e intervalo de tempo entre aquisições (Δt) para uma emenda de 70 mm feita pelo MM.

Δt (s)	R (n Ω)	R-quadrado
2	32,09	0,9599
5	23,95	0,9975
8	22,88	0,9958
11	23,87	0,9881

Em todos os experimentos a corrente crítica registrada foi de 115 A, exceto no experimento em que Δt é igual a 11 s, para este caso, a corrente crítica foi de 110 A. Pela Tabela 2, a resistência elétrica média é igual a 25,70 n Ω e o desvio padrão igual a 4,3. A explicação para o alto valor do desvio padrão está no primeiro experimento desta emenda, onde Δt é igual a 2 s, um intervalo de tempo considerado pequeno, motivo pelo qual a resistência elétrica obteve um valor bem acima dos demais e um erro quadrático ainda abaixo de 0,9900. Há a possibilidade de que com o aumento de Δt a resistência elétrica diminua, entretanto para Δt igual a 11 s tal fato não ocorreu, pois tal medida não apresentou uma dispersão adequada como pode ser comprovado pela Tabela 2 e a Figura 45. As curvas de caracterização para a emenda de 70 mm são mostradas pela Figura 45.

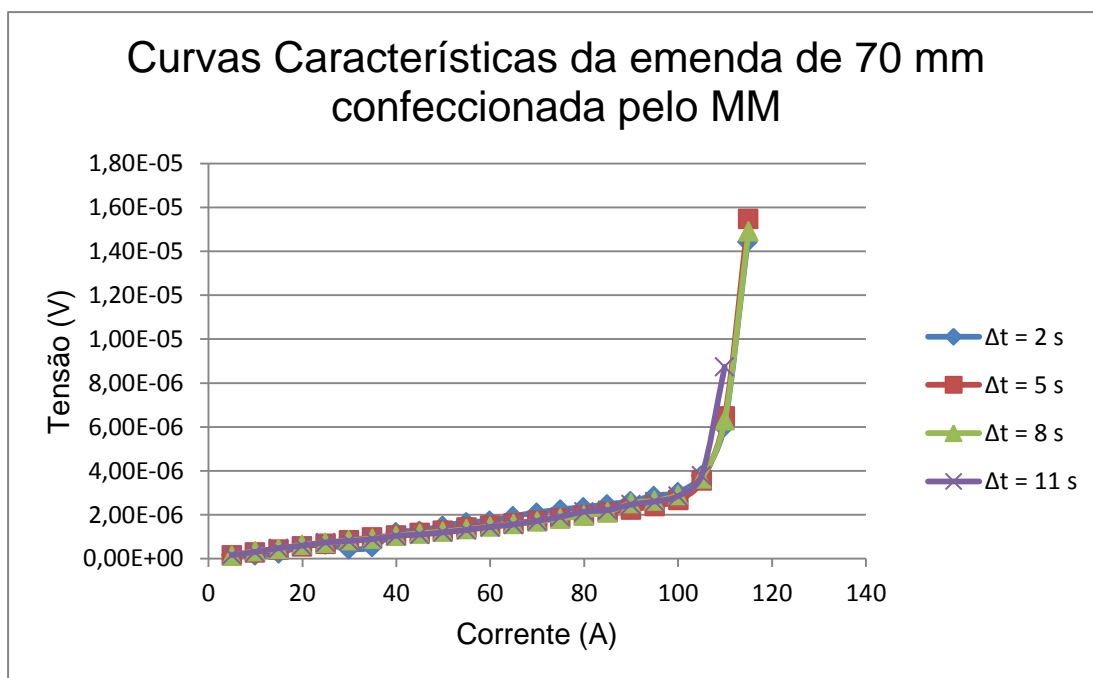


Figura 45 – Curvas Características da emenda de 70 mm confeccionada pelo MM e plotadas para cada Δt

2. Amostras feitas pelo Método com Dispositivo Aquecedor (MDA)

Os resultados apresentados a seguir se distingue dos anteriores pelo fato de a soldagem ser feita através de um dispositivo aquecedor com reguladores de temperatura. A primeira emenda confeccionada pelo MDA possui um comprimento de 60 mm. Todos os parâmetros de ensaio foram fixados, exceto o intervalo de tempo entre aquisições (Δt). O número de intervalos de tempo de descanso (NTD) foi fixado e é igual a 5. Os resultados da Amostra 1 é dado pela Tabela 3.

Tabela 3 – Relação entre resistência elétrica (R) e intervalo de tempo entre aquisições (Δt) da Amostra 1 com emenda de 60 mm feita pelo MDA.

Δt (s)	R (n Ω)	R-quadrado
2	25,77	0,9477
5	25,16	0,9997
8	25,48	0,9997
11	24,99	0,9998

A corrente crítica alcançou os 110 A em todos os experimentos, exceto no experimento em que Δt foi igual a 2 s, neste caso, a corrente crítica foi de 115 A. Mais uma vez, para Δt igual a 2 s, assim como nos casos anteriores, o valor do R-quadrado está abaixo de 0,9900 o que explica a dispersão de alguns pontos para esta medida. Pela Tabela 3, a resistência elétrica média é igual a 25,35 n Ω e o desvio padrão igual a 0,35. O gráfico da Figura 46 mostra que as curvas de caracterização possuem uma ótima tendência linear com pouca dispersão dos pontos. A Figura 46 mostra as curvas características da Amostra 1.

