



Adriana Mar Brazuna de Jesus

Licenciada em Ciências da Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Estudo do Comportamento Elétrico de Junções em Fitas Supercondutoras

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador:	Prof. Doutora Anabela Gonçalves Pronto	FCT-UNL
Coorientador:	Mestre Pedro Miguel Lucas Arsénio	UNINOVA-CTS

Júri:

Presidente: Professor José Manuel da Fonseca

Arguentes: Professor Mário Ventim Neves

Vogais: Professora Anabela Gonçalves Pronto

Estudo do Comportamento Elétrico de Junções em Fitas Supercondutoras

Copyright © Adriana Mar Brazuna de Jesus, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Aos meus Pais e Avós
À minha irmã
Ao Pedro

Agradecimentos

Quero agradecer à minha orientadora, Prof. Doutora Anabela Gonçalves Pronto, pela simpatia, disponibilidade e conhecimentos que me transmitiu, quer nas disciplinas lecionadas ao longo do curso quer na realização desta dissertação. Ao meu coorientador, Pedro Arsénio, pela partilha de conhecimentos ao longo deste último ano e pela ajuda disponibilizada.

Ao Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa, o meu sincero agradecimento aos docentes pela disponibilidade e conhecimentos partilhados ao longo de todo o curso. À D^a Helena, pela amizade e por toda a ajuda prestada nestes últimos tempos.

À Universidade da Extremadura e ao Instituto Politécnico de Setúbal, pela cedência de material e espaço para a realização dos ensaios laboratoriais, e em especial ao Prof. Vítor Pires e ao Prof. Daniel Foito, pela disponibilidade oferecida e partilha de conhecimento.

Aos meus colegas e amigos de laboratório pela simpatia, boa disposição e ajuda em diversas tarefas, em particular ao João Pombas pela amizade e pela partilha e discussão de ideias neste último ano. Aos meus colegas e amigos de curso bem como todos os colegas e amigos do NEEC, o meu grande obrigado pela amizade, pelo trabalho, pelos ensinamentos, pela confiança e por todos os momentos proporcionados em noites de estudo, dias de trabalho ou momentos de diversão ao longo destes cinco anos, sem vocês seria bem mais difícil.

À família BEST Almada, em particular ao João Costa, à Vera Branco, ao Ricardo Matos e à Andreia Neto, por tudo o que me ensinaram e partilharam ao longo de 3 maravilhosos anos. Obrigada por toda a partilha, por cada gargalhada ao vosso lado. Foi sem dúvida muito bom conhecer-vos.

Aos amigos de faculdade, que sem dúvida ficarão para a vida, Chambel, Neves e Januário. Obrigada por todo o apoio, toda a amizade e todos os momentos vividos. Adriana e Fábio, obrigada pela amizade e carinho e pelo ombro amigo sempre que necessário. Sem vocês este percurso não teria sido o mesmo.

Aos amigos de longa data, ao João, ao David, ao Hugo e à Joana obrigada por continuarem a ser os mesmos, mesmo com a distância a amizade continua intacta.

Avó Rosa e Avô Brazuna, obrigada por todo o amor. Obrigada por tudo o que me ensinaram em 23 anos, por todo o apoio e confiança que sempre depositaram em mim e por todo o esforço que

fizeram ao longo destes cinco anos, financiando os meus estudos e tornando tudo isto possível. Obrigada pela compreensão das minhas ausências.

À minha mana (como sempre lhe chamei) obrigada pelo carinho e pela amizade. Por tudo o que me transmitiste neste caminho de mana mais velha.

Aos meus pais um agradecimento especial por tudo. Pelos valores que sempre me transmitiram, pelo sentido de responsabilidade, pela liberdade que sempre me deram e por toda a confiança que sempre depositaram em mim para tomar as minhas decisões. Obrigada por todo o amor. Mãe, um especial agradecimento por seres a melhor amiga e a melhor mãe que uma filha pode ter. Obrigada por estares sempre ao meu lado nos momentos bons e nos momentos difíceis. Obrigada por tudo o que me ensinaste e por todo o esforço que fizeste, fazendo o possível e o impossível para o meu bem-estar. Vocês compreenderam as minhas ausências, ao longo destes 5 anos e na fase final deste trabalho. Muito Obrigada.

Ao Pedro, por me apoiar nos bons e nos maus momentos. Pela motivação e confiança que sempre depositou em mim e pela constante partilha. Obrigada por toda a amizade, pela compreensão e pelo carinho, nem sempre foi fácil, mas tu estiveste lá.

Por fim, agradeço à Direção Geral do Ensino Superior pela bolsa de estudo ao longo dos últimos dois anos.

Resumo

A junção de fitas de material supercondutor revestido, também conhecido como fitas de segunda geração (2G), é um tema importante para muitas aplicações de materiais supercondutores de alta temperatura (SAT) em energia, como, limitadores de corrente do tipo indutivo (SFCL), em cabos de transporte de energia ou em transformadores. Recentemente, foram obtidos avanços significativos no processo de fabrico destas fitas tendo-se conseguido realizar um quilometro ininterrupto de fita 2G. Apesar destas melhorias no comprimento obtido para as fitas, a junção de SC continua a ser necessária e essencial, por exemplo, para reparar uma seção danificada de condutor, para curto-circuitar um enrolamento ou para construir enrolamentos ou cabos de comprimentos superiores.

Os materiais de adição com baixo ponto de fusão têm especial interesse para junções supercondutoras devido à reduzida temperatura necessária para as realizar, o que diminui o risco de danificar a camada supercondutora. Para a conceção destas junções, além da otimização das propriedades elétricas, é importante estudar as propriedades térmicas do material de soldadura a temperaturas criogénicas. As propriedades elétricas do material de adição utilizado influenciam as propriedades supercondutoras, o tempo de vida das junções e, por conseguinte, o desempenho do dispositivo supercondutor. Neste trabalho, realizam-se vários tipos de junções utilizando dois materiais de soldadura diferentes, os quais são ensaiados à temperatura criogénica por forma a estudar as suas propriedades elétricas com o objetivo de minimizar a resistência elétrica da junção.

Dos testes realizados resultou a percepção de que o valor da resistência de junção depende de diversos fatores, sendo a que apresenta melhores resultados a junção *Lap* não supercondutora com inversão e fita de índio como material de adição.

Palavras-Chave: Fitas supercondutoras, Resistência de contacto, Junções supercondutoras e não supercondutoras, Materiais de adição.

Abstract

The joint of coated conductors, also known as second generation (2G) tapes, is an important subject for many power applications of high temperature superconductors (HTSs), e.g., inductive type superconducting fault current limiters (SFCL), in power transmission cables, or transformers. Recently, significant progresses had been carried out such as the achievement of the first uninterrupted kilometer long 2G tape. Although recent improvements in tapes length, joining coated conductors is still essential, for example, to repair a quenched section of conductor, to short-circuit a coil or to perform a longer lengths of cable.

Solders with low melting points have special interest for joining superconducting materials due to the reduced temperatures needed to perform the joints. For the design of these joints, besides electrical properties optimization, it is important to improve the thermal and thermo-mechanical properties of solders at cryogenic temperatures. Solders electrical properties influence the quench propagation and life time of joints, and, therefore, the performance of the superconducting device. In this work, several joints are made, using two different solder materials, and tested on cryogenic temperature to study their electrical properties in order to minimize the electrical resistance of the joint.

From the experimentals resulted the conclusion that the joint resistance value depends on several factors, and the best result was obtained to superconducting Lap joint without inversion and indium tape as solder material.

Key-Words: Superconducting tapes, Contact resistance, Superconducting and non-superconducting joints., Solder materials.

Índice de Matérias

1	Introdução	1
1.1	Motivação	1
1.2	Objetivos	2
1.3	Estrutura da Dissertação	2
2	Revisão Bibliográfica	5
2.1	Evolução Histórica	5
2.2	Propriedades da Supercondutividade.....	7
2.2.1	Limites da Supercondutividade	7
2.2.2	Efeito Meissner	8
2.2.3	Resistividade Nula	9
2.2.4	Classe de Supercondutores	9
2.3	Materiais Supercondutores de Alta Temperatura (SAT)	10
2.3.1	Tipos de Materiais SAT	10
2.3.2	Aplicações de Materiais SAT.....	12
2.4	Junção de Fitas SC: Características, Tipos e Processos de Junção.	12
2.4.1	Medição de Características da Junção em fitas SC.....	13
2.4.2	Tipos de Junção de Fitas Supercondutoras	14
2.4.3	Características da Junção	15
2.4.4	Processo de Junção	15
2.5	Estado de Arte	16
2.6	Síntese	19

3	Procedimento Experimental	21
3.1	Preparação das Junções de Fita 2G.....	22
3.1.1	Materiais de Adição	22
3.1.2	Remoção da Camada de Cobre por Decapagem	23
3.1.3	Suporte Mecânico de fitas para Análise das Propriedades Elétricas.....	25
3.2	Dimensionamento das Junções em Fitas SC.....	27
3.2.1	Soldadura das fitas	28
3.3	Síntese	29
4	Análise Experimental do Comportamento Elétrico de Junções em Fitas SC	31
4.1	Montagem Experimental	31
4.2	Características R(I) obtidas para as Junções em Fitas SC.....	33
4.3	Análise e Discussão dos Resultados Obtidos Experimentalmente.....	34
4.4	Síntese	41
5	Simulação do Comportamento Elétrico e Térmico de Junções em Fita SC	43
5.1	Caracterização da Amostra no Flux2D.....	43
5.2	Circuito Elétrico no Flux2D	44
5.3	Cosimulação (Flux2D & Matlab).....	45
5.4	Comparação de Resultados de Simulação e Experimentais	48
5.5	Síntese	49
6	Conclusões e Trabalho Futuro	51
6.1	Conclusões	51
6.2	Trabalho Futuro	52
	Bibliografia	53
	Anexos	55
Anexo I.	Geometria do Suporte de Junção de Fitas	55
Anexo II.	Configuração Flux2D	57
Anexo III.	Equações de Fitting	61
Anexo IV.	Ambiente Matlab.....	63

Índice de Figuras

Figura 2.1 - Supercondutividade do mercúrio	6
Figura 2.2 – Evolução da temperatura crítica de materiais supercondutores. Adaptado de (Seidel 2015).	7
Figura 2.3 - Limites da supercondutividade	7
Figura 2.4 - Comparação entre a) supercondutor e b) condutor perfeito.	8
Figura 2.5 - Curva da magnetização em função do campo aplicado.....	10
Figura 2.6 - Bloco maciço de YBCO	11
Figura 2.7 - Exemplo de fitas SAT	12
Figura 2.8 - Esquema para medição da tensão na junção	13
Figura 2.9 - Tipo de Aplicação das junções supercondutoras.	14
Figura 2.10 - Diagrama de árvore do processo de junção de fitas supercondutoras.	16
Figura 2.11 - Descrição das superfícies da fita supercondutora 2G	17
Figura 3.1 - Fluxograma do trabalho laboratorial a realizar.	21
Figura 3.2 - Material utilizado durante o processo de decapagem.	24
Figura 3.3 - Método dos quatro pontos adaptado a uma junção lap.	25
Figura 3.4 - Suporte para a realização dos ensaios.	26
Figura 3.5 - Dimensões dos suportes criados para as fitas.	26
Figura 3.6 – Junções a realizar no desenvolvimento laboratorial.	28
Figura 3.7 - Suporte para soldadura de junções lineares.	28
Figura 3.8 - Junções a realizar.	30
Figura 4.1 – Esquemático da montagem utilizada para medição de tensão na junção.	31
Figura 4.2 - Montagem utilizada para medição de tensão na junção, a) fonte de corrente DC, b) amostra, c) micro voltímetro.	32
Figura 4.3 - Característica elétrica das junções ensaiadas a 77 K.	33
Figura 4.4 - Característica elétrica utilizando fita de índio nas diferentes junções.	34
Figura 4.5 - Esquema elétrico equivalente da junção a) Lap e b) Bridge.	35
Figura 4.6 - Característica elétrica utilizando pasta de estanho e prata nas diferentes junções.	37

Figura 4.7 – Comparação entre a característica elétrica de diferentes materiais para uma junção do tipo Lap Não Supercondutora com Inversão.....	38
Figura 4.8 - Comparação entre a característica elétrica de diferentes materiais para uma junção do tipo Lap Não Supercondutora sem Inversão.....	39
Figura 4.9 - Comparação entre a característica elétrica de diferentes materiais para uma junção do tipo Bridge Não Supercondutora.....	39
Figura 4.10 - Característica elétrica para uma junção do tipo Bridge Supercondutora.....	40
Figura 4.11 – Fitas Danificadas durante os Ensaios.....	41
Figura 5.1 - Diagrama para Configuração de uma fita supercondutora no software Flux2D.....	44
Figura 5.2 - Esquema elétrico correspondente à junção de duas fitas supercondutoras.....	45
Figura 5.3 - Fluxograma explicativo da cosimulação.....	46
Figura 5.4 – Caraterística elétrica das camadas constituintes da fita supercondutora 2G e do material de adição In.....	47
Figura 5.5 – Simulação do Comportamento Térmico da Junção Lap Não Supercondutora com Inversão com soldadura de In.....	47
Figura 5.6 - Característica Elétrica da Junção Lap Não Supercondutora com Inversão, com material de adição In.....	48

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 - Temperaturas críticas dos materiais SAT de maior aplicação	11
Tabela 2.2 – Características das fitas supercondutoras utilizadas	19
Tabela 2.3 - Resultados Obtidos na Literatura.....	20
Tabela 3.1 - Características da fita SuperPower SCS4050 (Super Power 2011).....	22
Tabela 3.2 - Materiais de adição utilizados para soldadura.....	23
Tabela 3.3 - Tempo de cada etapa do processo de decapagem.	24
Tabela 3.4 - Descrição das amostras decapadas.....	25
Tabela 3.5 – Dimensões utilizadas nas junções.....	26
Tabela 3.6 - Características para junção Lap	27
Tabela 3.7 - Características para junção Bridge.....	27
Tabela 3.8 - Junções efetuadas.....	29
Tabela 4.1 - Valor de corrente definido para comparação de valores.....	33
Tabela 4.2 – Resistência correspondente ao material de cada camada da fita supercondutora a 77K, para a junção Lap.....	36
Tabela 4.3 - Resistência correspondente ao material de cada camada da fita supercondutora a 77K, para a junção Bridge	37
Tabela 4.4 - Síntese dos valores obtidos experimentalmente.....	41

Simbologia

Símbolo	Descrição	Unidades
B	Densidade de fluxo magnético	$\text{Wb} \cdot \text{m}^{-1}$
E	Campo Elétrico	$\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$
E_c	Valor de campo elétrico para definição da corrente crítica	$\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$
e	Carga do elétron ($1.60217646 \times 10^{-19}$)	C
H	Campo magnético	$\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$
H_c	Campo magnético crítico	$\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$
H_{c1}	Campo magnético crítico inferior	$\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$
H_{c2}	Campo magnético crítico superior	$\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$
I	Corrente elétrica	A
I_c	Corrente elétrica crítica	A
J	Densidade de corrente elétrica	$\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$
J_c	Densidade de corrente elétrica crítica	$\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$
M	Magnetização do material	$\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$
m_e	Massa do elétron ($9.10938188 \times 10^{-31}$)	Kg
T	Temperatura	K
T_c	Temperatura crítica	K
σ	Condutividade elétrica	$\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$
ρ	Resistividade	$\Omega \cdot \text{m}$
μ_0	Permeabilidade magnética no vázio ($4\pi \times 10^{-7}$)	$\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$

Siglas

Sigla	Descrição
1G	Primeira Geração
2G	Segunda Geração
AC	Corrente Alternada
Ag	Prata
Cu	Cobre
DC	Corrente Contínua
IEC	<i>International Electrothechnical Commission</i>
In	Índio
Pb	Chumbo
SAT	Supercondutor de Alta Temperatura
SC	SuperCondutor
SFCL	<i>Superconducting Fault Current Limiters</i>
SMES	<i>Superconductin Magnetic Energy Storage</i>
Sn	Estanho
YBCO	Yttrium Barium Copper Oxide

CAPÍTULO
1**Introdução**

Neste capítulo é apresentada a motivação para a realização deste trabalho, os objetivos a atingir e as atividades a realizar na dissertação.

1.1 Motivação

O constante desenvolvimento e procura de novas técnicas e metodologias que melhorem a performance de diferentes dispositivos de potência têm incentivado o estudo e desenvolvimento de alternativas aos dispositivos clássicos. Entre alguns desses dispositivos encontram-se os limitadores de corrente supercondutores que utilizam fitas supercondutoras curto-circuitadas nas suas partes constituintes.

A descoberta da supercondutividade, em 1911, e dos materiais supercondutores de alta temperatura (SAT), em 1986, permitiu o desenvolvimento de diversas aplicações de potência que visam melhorar alguns aspetos na rede elétrica, tais como a eficiência energética, diminuição de perdas no transporte de energia e diminuição da ocorrência de curto-circuitos na rede.

Um dos aspetos que interessa melhorar nestes dispositivos, que não é exclusivo dos mesmos, é a qualidade da junção das fitas SC utilizada para a construção de bobinas, uma vez com o aumento do comprimento a densidade de corrente crítica e a homogeneidade da fita tende a degradar-se. Essa qualidade é otimizada tendo em consideração dois aspetos, a resistência elétrica da junção, que deverá ser tão baixa quanto possível, e a robustez mecânica da mesma.

Por outro lado, a necessidade de reparar uma seção danificada de uma parte da rede, curto-circuitar um enrolamento ou realizar uma ligação adicional são alguns dos problemas no que diz respeito à utilização de materiais supercondutores, pois o uso de materiais de adição, para a junção, pode aumentar significativamente a resistência elétrica que os supercondutores apresentam.

Uma das soluções estudada e que visa solucionar os problemas descritos anteriormente, é a realização de junções entre fitas supercondutoras com o intuito de conseguir manter a homogeneidade e a baixa resistividade da fita, independentemente do seu comprimento.

Assim, pretende-se com este trabalho contribuir para o estudo de otimização de junções em fitas supercondutoras.

1.2 Objetivos

A dissertação apresentada tem como principais objetivos o estudo, produção e caracterização de junções baseadas em fitas supercondutoras de 2ª geração, YBCO ($Y_1Ba_2Cu_3O_7$), bem como a análise das propriedades elétricas realizadas. Sumariamente pretende-se:

- Pesquisar e estudar os vários métodos utilizados para a junção de fitas supercondutoras;
- Escolher o/os método(s) de junção que serão realizados à escala laboratorial;
- Elaborar os processos de junção e respetivos ensaios relativos ao comportamento elétrico das junções;
- Analisar e discutir os resultados obtidos.

Pretende-se assim, estudar o comportamento das propriedades elétricas das junções por forma a obter um processo de junção de fitas otimizado, que permita melhorar a eficácia necessária, para utilização em aplicações futuras, no que diz respeito à baixa resistividade desejada.

Com esse intuito colocaram-se duas questões que são importantes responder:

- Q1 - Para um dado material de soldadura, qual a influência do tipo de junção na resistência e limite de corrente crítica da fita;
- Q2 - Para uma dada junção, qual a influência do material de soldadura utilizado, para a resistência e corrente crítica da fita.

1.3 Estrutura da Dissertação

A dissertação apresentada encontra-se subdividida em 6 capítulos.

No capítulo inicial faz-se a introdução ao trabalho a desenvolver, a motivação para a realização do mesmo bem como os objetivos e metas a atingir ao longo da pesquisa.

No capítulo 2, Revisão Bibliográfica, apresenta-se uma breve introdução sobre a historia da supercondutividade e procede-se ao levantamento bibliográfico relativo ao tema abordado. Neste descrevem-se os elementos necessários ao desenvolvimento do trabalho, nomeadamente, conceitos e teorias a ter em conta, tipos de materiais supercondutores e processos de junção em fitas supercondutoras.

No capítulo 3, Procedimento Experimental, procede-se à descrição dos processos necessários para a preparação das amostras a ensaiar, nomeadamente, a preparação das fitas supercondutoras, o processo de junção das mesmas e a construção do suporte para a realização dos ensaios.

No capítulo 4, Análise Experimental do Comportamento Elétrico de Junções em Fitas SC, apresenta-se a montagem experimental utilizada nos ensaios e analisam-se as características $R(I)$ obtidas para cada uma das junções.

Relativamente ao capítulo 5, Simulação do Comportamento Elétrico e Térmico de Junções em Fita SC., procede-se a explicação do dimensionamento e parametrização de uma amostra, escolhida com base nos resultados obtidos experimentalmente, no programa de simulação de elementos finitos Flux2D. Por fim, comparam-se os resultados obtidos entre o ensaio experimental e a simulação.

Finalmente, no capítulo 6, Conclusões e Trabalho Futuro, apresentam-se as conclusões retiradas com a realização desta dissertação bem como o trabalho que importa desenvolver para a continuação da investigação do tema abordado.