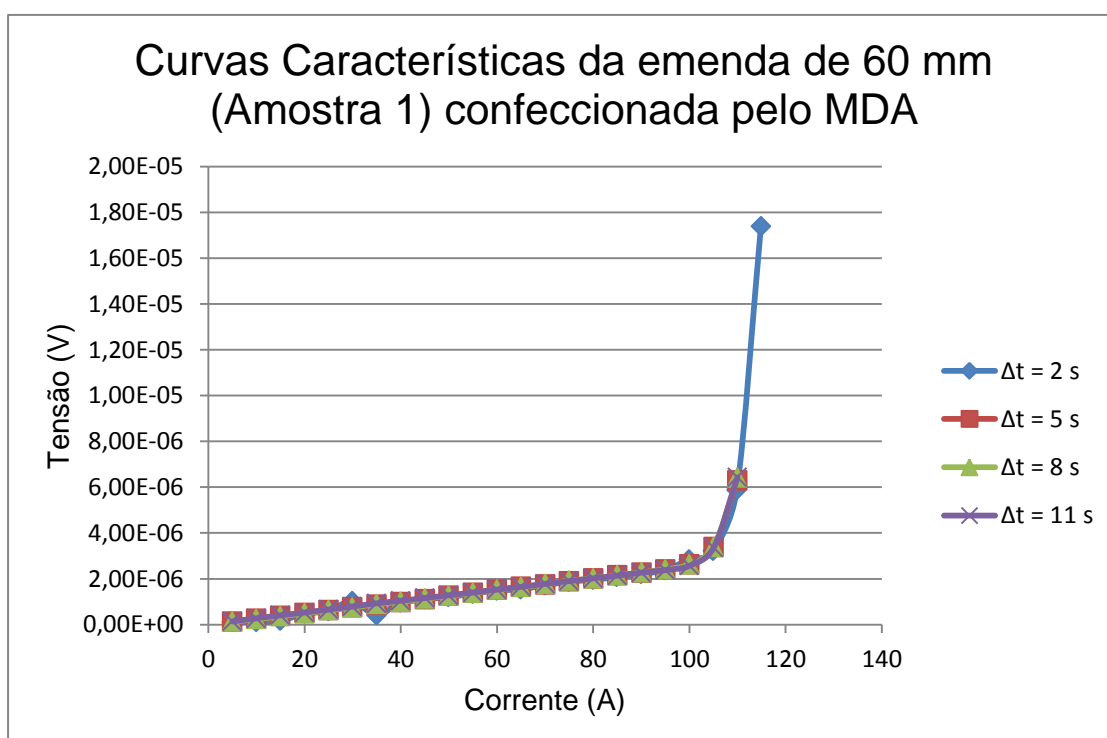


Figura 46 – Curvas Características de uma emenda de 60 mm (Amostra 1) confeccionada pelo MDA e plotadas para cada Δt

A próxima amostra, Amostra 2, é semelhante a Amostra 1, pois possui uma emenda de 60 mm de comprimento, tendo sido submetida ao mesmo método de confecção de emendas (MDA) e os mesmos parâmetros de ensaio foram utilizados. O objetivo deste ensaio foi verificar a repetibilidade dos resultados através da comparação da Tabela 3 com a Tabela 4. Os resultados da Amostra 2 é dado pela Tabela 4.

Tabela 4 – Relação entre resistência elétrica (R) e intervalo de tempo entre aquisições (Δt) da Amostra 2 de 60 mm feita pelo MDA.

Δt (s)	R (n Ω)	R-quadrado
2	27,27	0,9453
5	26,17	0,9982
8	25,60	0,9951
11	24,11	0,9969

A corrente crítica em todos os experimentos feitos com a Amostra 2 foi de 110 A. Pela Tabela 4, a resistência elétrica média é igual a 25,79 n Ω e o desvio padrão igual a 1,32. A repetibilidade dos resultados foi assegurada por este método, uma vez que os valores médios das resistências elétricas das Tabelas 3 e 4 estão bem próximos. Apesar de o MM também apresentar repetibilidade e alguns experimentos com valores de resistência elétrica até menores do que as deste método, o MDA apresentou melhor dispersão dos pontos do que o MM o que prova que a qualidade das emendas são superiores. A Figura 47 mostra as curvas características obtidas nos experimentos com a Amostra 2.

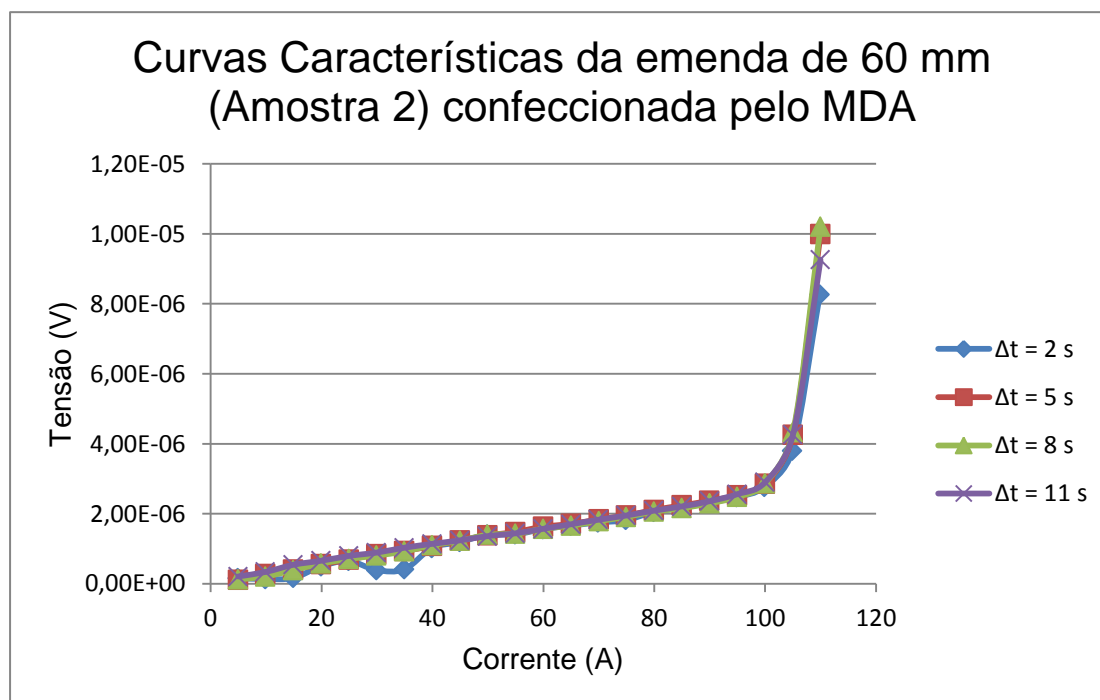


Figura 47 – Curvas Características da emenda de 60 mm (Amostra 2) confeccionada pelo MDA e plotadas para cada Δt

Observe, na Figura 47, que somente na curva característica para Δt igual a 2 s é que houve uma pequena dispersão no intervalo de 20 a 40 A. O motivo já foi explicado e trata-se do pequeno intervalo de tempo entre aquisições (Δt igual a 2 s) que causa interferência entre cada medição.