CAPÍTULO
2**Revisão Bibliográfica**

No presente capítulo descrevem-se os acontecimentos históricos mais importantes na área da supercondutividade e que contribuíram para a investigação e evolução do conhecimento sobre os materiais supercondutores, apresentam-se também algumas propriedades e conceitos importantes para a compreensão do tema, assim como o estado de arte em relação ao estudo de junções entre fitas supercondutoras.

2.1 Evolução Histórica

Em 1908, *Kamerlingh-Onnes* descobriu que, à pressão atmosférica, o ponto de ebulição do hélio era de 4.2 K aumentando a gama de temperatura para um intervalo perto de zero. Esta descoberta permitiu a Onnes desenvolver experiências a baixas temperaturas e abrir caminho para a descoberta da supercondutividade.

Em 1911, no seu laboratório em Leiden, Holanda, ao investigar algumas das possibilidades apresentadas para explicar o comportamento do hélio líquido relativamente às suas propriedades elétricas, *Kamerlingh-Onnes* descobriu o que chamou de supercondutividade.

Enquanto estudava as propriedades do mercúrio *Onnes* percebeu que quando a peça constituída por mercúrio era arrefecida a baixas temperaturas, 4.2 K mais concretamente, a sua resistência elétrica decrescia abruptamente para valores muito pequenos, na ordem dos $10^{-5}\Omega$, como se observa na Figura 2.1, contestando as teorias existente até à época relativamente ao assunto. Transcrevendo *Onnes* “mercury at 4.2 K has entered a new state, which, owing to its particular electrical properties, can be called the state of superconductivity” (*Kamerlingh Onnes* 1913), o que lhe deu acesso ao prémio Nobel da Física em 1913.

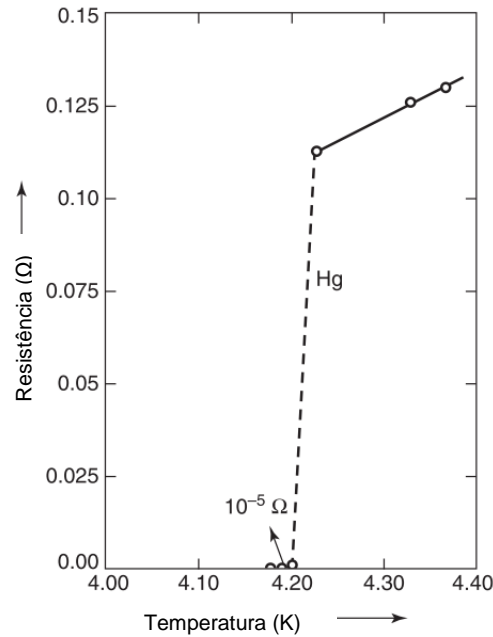


Figura 2.1 - Supercondutividade do mercúrio , curva original resistência vs. temperatura medida por Onnes. Adaptado de (Seidel 2015).

Após a descoberta da supercondutividade, foram vários os cientistas que começaram a investigar e estudar os materiais supercondutores, por forma a perceber o seu comportamento, uma vez que a quase nula resistência elétrica, abaixo da chamada temperatura crítica do material, não era a sua única propriedade invulgar. No ano de 1933 os investigadores Meissner e Ochsenfeld descobriram que, abaixo da temperatura crítica, o supercondutor, sob certas condições, repelia o campo de indução magnético, observando-se um comportamento diamagnético perfeito, que ficaria conhecido como efeito de Meissner. Durante muitos anos, a supercondutividade baseou-se em fenómenos de baixa temperatura, o que viria a mudar, em 1986, quando Bednorz e Müller descobriram a supercondutividade de alta temperatura em materiais baseados em óxido de cobre, mais precisamente *barium-lanthanum-copper-oxide* (BLCO)(Müller, K. A. ; Bednorz 1986). Desta forma, a investigação e desenvolvimento de supercondutores ditos de alta temperatura, bem como as suas aplicações, tornou-se um intensivo caso de estudo (Shiohara et al. 2013), tendo evoluído ao longo dos anos com a descoberta de novos materiais com propriedades supercondutoras e das suas temperaturas de funcionamento, como ilustra a Figura 2.2.

Atualmente, os supercondutores de alta temperatura, com temperatura de funcionamento entre os 70K e os 140K, são os mais utilizados em aplicações de energia, uma vez que apresentam menor custo de arrefecimento.

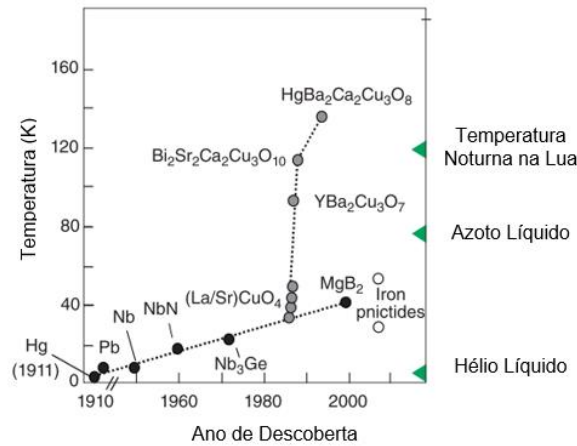


Figura 2.2 – Evolução da temperatura crítica de materiais supercondutores. Adaptado de (Seidel 2015).

2.2 Propriedades da Supercondutividade

Um material supercondutor caracteriza-se por exibir resistividade nula (propriedade elétrica) e diamagnetismo perfeito¹ (propriedade magnética).

Uma vez que a supercondutividade é um estado de matéria, estas propriedades só se observam dentro dos limites da mesma. A transição entre a fase normal e a fase supercondutora determina o tipo de supercondutor, podendo este ser do tipo I ou do tipo II.

2.2.1 Limites da Supercondutividade

De forma a manter as propriedades supercondutoras, os materiais têm que estar dentro de determinados limites físicos, ao qual se chama espaço de fases. Esse espaço é constituído por três grandezas físicas, densidade de corrente, J , campo magnético, H e temperatura de funcionamento, T , (os quais não são independentes entre si), e caracterizado pelos limites críticos dessas grandezas, como ilustra a Figura 2.3.

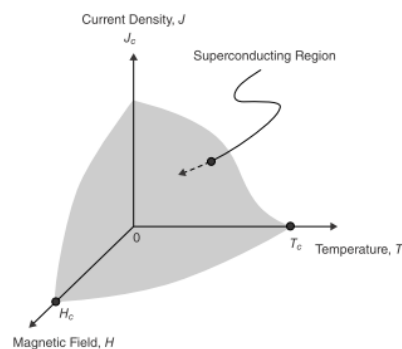


Figura 2.3 - Limites da supercondutividade, retirado de (Kalsi 2011)

Acima de determinados valores chamados críticos, qualquer uma dessas grandezas consegue fornecer energia suficiente para destruir o estado de supercondutividade do material. Assim, se

¹ Adiante ver-se-á a explicação para o diamagnetismo perfeito de um material devido ao efeito de Meissner.

uma das condições indicadas em (2.1 não se verificar, o material transita para o seu estado norma. Na equação, J_c , T_c e H_c são os valores críticos de J , T e H , respetivamente, isto é, valores acima dos quais os materiais perdem as propriedades supercondutoras.

$$\begin{cases} J \leq J_c \\ H \leq H_c \\ T \leq T_c \end{cases} \quad (2.1)$$

2.2.2 Efeito Meissner

O efeito Meissner, também conhecido como diamagnetismo perfeito, é uma das propriedades mais importantes dos supercondutores. Este baseia-se na expulsão das linhas de fluxo magnético do interior do supercondutor, quando a temperatura a que se encontra é inferior a T_c , ou seja, quando o material se encontra no estado supercondutor.

A densidade de fluxo, B , de um material está relacionada com o campo magnético aplicado, H , com a magnetização do material, M , e com a permeabilidade magnética no vazio, μ_0 , através da expressão:

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) \quad (2.2)$$

No caso de um material no estado supercondutor, ou seja, com o comportamento de um diamagneto perfeito, a magnetização é inversa ao campo magnético aplicado, $\vec{M} = -\vec{H}$ logo, pela expressão ((2.2), $B=0$, isto é, não existe densidade de fluxo magnético no interior de um supercondutor (Sheahen 2002).

Observando a Figura 2.4, verifica-se que um supercondutor não apresenta o mesmo comportamento que um condutor perfeito. Isto acontece porque $dB/dt=0$, ou seja, num condutor perfeito o fluxo é constante ao longo do tempo logo poderá existir fluxo no interior do material.

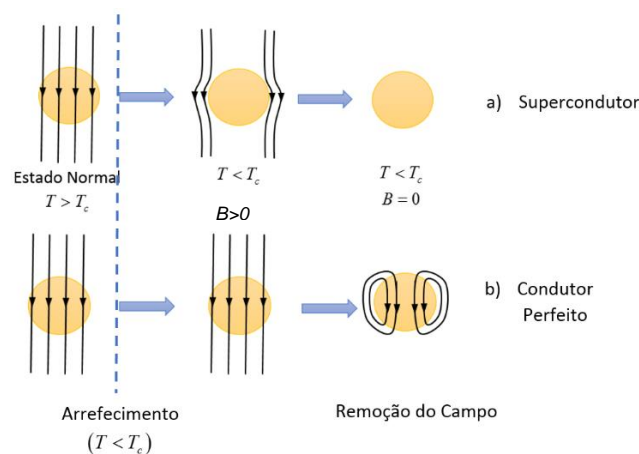


Figura 2.4 - Comparação entre a) supercondutor e b) condutor perfeito.

2.2.3 Resistividade Nula

Quando um material se encontra no estado supercondutor, isto é, quando se verificam os limites críticos $T < T_c$, $J < J_c$ e $H < H_c$, este apresenta resistividade nula e conseqüentemente inexistência de dissipação de energia, logo não ocorrem perdas no material. De notar que, a resistividade nula, apenas ocorre em regime contínuo, isto é, quando se trata de uma corrente apenas com componente DC (Melhem 2011). No caso de corrente com componente AC, o material apresenta resistividade equivalente diferente de zero.

Segundo a teoria dos pares de Cooper, abaixo da temperatura crítica, mais concretamente no estado misto, a condução de corrente é feita através de dois tipos de elétrons, os elétrons supercondutores, responsáveis pela condução com resistividade nula, e os elétrons normais que apresentam um comportamento idêntico ao dos materiais condutores no estado normal.

Enquanto que no caso de uma corrente DC, o campo elétrico, E , não existe no material, logo pela lei de Ohm local, (2.3, onde σ é a condutividade do material, a densidade de corrente, J , é nula, não existindo condução por parte dos portadores de carga normais.

$$J = \sigma E \quad (2.3)$$

$$F = -eE = m_e \frac{dv}{dt} = 0 \quad (2.4)$$

Desta forma, a força electrostática F , introduzida na equação (2.4, em que e é a carga do elétron e m_e a sua massa, é nula e, por isso, apenas os elétrons supercondutores realizam a condução e, conseqüentemente, a resistividade do material é nula.

Contrariamente, no caso de uma corrente AC, o material apresenta campo elétrico, devido à presença dos vórtices de corrente que, com a variação no espaço e no tempo, criam forças electrostáticas capazes de deslocar os elétrons normais e colocá-los em condução, contribuindo assim para a existência de resistividade no material. Ainda assim, a resistência existente continua a ser reduzida, quando comparada à de um condutor metálico convencional, uma vez que parte da condução é feita por elétrons supercondutores.

2.2.4 Classe de Supercondutores

Os materiais supercondutores classificam-se em duas classes diferentes, nomeadamente, supercondutores do tipo I e do tipo II, devido ao seu comportamento na presença de um campo magnético externo. A distinção entre os materiais, também conhecidos como supercondutores macios e duros, deve-se ao diferente comportamento na presença de um campo magnético.

2.2.4.1 Supercondutores Tipo I

Os supercondutores macios ou do tipo I repelem o campo magnético até um valor máximo, H_c , o campo magnético crítico. Nessa fase o material apresenta de forma quase perfeita o efeito de Meissner.

Para campos magnéticos externos maiores que H_c o material deixa, de forma abrupta, penetrar o campo magnético no seu interior passando ao estado normal de condução como se verifica na Figura 2.5 a). O campo magnético crítico depende da temperatura de funcionamento do material e é nulo quando o material atinge a temperatura crítica, T_c (Seidel 2015).

2.2.4.2 Supercondutores Tipo II

Relativamente aos supercondutores do tipo II, ditos supercondutores duros, apresentam uma transição entre estados bastante diferente dos supercondutores macios. Estes apresentam um diamagnetismo perfeito, repelindo as linhas de fluxo magnético do interior, para campos magnéticos mais pequenos que o valor crítico, H_{c1} . Nesse ponto, H_{c1} , existe uma transição entre o estado Meissner e o estado misto.

No estado misto, ou estado Shubnikov, ocorre a penetração de linhas de fluxo no material permitindo a coexistência do estado supercondutor e do estado normal, como se observa na Figura 2.5 b). A transição para o estado normal do material ocorre quando o campo externo aplicado é superior ao valor crítico superior, H_{c2} , em que o material perde todas as características supercondutoras (Seidel 2015).

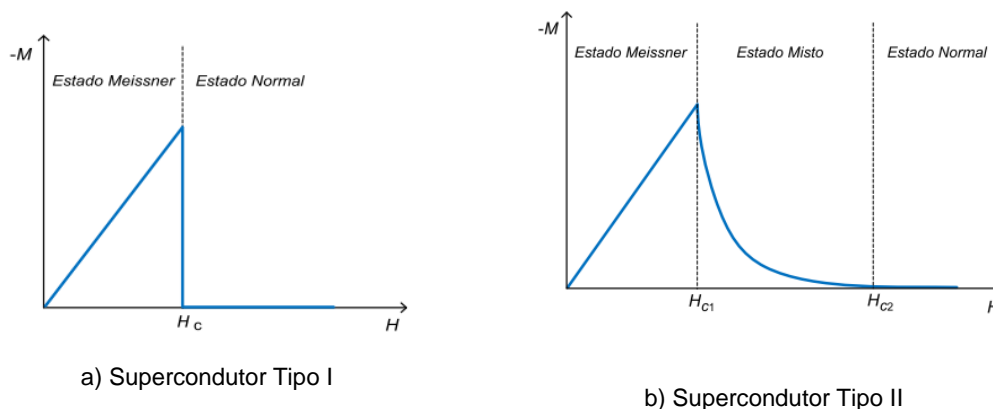


Figura 2.5 - Curva da magnetização em função do campo aplicado, a) de um supercondutor do tipo I e b) de um supercondutor do tipo II, (Arsénio 2012)

2.3 Materiais Supercondutores de Alta Temperatura (SAT)

2.3.1 Tipos de Materiais SAT

Os materiais supercondutores de alta temperatura, SAT, são atualmente comercializados em dois tipos diferentes, blocos maciços e fitas de material supercondutor, sendo utilizados em diversas aplicações. São normalmente frágeis e quebradiços devido ao facto de serem materiais cerâmicos constituídos à base de óxido de cobre. Mantêm o estado

supercondutor a temperaturas relativamente elevadas, sendo o YBCO e o BSCCO os mais produzidos. Na Tabela 2.1 estão indicadas as temperaturas críticas destes materiais.

Com a descoberta dos supercondutores de alta temperatura foi possível diminuir o custo dos materiais utilizados na refrigeração, uma das razões pela qual a supercondutividade é um processo dispendioso. O oxigénio que toma o estado líquido a 90 K, ou o azoto a 77 K apresentam um preço de liquefação mais económico que o hélio (Sheahen 2002), conseguindo-se desta forma criar um novo conjunto de aplicações exequíveis, baseadas nos materiais SAT.

Tabela 2.1 - Temperaturas críticas dos materiais SAT de maior aplicação , adaptado de (Sheahen 2002)

Nome	Fórmula	Temperatura Crítica (K)
YBCO	$Y_1Ba_2Cu_3O_7$	92
BSCCO	$Bi_2Sr_2Ca_nCu_{n+1}O_{6+2n}$	105
TBCCO	$TlBa_2Ca_2Cu_3O_y$	115
HBCCO	$HgBa_2Ca_2Cu_3O_y$	135 ²

2.3.1.1 Blocos Maciços

Os SAT em blocos maciços, ilustrado na Figura 2.6, podem ter uma estrutura mono ou policristalina, sendo que a estrutura policristalina apresenta uma redução de corrente elétrica entre os limites de grão. Dessa forma a densidade de corrente é mais elevada nos blocos monocristalinos, no entanto estes podem apresentar propriedades anisotrópicas.



Figura 2.6 - Bloco maciço de YBCO , para levitação magnética, comercializado pela CAN³.

2.3.1.2 Fitas Supercondutoras

Outra forma de produzir SAT é sob a forma de fitas supercondutoras, que se dividem em fitas de primeira, 1G, e segunda geração, 2G, ilustrado na Figura 2.7.

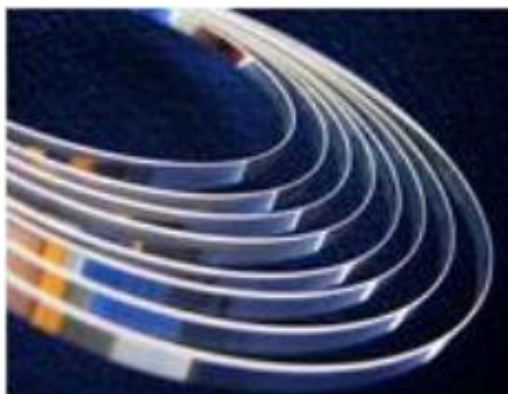
As fitas de primeira geração, 1G, são constituídas por filamentos de material supercondutor BSCCO imersos numa matriz de prata que torna a fita mais flexível existindo, no entanto, um raio de flexão mínimo que permite a manutenção das propriedades supercondutoras da fita. As suas temperaturas críticas variam entre os 90K e 110K.

As fitas de segunda geração, 2G, também denominadas por condutores revestidos a YBCO, são formadas por camadas de filmes finos de diferentes materiais. Estas apresentam

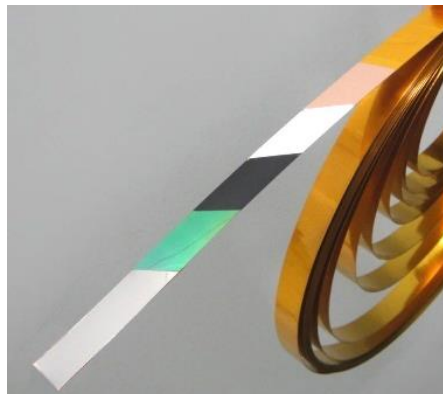
² A elevadas pressões foram verificadas temperaturas críticas $T_c > 150K$.

³ Informação recolhida em <http://www.can-superconductors.com/levitation-bulk>, acedido a 9 de Fevereiro de 2016.

temperaturas, densidades de corrente e campos magnéticos críticos superiores aos verificados nas fitas 1G. Devido aos materiais constituintes das fitas 2G e aos seus processos de fabrico, comercialmente, estas tornam-se mais caras que as fitas 1G (Plakida 2010; Arsénio 2012), mas também melhores para aplicações de potência.



a) Fita 1G comercializada pela Innost⁴



b) Fita 2G comercializada por Fujikura⁵

Figura 2.7 - Exemplo de fitas SAT a) 1G e b) 2G.

2.3.2 Aplicações de Materiais SAT

Existem inúmeras aplicações no domínio da energia para as quais os materiais SAT poderão ter um enorme potencial tais como cabos elétricos, transformadores de potência, limitadores de corrente, sistemas de armazenamento de energia (SMES), levitação eletromagnética em transportes (Maglev), entre outros.

2.4 Junção de Fitas SC: Características, Tipos e Processos de Junção.

O processo de junção⁶ entre fitas supercondutoras revestidas é, atualmente, um assunto de grande interesse para a maioria das aplicações com materiais SAT uma vez que, com o aumento do comprimento de fita revestida, a densidade de corrente e a homogeneidade da fita tendem a degradar-se.

O estudo de técnicas de junção entre fitas procura uma solução para manter as propriedades da fita, elétricas e mecânicas, conseguindo obter os comprimentos necessários. No entanto, este processo está ainda em estudo e desenvolvimento, sendo um dos maiores problemas a resistência criada na junção de duas fitas devido aos materiais de soldadura utilizados (Chang et al. 2008).

A junção entre duas fitas é um processo que define a performance final da aplicação devido à possível degradação da densidade de corrente, J_c , que afeta as propriedades elétricas do material (Baldan et al. 2009).

⁴ Informação retirada de www.innost.com/index.php?m=index&a=actionClass&actype=channel&fid=35, acessido a 22 de Janeiro de 2016.
⁵ Informação recolhida em www.fujikura.co.uk/products/energy-and-environment/2g-ybco-high-temperature-superconductors, acessido a 22 de Janeiro de 2016.

⁶ Definido como a junção entre duas ou mais extremidades de um condutor, <http://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=442-06-27>.