3. Amostras feitas pelo Método com Prensa Térmica (MPT)

Os próximos resultados são provenientes de amostras confeccionadas pelo MPT. Foram utilizados os dois tipos de liga (52%In-48%Sn e 37%Pb-63%Sn) nos experimentos, mas somente serão mostrados os resultados com a liga de Índio-Estanho, pois o outro tipo de liga apresentou resistências elétricas acima de 60 nΩ.

Todos os dados e resultados serão apresentados em uma única tabela contendo informações sobre os valores dos parâmetros de ensaio e as técnicas de soldagem utilizadas neste método. O tempo de aquecimento para a fusão da liga foi de 2 min para a confecção de todas as emendas por este método. Os resultados experimentais obtidos com as emendas elaboradas pelo MPT é dado pela Tabela 5.

Legenda dos parâmetros de ensaio:

NTD - Número de intervalos de tempo de descanso

Δt – Intervalo de tempo entre aquisições (em segundos)

Legenda dos parâmetros de soldagem:

LJ – Junção tipo Lap Joint

ALJ – Junção totalmente sobreposta e unida pelo centro

CE – Comprimento da Emenda (em mm)

PA – Pressão Aplicada sobre a amostra (em psi)

LL – Liga Laminada

LDS – Liga Depositada por Soldagem manual

Legenda dos resultados:

R – Resistência elétrica (em $n\Omega$)

Tabela 5 – Relação entre resistência elétrica (R) das emendas feitas pelo MPT e os parâmetros de ensaio e confecção das emendas.

	NTD	Δt	Junção	CE	Liga	PA	R	R-quadrado
Amostra 1	5	5	ALJ	40	LL	35	47,5	0,9202
Amostra 2	4	5	ALJ	40	LL	30	26,5	0,6923
Amostra 2	5	5	ALJ	40	LL	30	53,9	0,7115
Amostra 3	5	8	ALJ	60	LL	30	72,1	0,9752
Amostra 3	10	2	ALJ	60	LL	30	74,2	0,9388
Amostra 4	5	5	LJ	70	LDS	35	37,2	0,9765

O MPT foi uma tentativa de se obter um método mais prático que o MDA e que proporcionasse resistências menores. De fato o MPT foi o método mais prático, porém algumas medições revelaram resistências da ordem de $50 \text{ n}\Omega$ um valor relativamente alto para os objetivos deste trabalho. Além disso, outras medidas dos valores de resistência não puderam ser validadas devido ao baixo valor do R-quadrado. Alguns aperfeiçoamentos foram feitos no MPT, utilizando-se de técnicas combinadas, como por exemplo, a deposição da liga no segmento de fita 2G através da ponteira achatada da estação de solda para posterior soldagem dos dois segmentos na prensa térmica. Essa técnica possibilitou uma redução do valor da resistência da emenda pelo MPT como pode ser observado na 6ª linha da Tabela 5, mas ainda não satisfaz aos requisitos estabelecidos neste trabalho. Outras emendas seriam feitas com LDS, mas devido à falta de fluxo de solda no laboratório e a outros empecilhos não foi possível obter outros dados experimentais. A maior parte das curvas características mostrada na Figura 48 apresentou uma dispersão dos pontos bastante acentuada. A curva característica da emenda feita com LDS não apresentou essa característica irregular, assim como a curva da Amostra 1.

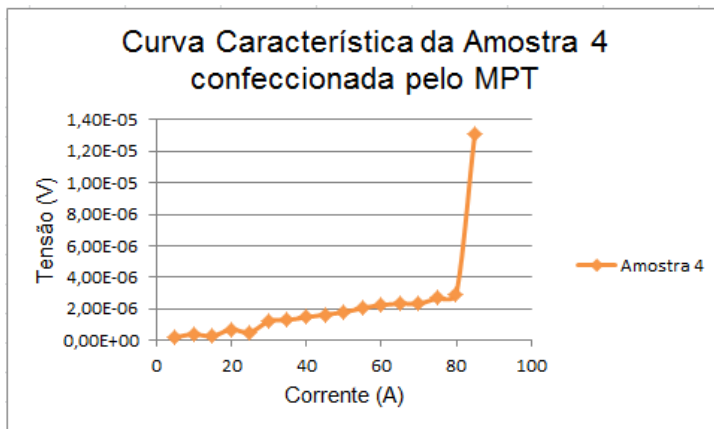
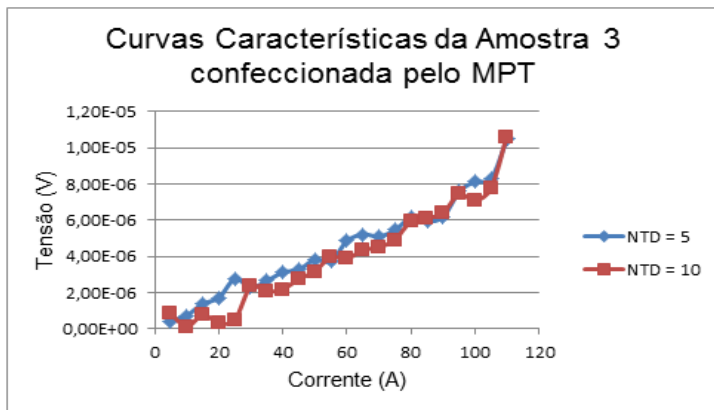
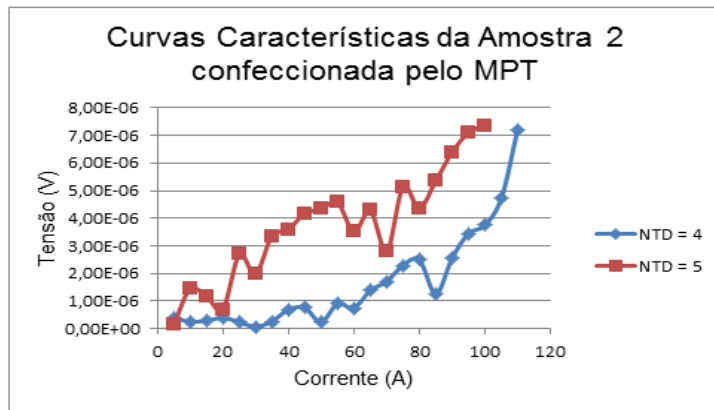
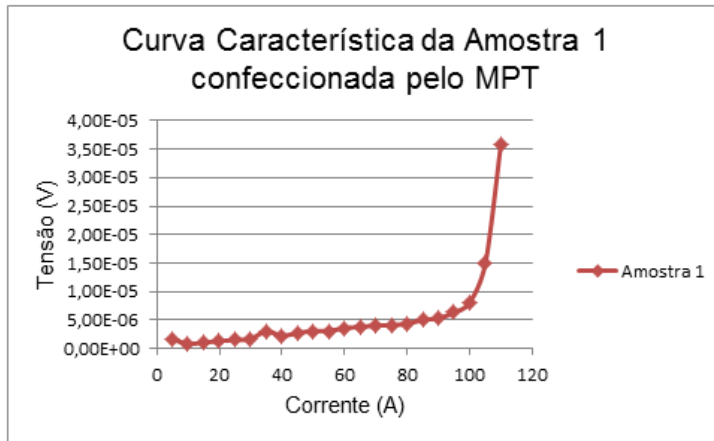


Figura 48 – Gráficos das Curvas Características das Amostras confeccionadas pelo MPT e plotadas de acordo com os parâmetros de ensaio da Tabela 5

5. Conclusão

A caracterização de fitas supercondutoras 2G com juntas soldadas é uma tarefa delicada e que exige um controle mais preciso tanto do processo de caracterização quanto do processo de confecção das emendas, pois pequenas variações nas dimensões da emenda ou na sua temperatura de soldagem podem provocar consideráveis variações nos valores de resistência elétrica.

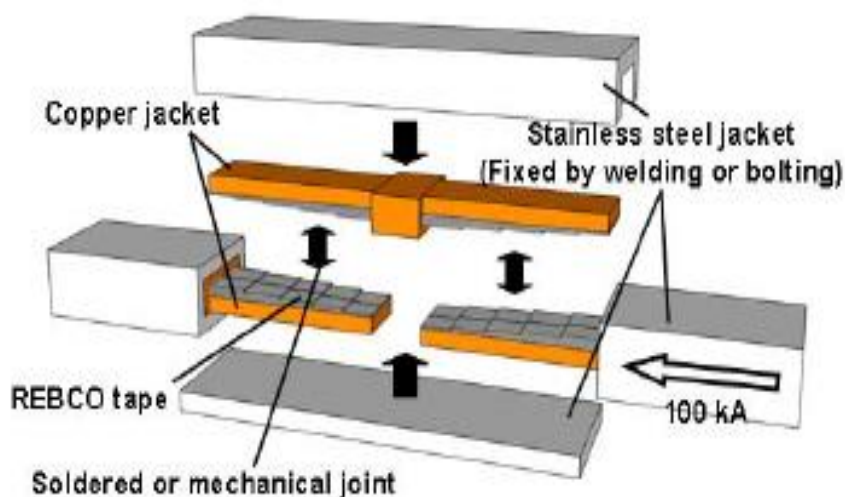
Com os resultados e as experiências obtidas neste trabalho, observou-se que há quatro aspectos relevantes que devem ser considerados para se produzir melhorias nos resultados e na qualidade da emenda. São eles: a uniformidade da solda entre os dois segmentos de fita 2G com a menor espessura possível, a precisão na temperatura de fusão da liga e no seu tempo mínimo de aquecimento para completa fusão da liga, o devido alinhamento dos segmentos de fita 2G na soldagem e os contatos elétricos nas conexões que proporcione a maior corrente elétrica.

Quanto ao primeiro aspecto foi comprovado que a utilização da liga laminada proporciona maiores valores de resistência elétrica do que o uso da deposição da solda por solda manual. A deposição por solda manual facilita o aumento da área de contato entre os segmentos, evitando a formação de vacâncias, pois a solda já permanece espalhada por toda a área dos segmentos a serem unidos. Em se tratando de valores da ordem de nano-ohms, pequenas variações na temperatura e no tempo de aquecimento da liga podem proporcionar consideráveis variações nos valores da resistência elétrica da emenda. Todos os métodos de soldagem tiveram algum meio de ajuste e regulagem da temperatura e do tempo de aquecimento, mas não suficiente para a precisão exigida neste tipo de medição. Todos os métodos podem garantir o alinhamento dos segmentos, com exceção do MPT em que se devem usar os blocos de alumínio como alinhadores e dissipadores. Já no processo de caracterização, outro aspecto, é a garantia de contatos elétricos adequados nas conexões de tal maneira que proporcione a maior corrente elétrica na amostra. A causa desse problema está no fato de a água contida no ar se condensar, formando “gelo” o que dificulta a passagem da corrente. Uma alternativa de solução adotada, para as emendas feitas por qualquer método, foi a utilização de tiras de folha de Índio postas entre a amostra e as barras de cobre do suporte. Conectores com encaixes internos também poderiam ser utilizados para evitar a ocorrência desse tipo de problema.

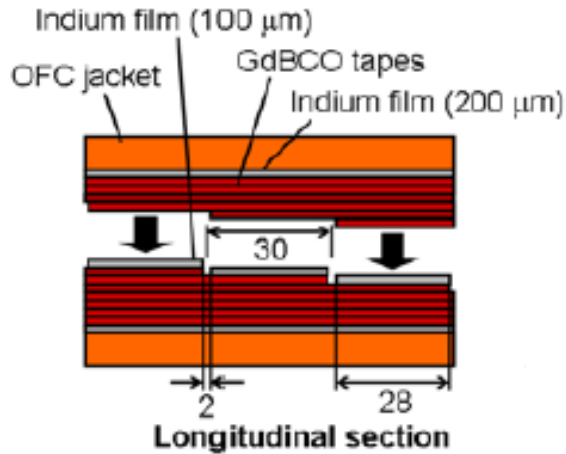
Levando em consideração todos os aspectos citados e comprovados experimentalmente, o MDA foi o melhor método indicado para a confecção das

emendas e, no processo de caracterização, os terminais do nanovoltímetro soldados sobre a amostra. A resistência média foi em torno de 25 nΩ para uma emenda de 60 mm de comprimento feita por este método. Este resultado mostra a proximidade com os valores especificados pelo fabricante, como por exemplo, os valores entre 10 e 20 nΩ para uma emenda de 100 mm, já que com o aumento do comprimento da emenda o valor da resistência elétrica tende a diminuir. Neste trabalho não foi possível medir resistências com emendas de 100 mm, pois o comprimento do suporte não permitiu. O MDA foi o único método que se mostrou razoavelmente prático e que garantiu a repetibilidade.