2.4.1 Medição de Características da Junção em fitas SC

Durante o funcionamento em dispositivos supercondutores, os condutores revestidos podem ter que suportar forças eletrodinâmicas de grande intensidade, resultantes da interação entre corrente e campos magnéticos existentes. Dessa forma, pretende-se, para uma boa junção, uma baixa resistência elétrica e uma elevada resistência mecânica (Konstantopoulou et al. 2015). A Resistência Elétrica depende dos materiais de soldadura utilizados, do método aplicado para a soldadura, sendo que diferentes métodos apresentam diferentes valores de resistência na junção das fitas, e do comprimento da junção realizada. A Resistência Mecânica influencia a degradação dos limites da supercondutividade tendo em conta a tensão mecânica aplicada na área de junção. Depende, normalmente, do método de junção aplicado às fitas, bem como das propriedades mecânicas de cada fita.

Para a análise dessas propriedades na investigação efetuada, são utilizados conceitos teóricos que ajudam à avaliação dos dados obtidos nos processos laboratoriais de junção de fitas, sendo estes descritos seguidamente.

Curva Característica $R(I)$

Por forma a realizar a análise das propriedades elétricas das junções é, normalmente, utilizado na prática o método dos quatro pontos, Figura 2.8, definido na norma IEC 61788-3. Este método, permite a medição da queda de tensão entre dois pontos da fita aplicando uma corrente conhecida, com componente DC, aos terminais da amostra. Por forma a seguir a norma estipulado, (IEC 2006), devem definir-se os seguintes requisitos:

$$\begin{cases} L_1 = 2 \times L_2 + L + 2 \times L_3 \geq 5 \times W \\ L, L_2, L_3 \geq W \end{cases} \quad (2.5)$$

onde L_1 representa o comprimento total da amostra, L a distância entre os pontos de medição da queda de tensão, L_2 o comprimento da área de soldadura do contacto de corrente, L_3 a distância mínima entre o contacto de corrente e o ponto de medição da tensão e W a largura da amostra.

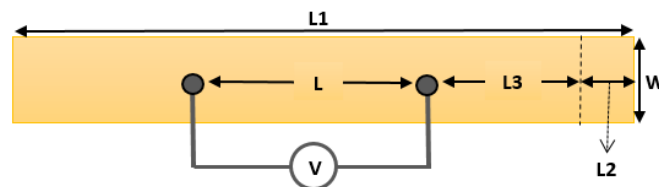


Figura 2.8 - Esquema para medição da tensão na junção, adaptado de (Arsénio 2012; IEC 2006)

Com os valores de tensão e corrente determinados é possível traçar a curva $U(I)$ representativa da amostra. Com os dados de tensão-corrente, é possível traçar a curva característica $R(I)$ do comportamento elétrico da amostra testada, através da lei de Ohm:

$$U = R \cdot I \quad [\Omega] \quad (2.6)$$

Resistência Elétrica de um Condutor

Para um condutor homogêneo de comprimento l e secção constante S , sabendo que:

$$\begin{cases} J = \sigma E \\ J = \frac{I}{S} \end{cases} \text{ sendo } E = \frac{U}{l} \quad (2.7)$$

Com J a densidade de corrente elétrica, σ a condutividade do material, E o campo elétrico e U a tensão e corrente, respetivamente. Juntamente, pela lei de Ohm, equação (2.6, em regime DC, obtém-se a resistência elétrica do condutor, com ρ a resistividade do material:

$$\begin{aligned} \frac{I}{S} = \sigma \cdot E &\Leftrightarrow \frac{I}{S} = \sigma \cdot \frac{U}{l} \Leftrightarrow \frac{U}{I} = \frac{l}{S} \cdot \frac{1}{\sigma} \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow R = \rho \frac{l}{S} \end{aligned} \quad (2.8)$$

2.4.2 Tipos de Junção de Fitas Supercondutoras

Atualmente o estudo das técnicas a aplicar na junção de fitas supercondutoras representa uma parte importante na área da supercondutividade pois, nos últimos anos, deu-se um elevado crescimento na investigação e desenvolvimento de dispositivos de potência usando supercondutores tais como limitadores de corrente (SFCL) ou cabos de energia (Chang et al. 2008).

Na literatura são diversos os processos utilizados para a realização das junções, sendo que o processo deve ser dividido em três partes essenciais, descritas de seguida e apresentadas na Figura 2.10.

Consoante a aplicação da fita supercondutora, podem-se realizar dois tipos de junção:

- **Lap**, a junção é realizada sobrepondo as extremidades de duas fitas supercondutoras, como se representa na Figura 2.9 a). Este tipo de junções aplica-se, normalmente, a condutores lineares promovendo a passagem de corrente, isto é, sem raio de curvatura.
- **Bridge**, a junção é feita com um segmento de fita adicional que une as extremidades das duas fitas 2G, principais, Figura 2.9 b). Este tipo de junção é utilizado, normalmente, para casos em que é necessário curto-circuitar o condutor, em forma de anel, permitindo a passagem de corrente, ex. bobinas curto-circuitadas.

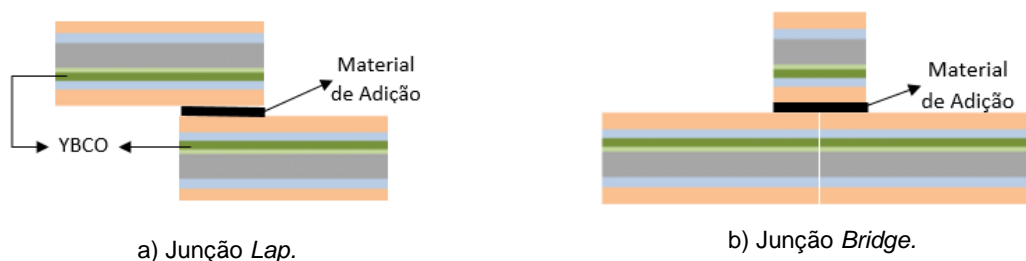


Figura 2.9 - Tipo de Aplicação das junções supercondutoras.

2.4.3 Características da Junção

A junção de duas fitas poderá ser feita utilizando fitas com ou sem revestimento, sem tratamentos adicionais, ou fitas cuja camada estabilizadora é retirada através de processos de remoção (Chang et al. 2008). Portanto, poder-se-á ter:

- Junção Supercondutora consiste na junção entre a camada de material supercondutor da fita, ou seja, uma junção cuja fita não possui uma camada estabilizadora de cobre, C_u , ou cuja camada é removida através de tratamentos químicos como decapagem ou remoção por calor;
- Junção Não Supercondutora consiste na junção entre fitas sem qualquer tratamento inicial. A junção é feita utilizando a fita tal como foi fabricada e normalmente fazendo a sobreposição entre a camada estabilizadora da fita a utilizar.

2.4.4 Processo de Junção

A junção pode ser realizada utilizando materiais de adição entre as superfícies a juntar, variando as temperaturas a que o processo é realizado ou deixando que as camadas superficiais da fita se difundam entre si.

O processo de brasagem forte e soldadura utiliza materiais de adição que criam a ligação entre as duas superfícies de junção, sem fundir os metais constituintes da fita supercondutora (Zhou 2008). No segundo tipo de junção, por difusão, não são utilizados quaisquer materiais de adição uma vez que as superfícies são difundidas por fusão e/ou pressão sobre as camadas em contacto (Arsénio 2015). Neste segundo tipo, a resistividade da junção será muito menor que utilizando o processo de brasagem forte ou soldadura, uma vez que não são utilizados materiais de adição, não existindo resistência adicional resultante da solda (J. Y. Kato et al. 2006). Dessa forma poderá representar uma vantagem na decisão do tipo de junção a utilizar, no entanto este tende a ser um processo mais complicado pois as temperaturas necessárias para atingir o ponto de fusão, de forma a que os materiais se difundam entre si, podem degradar as propriedades supercondutoras da fita, sendo necessário coloca-las em atmosferas ricas em gases específicos por forma a recuperarem as propriedades do supercondutor.

- A brasagem forte e a soldadura diferem apenas na temperatura do ponto de fusão, sendo que a brasagem ocorre a temperaturas superiores a 450 °C e a soldadura a temperaturas inferiores a 450 °C, respetivamente.

É importante referir que o processo de brasagem forte não tem aplicabilidade na área da supercondutividade uma vez que as soldas utilizadas para a junção de fitas supercondutoras têm pontos de fusão que variam entre os 100 e os 250 °C. Assim, a soldadura é o método adequado para a elaboração das junções realizadas nesta dissertação.

- A difusão é um processo em que o material das fitas é difundido entre si, ocorrendo normalmente a temperaturas iguais ou superiores a 500 °C. Devido às altas temperaturas a que ocorre, é necessário um posterior processo de oxigenação para que

o material recupere as propriedades supercondutoras que se degradam durante a difusão (J. Y. Kato et al. 2006).

Assim, as junções a realizar nesta dissertação terão por base as características apresentadas na Figura 2.10.

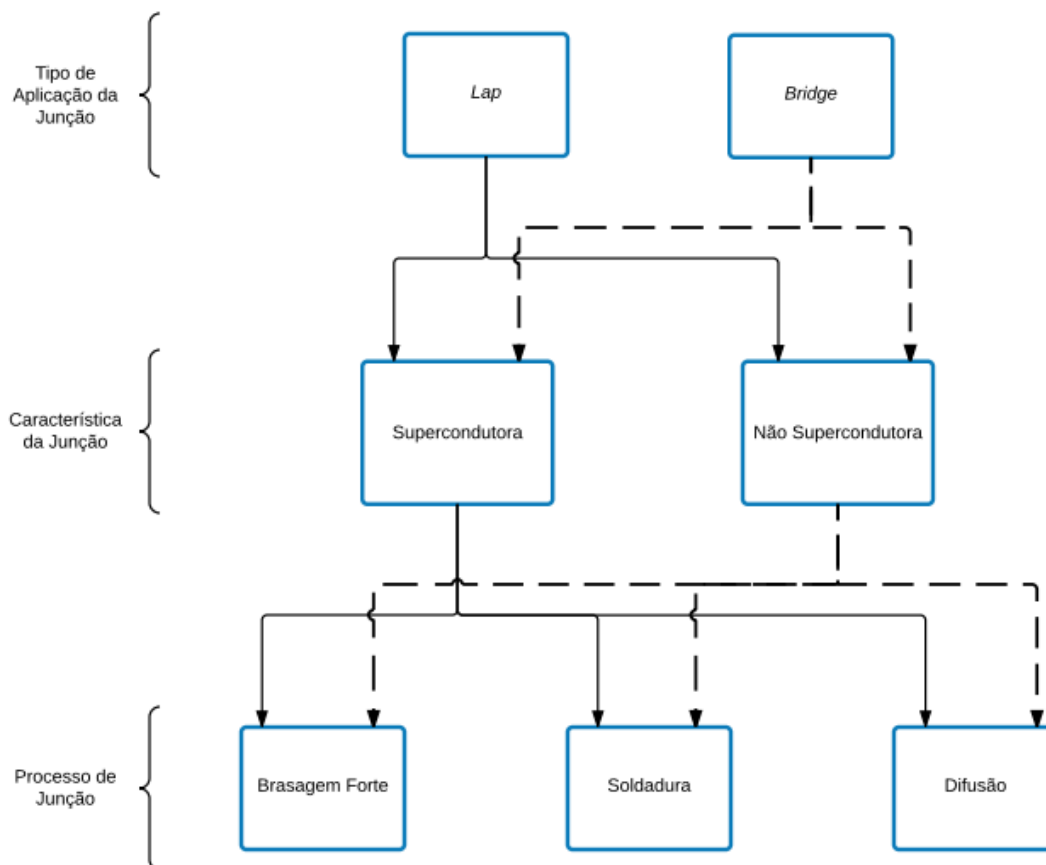


Figura 2.10 - Diagrama de árvore do processo de junção de fitas supercondutoras.