Um trabalho futuro poderia aperfeiçoar o MPT com um sistema de controle do processo mais preciso, fazendo uso de termopares PT100. Os termopares postos nas extremidades dos segmentos de fitas 2G poderiam indicar uma temperatura mais próxima e precisa do valor de temperatura da liga sendo aquecida durante a compressão. Já o pirômetro juntamente com os termopares PT100 poderiam ser utilizados no MDA para aperfeiçoamento deste, aumentando a precisão do sistema de medida da temperatura, evitando um tempo de aquecimento desnecessário. Outra possibilidade de aperfeiçoamento deste trabalho é a confecção de emendas do tipo ponte, conforme mostra o artigo científico com o título “Performance Evaluation of the Mechanical Bridge Joint for 30 kA Class HTS Conductor Samples” (ITO, SATOSHI, *et al.*, 2013). A Figura 49 mostra a junção em ponte de segmentos de HTS.



(a)



(b)

Figura 46 – (a) Ilustração de emendas com junções em ponte, (b) Ilustração em corte longitudinal das junções em ponte. Figura adaptada de (ITO, KAWAI, *et al.*, 2006).

Ao invés de serem soldados com uma liga de baixo ponto de fusão, os segmentos de fita 2G poderiam ser unidos através de uma pequena tira de folha de Índio por compressão contínua. Desta maneira, a resistência elétrica na emenda poderia ser menor, além de poupar os segmentos de fita 2G de serem aquecidos numa soldagem.

As emendas com os melhores valores de resistência elétrica obtidos neste trabalho ou num trabalho futuro poderiam ser aproveitadas na construção de bobinas supercondutoras, adequadas para a composição de motores elétricos. Quanto mais baixa a resistência elétrica nas emendas, mais altas serão as correntes que elas poderão conduzir. Desta forma, o LASUP poderia projetar motores mais potentes de volume reduzido e mais eficientes.

6. Referências bibliográficas

ABRIKOSOV, A. A., 1957, "On the magnetic properties of the second group".

Soviet Physics, v. 5, n. 6, pp. 1174-1182.

BALDAN, C.A., *et al.*, 2009, "Evaluation of electrical properties of lap joints for BSCCO and YBCO tapes". *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. v. 19, pp. 2831–2834.

BARDEEN, J., COOPER, L. N., SCHRIEFFER, J. R., 1957, "Theory of superconductivity". *Physics Review*, v. 2, n. 108, pp. 1175-1204.

GINZBURG, V. L., LANDAU, L. D., 1950, "On the theory of superconductivity". *Zh. Eksperim. i Teor. Fiz.*, v. 20, n. 1064.

HAZELTON, D. W., SELVAMANICKAM, V., 2009, "SuperPower's YBCO Coated High-Temperature Superconducting (HTS) Wire and Magnet Applications". *Proceedings of the IEEE*, v. 97, n. 11, pp.1831-1836.

KATO-YOSHIOKA, J., *et al.*, 2006, "Low resistance joint of the YBCO coated Conductor". *J. Phys. Conf. Ser.*, 43, pp. 166–169.

LONDON, F., LONDON, H., 1934, "The Electromagnetic Equations of the Supraconductor". *Proceedings of the Royal Society of London*, A 149, 71.

LU, J., *et al.*, 2011, "Lap joint resistance of YBCO coated conductor". *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. v. 21, pp. 3009–3012.

MEISSNER, W., OCHSENFELD, R., (1933), "Ein neuer Effekt bei Eintritt der Supraleitfähigkeit". *Naturwissenschaften*, 21, pp. 787-788.

M. H. SOHN, *et al.*, 2003, "Joint resistances between two parallel high κ superconducting tapes". *IEEE Transactions Applied Superconductivity*, v. 13, pp. 1764-1767.

- ONNES, H. K., 1911, "The Superconductivity of Mercury". *Comm. Phys. Lab. Univ. Leiden*, 120 b, 124.
- PARK, D.K., *et al.*, 2007, "Analysis of a joint method between superconducting YBCO coated conductors". *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 17, pp. 3266–3269.
- PEI, R., *et al.*, 2009, "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.
- SASS, F., 2011, *Manuais Magnéticos Supercondutores Utilizando Fitas de Segunda Geração*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- SELVAMANICKAM, V., *et al.*, 2009, "High Performance 2G Wires: From R&D to Pilot-Scale Manufacturing". *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 19, n. 3, pp. 3225-3230.
- Wu, M. K., *et al.*, 1987, "Superconductivity at 93 K in a New Mixed-Phase Y-Ba-Cu-O Compound System at Ambient Pressure". *Physical Review Letters*, v. 58, n. 9, pp. 908-910.

7. Anexo

7.1. Manual de Instruções de Soldagem



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.