2.5 Estado de Arte

Dessa forma, é possível estudar diferentes formas de junção de fitas, com características e resultados bem distintos.

Com o objetivo de estudar os resultados da junção de fitas entre as superfícies de proximidade com a camada supercondutora e entre superfícies de proximidade com a camada do substrato, Figura 2.11, (Lee 2007) realizaram-se junções lineares *Lap*, utilizando segmentos de fita supercondutora YBCO AMSC 344S com camada estabilizadora de cobre e solda In-Bi (Índio-Bismuto), como material de adição, com um ponto de fusão de 70.9 °C.

Desse estudo verificou-se que a junção entre as superfícies de proximidade com a camada do substrato tinha uma maior resistência de junção, 3.24 $\mu\Omega$ e 0.138 $\mu\Omega$, e uma corrente crítica, 57.5 A, menor que a junção entre superfícies de proximidade com a camada supercondutora, 59.8 A, num ambiente criogênico, a 77 K. Dessa forma, a junção entre fitas deve ser realizada entre as superfícies de proximidade com a camada supercondutora, obtendo-se uma menor resistência no segmento de fita final.

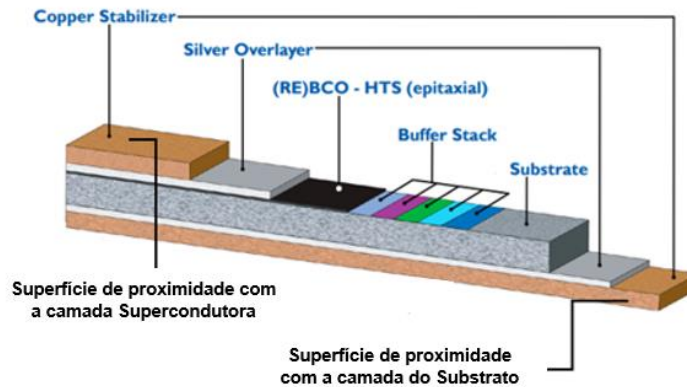


Figura 2.11 - Descrição das superfícies da fita supercondutora 2G (superfície supercondutora é a que se encontra mais perto da camada supercondutora enquanto que a superfície do substrato é a que tem uma distância maior entre a superfície e a camada supercondutora), retirado de (Super Power 2011).

Após esse estudo, o mesmo grupo, (Chang et al. 2008), analisou o impacto da remoção da camada estabilizadora da fita supercondutora e perceberam que a resistência poderia baixar para um valor entre 4.52 nΩ e 29 nΩ, dependendo da técnica utilizada para remover a camada de cobre. No entanto, a corrente crítica depois de feita a junção aumentava quando comparada com a corrente crítica da fita antes da junção, sendo necessário analisar o que causaria esse fenómeno.

Por forma a perceber melhor a influência na resistência da área de junção das fitas, em função do método utilizado para remover a camada estabilizadora, um grupo de investigação da universidade da Seoul decidiu analisar a junção de duas fitas supercondutoras cuja camada estabilizadora fora removida por calor ou por decapagem. Aplicando um ferro quente para remover a camada estabilizadora as propriedades supercondutoras da fita, mais concretamente a corrente crítica, degradava-se, concluindo-se que a remoção por calor não seria uma boa técnica a aplicar. Esse estudo, levou também à conclusão de que o calor aplicado durante o processo de junção deveria ser minimizado uma vez que poderia ter implicações adversas nas propriedades finais da fita.

Removendo a camada de cobre por decapagem verificou-se uma diminuição da resistência na área de junção relativamente à resistência medida inicialmente. Apesar de ser inevitável a existência de resistência na junção, devido à resistência inerente da solda e das camadas adjacentes à camada supercondutora, utilizando uma solda com baixa temperatura de fusão e minimizando a espessura, consegue-se obter uma junção com propriedades elétricas bastante favoráveis (Kim et al. 2009).

Por forma a obterem-se fitas consistentes no método de junção e baixa resistividade tornou-se necessário estudar e perceber as causas da variação da resistência na junção entre diferentes experiências. Com o intuito de perceber essas causas, em 2010, o investigador Jun Lu realizou diferentes ensaios experimentais: i) utilizando a mesma fita, *SuperPower YBCO Conductors* (SP17), variou as condições de soldadura, ii) realizou os mesmos ensaios em duas outras fitas, SP21 e SP17, utilizando sempre o tipo linear entre fitas com camada estabilizadora de cobre. Observou-se que, para diferentes tipos de material de adição, utilizando a mesma fita,

a resistência da junção variava a sua gama de valores. Verificou-se também que a resistência de junção mais baixa se obtinha para o ensaio realizado com a menor temperatura de soldadura aplicada e com a utilização de uma fita de solda Sn37Pb63 em vez de solda em pasta (Jun Lu et al. 2010).

Em suma, com o estudo de Jun Lu percebe-se que as características da fita supercondutora utilizada bem como o tipo de solda e as temperaturas a que se realiza a junção, influenciam o desempenho da fita soldada.

Segundo a literatura apesar de simples, o método de junção de fitas através da utilização de um material de adição, introduz resistência adicional à junção devido à resistência da solda utilizada, da camada estabilizadora e da camada de prata (J.Y. Kato et al. 2006). Dessa forma estudou-se um método sem a utilização de solda, ou seja, uma junção por difusão, entre fitas 2G com camada estabilizadora de prata. As fitas sofreram um processo de junção do tipo linear e foram aquecidas, sob pressão (30 MPa), a uma temperatura de 500 °C e arrefecidas à temperatura ambiente, numa atmosfera de oxigénio. Verificou-se que a resistividade obtida para a junção foi de 0.67 pΩ.m, mantendo-se as propriedades supercondutoras da fita bem como a corrente crítica. De notar que, aumentando a pressão aplicada, observou-se a degradação das propriedades supercondutoras da fita.

Mais recentemente, no estudo elaborado pelo grupo de investigação de Carlos Baldan (Baldan et al. 2013; Baldan et al. 2009), a fita supercondutora, produzida pela *American Superconductor Corp* (AMSC 344S), sem camada estabilizadora de cobre e com um reforço de aço inoxidável, é a que apresenta menor degradação da corrente crítica, I_c , aquando da soldadura *Lap* entre fitas com camada estabilizadora e sem camada estabilizadora. Por outro lado, a fita de YBCO com camada estabilizadora de cobre é a que apresenta menor resistividade na junção, 1.74 pΩm.

Nesse estudo realizaram-se junções Supercondutoras/não-Supercondutoras do tipo *Lap* entre dois segmentos de fita supercondutora, utilizando material de adição SnIn e SnPb, com ponto de fusão de 116 e 183 °C, respetivamente. Verificou-se que quando a junção era feita sob pressão, a sua espessura tornava-se menor e mais homogénea, conduzindo a uma menor resistência de junção, mas existindo, no entanto, uma redução do valor I_c .

Na Tabela 2.2, pode-se verificar algumas características essenciais das fitas supercondutoras utilizadas na literatura. Na Tabela 2.3 indica-se os resultados obtidos em algumas das experiências realizadas por várias equipas ao longo dos últimos anos.

Com a análise dessa tabela e pela literatura estudada conclui-se que, apesar dos avanços realizados na área das junções entre fitas supercondutoras, não se conseguiu determinar uma dependência concreta entre os valores de resistência da área de junção e os parâmetros avaliados. Sabe-se apenas que a espessura da camada de solda, o tipo de solda, a temperatura a que é feita a junção bem como o método utilizado estão relacionados, no entanto ainda não se conseguiu determinar uma relação sistematizada entre esses fatores.

Dessa forma, nesta dissertação pretende-se contribuir para a investigação realizada até agora por forma a obter um método eficaz e fiável de junções entre materiais supercondutores.

Tabela 2.2 – Características das fitas supercondutoras utilizadas

	AMSC		SuperPower		
	344S	344	SCS 4050	SCS 12050	SF 12100
SAT	YBCO	YBCO	YBCO	YBCO	YBCO
Camada Estabilizadora	Aço Inoxidável	Cobre	Cobre	Cobre	-----
Corrente Crítica mínima, I_c (A)	72	60	100	240	200

2.6 Síntese

Neste capítulo procedeu-se ao levantamento bibliográfico dos acontecimentos mais relevantes na área da supercondutividade, a evolução histórica, as propriedades mais importantes dos supercondutores, a descrição sumária das propriedades dos materiais supercondutores de altas temperaturas. Fez-se também um levantamento do estado atual de desenvolvimento de junções entre fitas supercondutoras e de alguns procedimentos experimentais utilizados, na literatura, para análise das propriedades elétricas na área de junção.