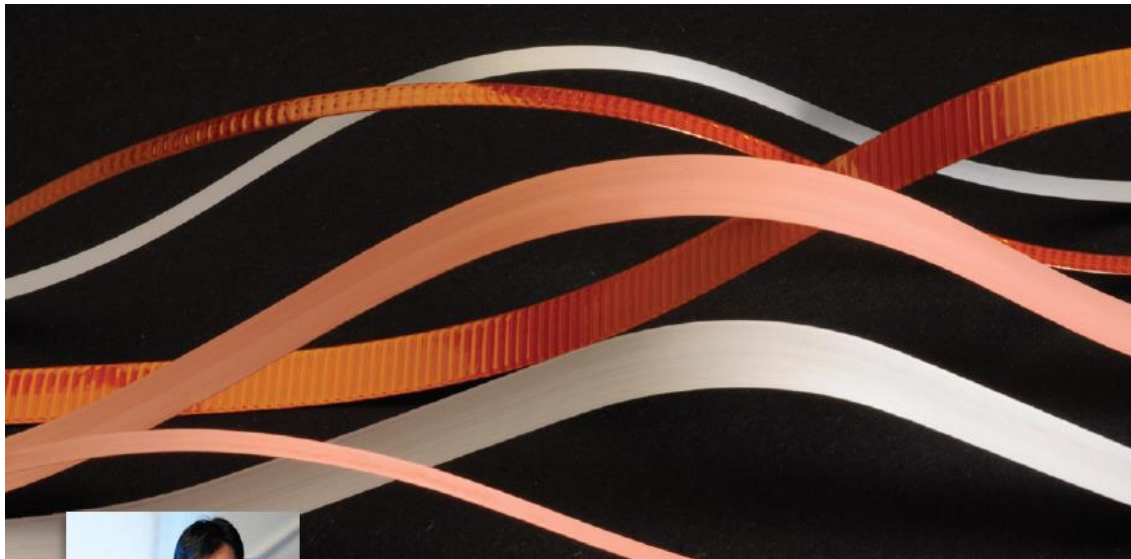
Rev. 3/2008 (30-Nanlang) (Marketing Collateral) (Voting Share) (P) (Confidential) (Internal Use Only)

SuperPower ♦♦♦♦

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

7.2. Fitas 2G



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.

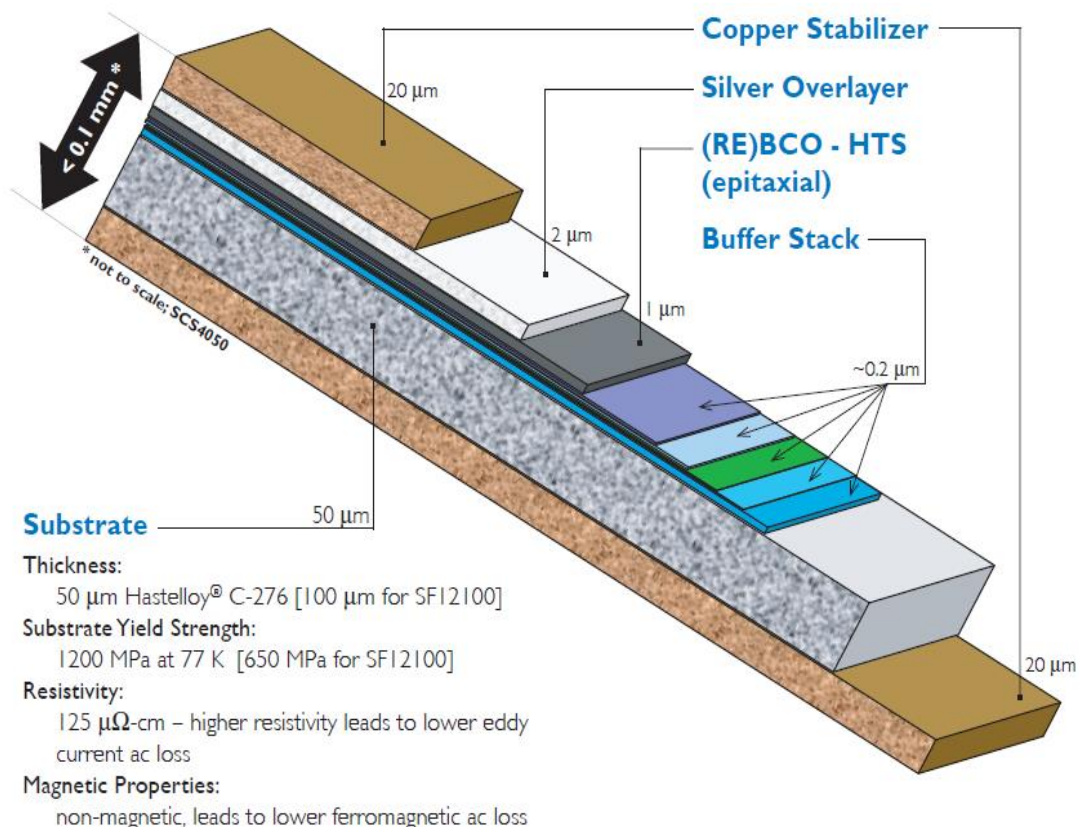
Once the wire has been slit into device-specific widths, Surround Copper Stabilizer (SCS) is applied to completely encase the wire. Overcurrent capability in SCS wire can be tailored to the specific application. The stabilizer protects the conductor and produces rounded edges that are beneficial for 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 SF = Stabilizer Free SCS = Surround Copper Stabilizer	SF2050	SF4050	SCS4050	SF6050	SCS6050	SF12050
Minimum I_c	30	80	80	120	120	240
Widths	2	4	4	6	6	12
Total Wire Thickness	0.055	0.055	0.1	0.055	0.1	0.055
Standard Copper Stabilizer Thickness	n/a	n/a	0.04	n/a	0.04	n/a
Critical Tensile Stress			> 550		> 550	
Critical Axial Tensile Strain	0.45%	0.45%	0.45%	0.45%	0.45%	0.45%
Critical Bend Diameter in Tension	11	11	11	11	11	11
Critical Bend Diameter in Compression	11	11	11	11	11	11



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:

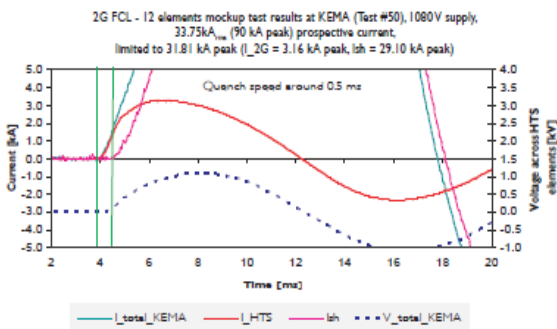
- The world's first in-grid Power Cables utilizing 4 mm wide 2G HTS wire were fabricated by Sumitomo Electric Industries with SuperPower's wire



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

Other applications:

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



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

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

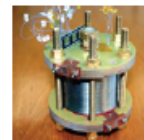
Other custom configurations are available.

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

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

SuperPower® 2G HTS Wire and coil application:

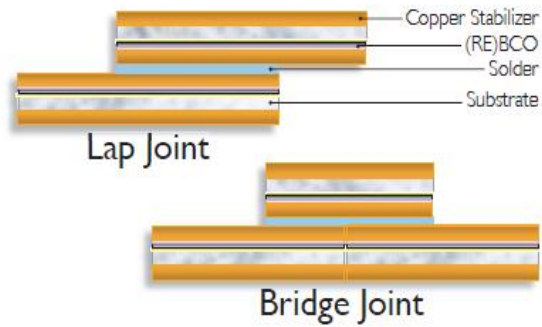
- 2006: High field coil fabricated with 2G HTS wire achieved a record magnetic field of 2.4 Tesla at 64K



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

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

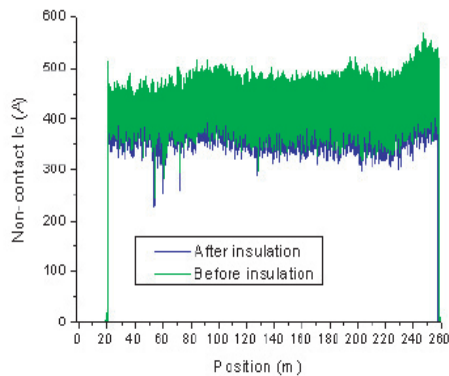




Insulated 2G HTS Wire

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

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



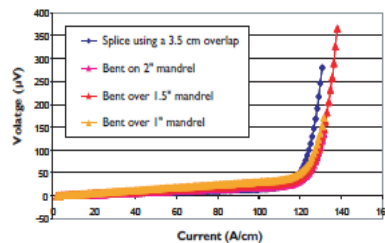
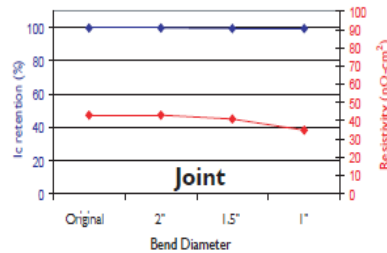
High Quality Joints

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

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

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

- No degradation in I_c ($1 \mu\text{V}/\text{cm}$) 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 $\text{n}\Omega \cdot \text{cm}^2$



PHILIPS

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

Rev. 2.0009 | 00 Marketing/Marketing Collateral/Working Drawings/0009 Working Drawings/SP_00 Wire Spec Sheet_3.0009.indd 1.pdf

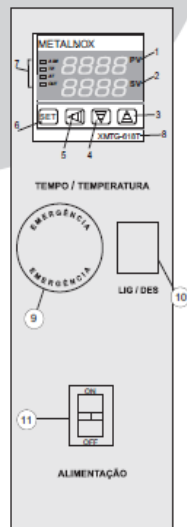
SuperPower, Inc. | 450 Duane Ave. | Schenectady, NY 12304 USA
 Tel: 518-346-1414 | Fax: 518-346-6080
 E-mail: info@superpower-inc.com | Website: www.superpower-inc.com

7.3. Manual da Prensa Térmica



Descrição do Painel de Comando

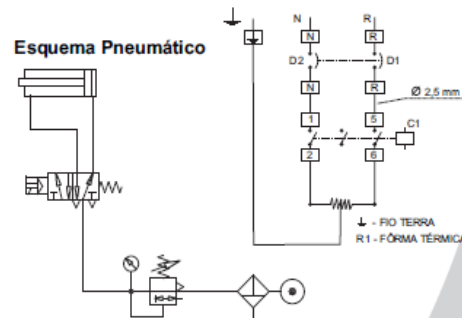
- 1 - Visor da temperatura.
- 2 - Visor do tempo.
- 3 - Tecla "▲" para cima, para aumentar o valor à programar.
- 4 - Tecla "▼" para baixo, para diminuir o valor à programar.
- 5 - Tecla "↔" para esquerda, para alterar a posição do dígito (não utilizada)
- 6 - Tecla "SET", para entrar na programação do controlador.
- 7 - Lado da indicação de:
 - OUT - aquecimento - led ligado aquecimento ativo
 - ALM - Alarme - não utilizado
 - AT - auto atonia do controlador
 - TE - tempo - led ligado tempo ativo
- 8 - Modelo do Aparelho



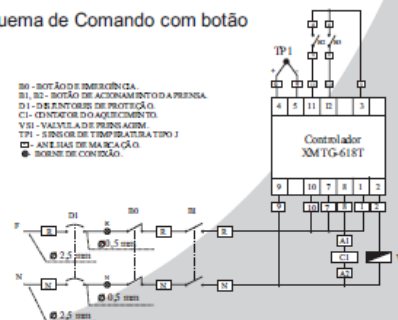
- 9 - Botão Vermelho de Emergência. Para totalmente a máquina quando acionado. Para destravar basta girar no sentido horário.
- 10 - Botão Vermelho - Liga/Desliga geral
- 11 - Disjuntor de proteção

Esquema de Força

Esquema Pneumático



Esquema de Comando com botão



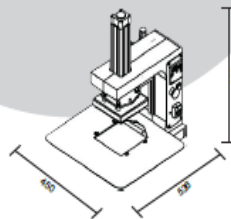
Características Técnicas

Modelo/ Tipo de Ligação	Potência (V)	Consumo de Energia (kW)	Consumo de Ar (m³/h)	Corrente (A)	Compressor Indicado (Pós²/m³)	Água Util (mm)
PLS 150 - 220V	0,5	0,21	1	2,3	3,7	150 x 150
PLS 150 - 110V	0,5	0,21	1	4,6	3,7	150 x 150

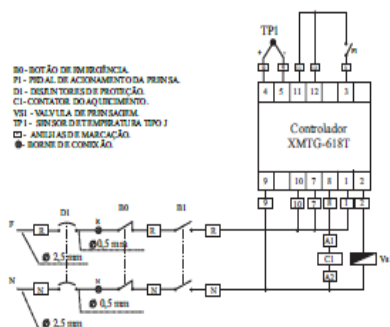
Fio indicado para ligação:
1,5 mm²

Peso bruto:
87,9kg

Peso líquido:
42,4kg



Esquema de Comando com pedal



Sequência de Programação

Como programar tempo e temperatura:

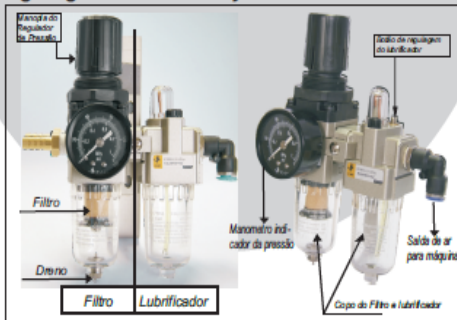
- Para programar a temperatura, aperte a tecla "▲" seta para cima por 3 segundos, então irá aparecer no display superior a expressão "SP" e no display inferior o valor a ser programado. Assim que aparecer a expressão "SP" soltar a tecla "▲" seta para cima.
- Na sequência aperte a tecla "▲" seta para cima ou "▼" seta para baixo e ajuste o valor conforme preciso.
- Após programar o valor desejado pressione a tecla "SET" para confirmar a programação.
- Para programar o tempo, aperte a tecla "▼" seta para baixo por 3 segundos, então irá aparecer no display superior a expressão "TE" e no display inferior o valor a ser programado. Assim que aparecer a expressão "TE" soltar a tecla "▼" seta para baixo.
- Na sequência aperte a tecla "▲" seta para cima ou "▼" seta para baixo e ajuste o valor conforme preciso.
- Após programar o valor desejado pressione a tecla "SET" para confirmar a programação.

Instruções Gerais de Instalação Elétrica

A PRENSA TÉRMICA PLS 150 METALNOX, é fabricada nas versões 220V monofásico e 110V monofásico. Para o bom desempenho do equipamento e para evitar aborrecimentos futuros, observe os itens a seguir:

- a) A máquina deve ser manuseada corretamente com guincho ou paleteira, evitando danos e consequentemente defeitos;
 - b) A máquina deve ser aliçada em um lugar apropriado e bem ventilada;
 - c) A máquina deve ser instalada próxima a um local arejado devido aos gases e vapores saturados, emitidos na hora da prensagem;
 - d) Observe a tensão da rede elétrica local, verificando se coincide com a da máquina;
 - e) Aperte todos os parafusos do painel de comando elétrico e partes mecânicas a cada trinta (30) dias;
 - f) As instalações elétricas devem ser feitas de acordo com as especificações técnicas deste manual;
 - g) A conexão elétrica da máquina deve ser feita através do cabo de ligação situado na parte de trás do painel elétrico do equipamento. Fase e Neutro são dois pinos chatos e Terra é o pino redondo.
 - h) Para que a máquina ligue normalmente é preciso verificar se os disjuntores de proteção do painel estão acionados (tecla preta para cima), destravar o botão de emergência e em seguida ligar o botão liga/desliga geral.
- ATERRAMENTO:** Para sua segurança e garantia desse equipamento, exigimos o seu devido aterramento de acordo com normas.

Regulagem e manutenção do Lubrifil



1 Drenar periodicamente os condensados do FILTRO acionando manualmente o dreno, de maneira que onivel NUNCAATINGA O FILTRO INTERNO.

2 Se aconselha a lavagem periódica do copo e os componentes plásticos do FILTRO com água (Max. 60 °C) e detergentes comuns. NÃO USAR ALCOOL. Para desmontá-lo deve-se cortar a pressão, girar o copo no sentido anti horário. O conjunto todo deverá sair. Lavar o elemento filtrante com queo sene e limpá-lo com ar comprimido dirigindo o jato de dentro para fora. A queo sene não pode ler contato com o copo do filtro.

3 Regular o gotejamento do óleo do LUBRIFICADOR com o botão de regulagem conforme sentido indicado no mesmo observando a frequência do gotejo através do corpo transparente. Com referência estima-se uma lubrificação correta de 25 a 40 gotas por hora.

4 O LUBRIFICADOR deve ser reabastecido com o equipamento sem pressão, apenas girar o copo de armazenamento. UTILIZAR SOMENTE ÓLEO RECOMENDADOS PNEUMÁTICO VISCOSIDADE 32. Encher um, copo até uns 10 mm (0,5") da parte visível do copo.

5 A regulagem da pressão consegue-se puxando a manopla para cima e girando a mesma no sentido horário para aumentar e no anti horário para diminuir a pressão do ar. Retomar a manopla para baixo após ajustar a pressão.

Observação: A pressão máxima de trabalho deste equipamento e da máquina não pode ser superior a 7bar.

Observação: O lubrificador sai totalmente fechado de fábrica devido ao tipo de graxa utilizada. O mesmo deve ser ajustado somente após o cilindro ser aberto em caso de manutenção.

Limpeza da Fôrma Térmica

- Passe somente uma fanelã umedecida em álcool;
- Não utilize objetos pontiagudos, que podem estragar a camada de Teflon da fôrma térmica.

Informações Técnicas de Aplicação

Tipo de Trabalho	Tempo (S)	Temperatura (°C)	Pressão (BAR/PSI)	Retirada do Papel	OBS.:
Transfer plastificad of PUFF	5 a 7	200	7 / 100	quente	---
Transfer plastificad of PUFF	8 a 12	200	6 / 90	quente	---
Transfer sublimático	25 a 30	200	6 / 90	Imediato	---
Transfer digital	8 a 12	190	6 / 90	03 segundos quente	---
Transfer litográfico	8 a 12	190	6 / 90	frio	---
Acabamento de estampa of PUFF	5	190	6 / 90	---	---
Acabamento de estampa of PUFF	10	200	6 / 90	---	---
Acabamento de estampa de Plástico de Papel	5	180	6 / 90	---	Necessário uso de Papel Siliconado
Entintada Termográfica	12	180	6 / 90	---	---
Bordado Termográfico	12	190	6 / 90	---	Umidade de Ar e Manutenção

OBS.:

- Em todos os casos recomenda-se fazer testes antes de colocar os transfers em produção, visto que as informações contidas no quadro acima são gerais. As informações precisas deverão ser obtidas junto aos fornecedores dos respectivos produtos, as quais deverão ser observadas com muito rigor.