Tabela 2.3 - Resultados Obtidos na Literatura

Fita Utilizada	Camada estabilizada	I_c (A) (antes/depois)	Resistência ($\mu\Omega$)	Solda Utilizada/Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Área de Junção (cm^2)	Referência	
Junção Não Supercondutora Lap entre Camadas do Substrato							
<u>YBCO 344</u> <u>AMSC</u>	Cobre	60 / 57.5	3.24	In/Sn – 70.9	2.175	(Lee 2007)	
	Junção Não Supercondutora Lap entre Camadas Supercondutoras						
	Cobre	60 / 59.8	0.138	In/Sn – 70.9	2.175		
Junção Supercondutora Lap							
<u>YBCO 344</u> <u>AMSC</u>	Removida por calor	63 / 69.56	0.00452	Pb/Sn - 190	2.00	(Chang et al. 2008)	
	Junção Supercondutora Lap						
	Removida por decapagem	66 / 74.68	0.02895	Pb/Sn - 190	2.00		
	Junção Não Supercondutora Lap						
	Cobre	74.5 / 78.68	0.00701	Pb/Sn - 190	2.175		
Junção Não Supercondutora Lap							
<u>YBCO 344S</u> <u>AMSC</u>	Aço Inoxidável	72	72	0.667	Pb/Sn - 190	1.2	(Baldan et al. 2009)
			72	0.191		2.8	
			73	0.158		4	
			73	0.087		6	
			73	0.073		8	
Junção Não Supercondutora Lap							
<u>YBCO SCS 4050</u> <u>SP</u>	Cobre	103 / 93	0.0162	Sn/Pb - 183	2.52	(Baldan et al. 2013)	
<u>YBCO SCS 12050</u> <u>SP</u>	Cobre	254 / 245	0.0023		7.56		
<u>YBCO 344</u> <u>AMSC</u>	Cobre	79 / 88	0.0305		2.52		
<u>YBCO SF 12100</u>	-----	223	219		0.0477		3.84
			217		0.0385		8.64
<u>YBCO 344S</u> <u>AMSC</u>	Aço Inoxidável	88	72		0.191		3.01
			73	0.073	8.557		

CAPÍTULO
3**Procedimento Experimental**

Neste capítulo procede-se à descrição dos aspetos experimentais referentes à modelização das junções realizadas e à construção dos suportes para a execução de ensaios laboratoriais. Apresentam-se os diferentes métodos de junção e as suas características, bem como os materiais de adição utilizados.

A realização deste trabalho visa estudar as propriedades elétricas de diferentes junções, utilizando como base de estudo uma única área de união com aplicação de diferentes materiais de adição, de maneira a estudar a influência desses materiais na resistividade da fita. Na Figura 3.1 é apresentado o fluxograma do trabalho a desenvolver a nível laboratorial.

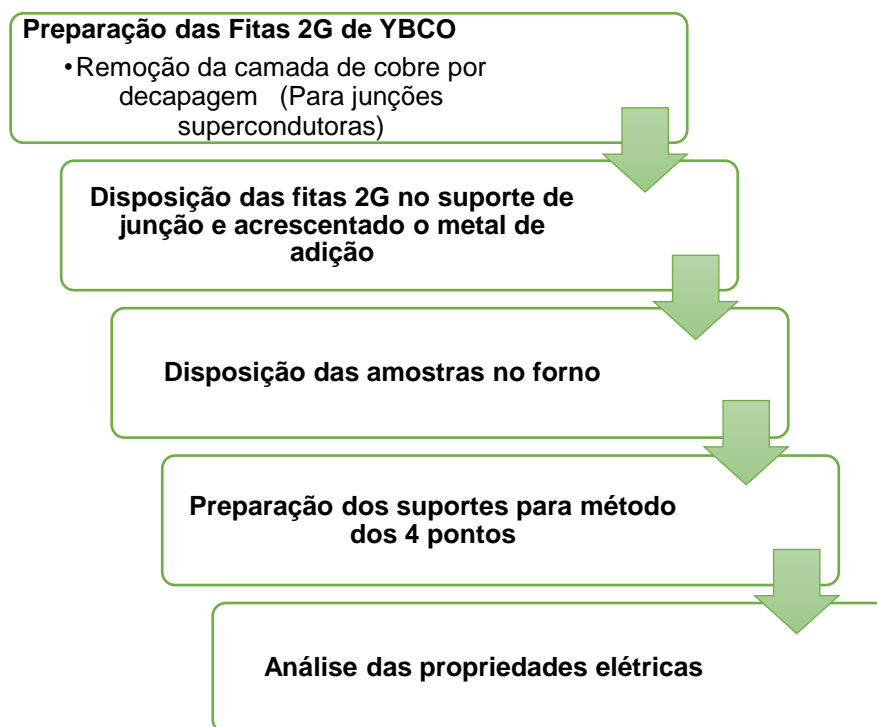
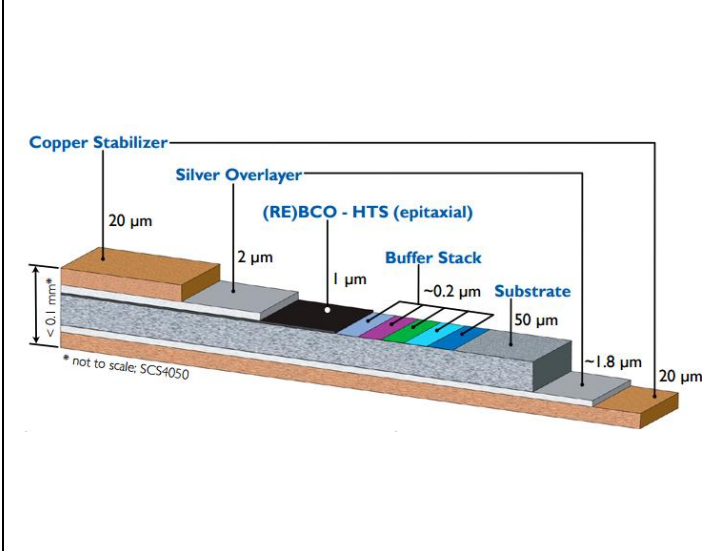


Figura 3.1 - Fluxograma do trabalho laboratorial a realizar.

3.1 Preparação das Junções de Fita 2G

A fita supercondutora utilizada para a realização do estudo é constituída por YBaCuO (SCS4050)⁷ com uma estrutura por camadas: Cu/Ag/YBCO/buffer stack/hastelloy/Ag/Cu, cujas principais características são apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Características da fita SuperPower SCS4050 (Super Power 2011)

	Largura (mm):	4.0
	Espessura total da fita (mm):	0.095
	Espessura da camada de prata (µm):	2.0
	Espessura da camada de cobre (µm):	20.0

Para determinar qual a superfície mais próxima da camada supercondutora deve seguir-se a informação: “*The HTS layer is the side with the wire identification information*”, uma vez que, apenas por observação a olho nu, não é possível diferenciar os lados.

3.1.1 Materiais de Adição



A escolha dos materiais de adição a utilizar, e indicados na Tabela 3.2, corresponde, por um lado, a um material mais comum e de preço acessível, solda de estanho e prata em pasta (SnAg), e, por outro lado, um material que apresenta melhor resistividade elétrica⁸, a fita de índio (In), quando comparada com o SnAg, e um ponto de fusão com uma temperatura menor, o que é favorável a uma menor degradação das propriedades supercondutoras da fita utilizada. Quanto ao tipo fita/pasta escolheu-se com o objetivo de estudar a diferença entre a aplicação dessas duas formas de material de adição. Segundo a literatura, conclui-se que um material de adição em fita assegura uma menor resistência e maior homogeneidade que materiais como pasta ou fio de solda, (Jun Lu et al. 2010).

É importante referir que, atualmente, existem diferentes materiais de adição de baixa temperatura constituídos por chumbo (Pb) cuja utilização deve ser evitada, uma vez que o Pb é um material nocivo para o ambiente e para a saúde, sendo esse outro fator a ter em conta para a escolha dos materiais de adição a utilizar nesta dissertação.

⁷ Produzida pela SuperPower Inc.

⁸ Resistividade Elétrica do Índio = $1.6679 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$, a 77 K, obtido por *curve-fitting*, (Fogelholm et al. 1981).

Tabela 3.2 - Materiais de adição utilizados para soldadura.

	Material de Adição:	Pasta de Estanho e Prata (Sn96.5Ag3.5)
	Temperatura de fusão (°C):	221
	Tempo de Aquecimento à temperatura referência (min):	15-20
	Resistividade Elétrica a 77 K (Ω.m)	3.3365×10^{-8} ⁹
	Material de Adição:	Fita de Índio (In99.99)
	Temperatura de fusão (°C):	157
	Tempo de Aquecimento à temperatura referência (min):	20-25
	Resistividade Elétrica a 77 K (Ω.m)	1.6679×10^{-8}

3.1.2 Remoção da Camada de Cobre por Decapagem

O processo de remoção por decapagem química de camadas da fita supercondutora 2G tem grande importância para o estudo das propriedades elétricas das junções de fitas SC e deve ser feito com bastante cuidado para que a camada supercondutora da fita utilizada não seja contaminada durante a junção.

Para se conseguir uma fita sem camada de revestimento removeu-se a camada de cobre da superfície de proximidade do supercondutor, por forma a realizar a junção *Bridge* supercondutora proposta, permanecendo, no entanto, a camada de prata uma vez que este material tem uma reduzida resistividade elétrica¹⁰ e melhor aderência ao metal de adição, o que permite uma soldadura mais robusta mecanicamente. De modo a manter a estrutura do YBCO intacta, consideraram-se os tempos apresentados na Tabela 3.3 e os seguintes passos:

- i. Identificar a superfície a decapar, superfície de proximidade do supercondutor ou superfície de proximidade do substrato;
- ii. Limpar a fita com um pano limpo;
- iii. Proteger a superfície que não será decapada com fita *Kapton*¹¹;
- iv. Molhar com metanol;
- v. Secar ao ar;

⁹ Resistividade Elétrica do Estanho e Prata = 3.3365×10^{-8} Ω.m, a 77 K, obtido por *curve-fitting* (Bagrets et al. 2014)

¹⁰ Resistividade da Prata, $\rho=15.9$ nΩ.m

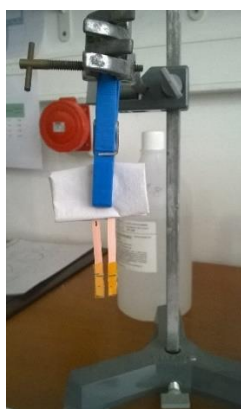
¹¹ Fita utilizada para revestir e proteger superfícies do químico utilizado.

- vi. Decapar com o material decapante, apropriado para a camada de cobre, durante um determinado tempo, de acordo com as propriedades;
- vii. Lavar, cuidadosamente, com água destilada;
- viii. Lavar com metanol;
- ix. Secar com ventilação.

Por forma a auxiliar o processo de decapagem, controlar a profundidade de imersão da área a decapar e para que não ocorresse a deposição dos resíduos utilizou-se um suporte, ilustrado na Figura 3.2 a), para segurar as amostras durante a imersão nos diferentes materiais utilizados, como se apresenta na Figura 3.2 b).

Tabela 3.3 - Tempo de cada etapa do processo de decapagem.

Etapa	iv	v	vi	vii	viii
Tempo (min)	5	2	20	5	5


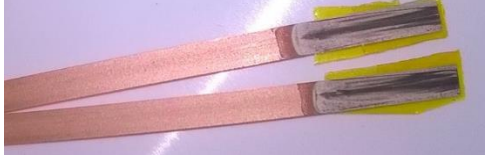
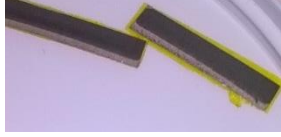



a) Suporte utilizado para segurar as amostras.

b) Substâncias usadas nas diferentes etapas: metanol, decapante de cobre e água destilada.

Figura 3.2 - Material utilizado durante o processo de decapagem.

Tabela 3.4 - Descrição das amostras decapadas.

	Amostra	Descrição	Decapagem
a		Dois segmentos de 6.50 cm	1.00 cm, na superfície de proximidade da camada SAT.
b		Dois segmentos de 6.50 cm	1.00 cm, na superfície de proximidade da camada SAT.
c		Dois segmentos de 2.00 cm	Total, na superfície de proximidade da camada SAT.
d		Dois segmentos de 3.00 cm	2.00 cm, na superfície de proximidade da camada SAT.

Observando a amostra c e d verificou-se a diferença do resultado final no processo de decapagem, o que aconteceu devido à posição em que se colocou o segmento de fita durante o processo químico de remoção da camada de cobre. Na amostra c o segmento de 2.00 cm foi colocado na horizontal em cada um dos recipientes o que fez com que as impurezas se depositassem novamente na fita, pelo que o processo não ocorreu como esperado e teve que ser repetido, amostra d. Neste caso, o segmento foi decapado da mesma maneira que a amostra a e b, utilizando o suporte da Figura 3.2a), pelo que se conseguiu o resultado esperado, isto é, a remoção da camada de cobre próxima da camada supercondutora da fita.

3.1.3 Suporte Mecânico de fitas para Análise das Propriedades Elétricas

Para a realização dos ensaios laboratoriais projetou-se um suporte para fixação das fitas, cumprindo as medidas necessárias para a aplicação do método dos quatro pontos, como se esquematiza na Figura 3.3, seguindo-se, para tal, a norma IEC 61788-3, adaptando-a para junções de fitas, uma vez que esta apenas está explícita para a realização de ensaios em segmentos de fita únicos.

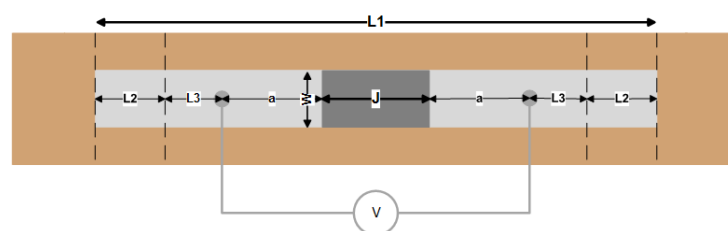


Figura 3.3 - Método dos quatro pontos adaptado a uma junção lap.

O suporte foi contruído com base nas medidas apresentadas na Tabela 3.5, e respeitou as seguintes igualdes:

$$\begin{cases} L_1 = 2 \times L_2 + L + 2 \times L_3 \geq 5 \times W \\ L, L_2, L_3 \geq W \\ L = J + 2 \times a \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} 13 = 2 \times 1.5 + 7 + 2 \times 1.5 \geq 5 \times 0.4 \\ 7, 1.5, 1.5 \geq 0.4 \\ 7 = 2 + 2 \times 2.5 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} 13 = 13 > 2 \\ 7, 2.5, 0.5 \geq 0.4 \\ 7 = 2 + 5 = 7 \end{cases} \quad (3.1)$$

Tabela 3.5 – Dimensões utilizadas nas junções.

Comprimento de Junção, J(cm)	Largura de Junção W(cm)	Área de Junção (cm ²)	a (cm)	L3 (cm)	L2 (cm)	L (cm)	L1 (cm)
2	0.4	0.8	2.5	1.5	1.5	7	13

De maneira a simplificar os ensaios e a minimizar os danos causados nas fitas, construíram-se 8 suportes, idênticos ao da Figura 3.4, utilizando para a base baquelite e para fixar as fitas nas suas extremidades chapas de cobre cujas dimensões estão representadas na Figura 3.5.

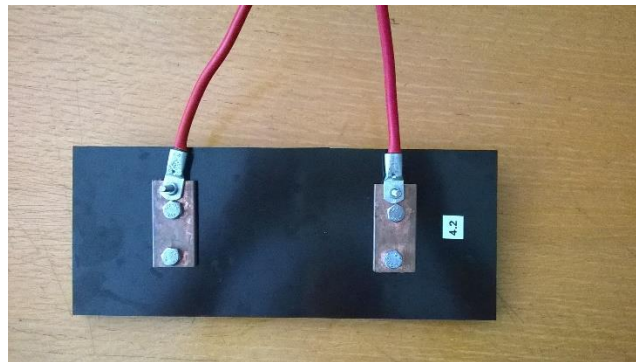


Figura 3.4 - Suporte para a realização dos ensaios.

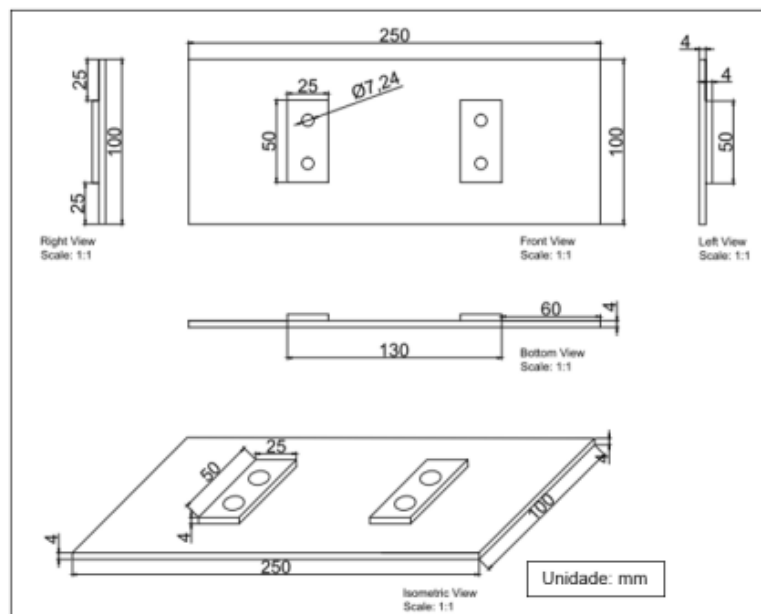


Figura 3.5 - Dimensões dos suportes criados para as fitas.

3.2 Dimensionamento das Junções em Fitas SC

Aplicando a mesma área de junção, 0.8 cm², pretende-se, para cada tipo de material de adição, realizar quatro junções distintas.

Dessa forma, realizaram-se dois tipos de junções, *Lap* e *Bridge*, com as características indicadas na Tabela 3.6 e Tabela 3.7, variando a posição da fita supercondutora por forma a se obterem junções supercondutoras e não supercondutoras, com ou sem inversão.

Tabela 3.6 - Características para junção *Lap*

	Modelo	SCS 4050
	l_0 (mm)	75
	l_1 (mm)	20
	l_2 (mm) (camada de solda)	0.0508 ¹² (fita In) / (pasta SnAg)

Tabela 3.7 - Características para junção *Bridge*.

	Modelo	SCS 4050
	l_0 (mm)	65
	l_1 (mm)	20
	l_2 (mm) (camada de solda)	0.0508 (fita In) / (pasta SnAg)

Para o tipo *Lap* realizaram-se duas junções não supercondutoras, não tendo sido necessário nenhum tratamento prévio na fita a utilizar:

- Com inversão, cuja união fez-se entre as superfícies de proximidade com a camada supercondutora, Figura 3.6 a);
- Sem inversão, cuja a união fez-se entre a superfície de proximidade com a camada supercondutora e a superfície de proximidade com a camada do substrato, Figura 3.6 b).

Para o tipo *Bridge* a questão da inversão não se colocou uma vez que a ideia deste tipo de junção, ainda que linear, é representar a junção criada por um único segmento de fita formando um anel, sendo que esta é realizada sempre com superfície de proximidade com a camada supercondutora. Tendo isso em conta, realizaram-se duas junções *Bridge*, uma não supercondutora e uma supercondutora, indicadas esquematicamente na Figura 3.6 c) e Figura 3.6d), respetivamente.

¹² Informação retirada do site http://buy.solder.com/Indium-Ribbon-99-99-Indium/P106_52/, consultado a 7/03/2016.

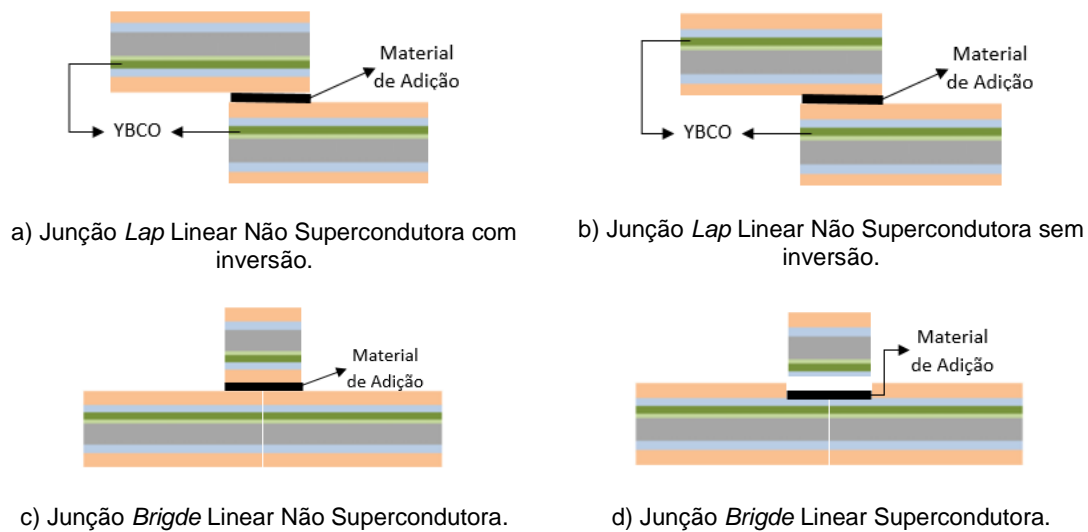


Figura 3.6 – Junções a realizar no desenvolvimento laboratorial.

3.2.1 Soldadura das fitas

O manuseamento da fita supercondutora e a realização das junções são processos que exigem certos cuidados. Para que, durante o tempo de aquecimento e arrefecimento da amostra a soldar, as junções fiquem unidas e sob a pressão necessária para a sua união utilizou-se um molde, apresentado na Figura 3.7, com as dimensões indicadas no Anexo I.



a) Suporte utilizado para a junção das fitas sob pressão.



b) Disposição das amostras no suporte.

Figura 3.7 - Suporte para soldadura de junções lineares.

Com os segmentos de fita preparados, realizou-se a soldadura das junções com a utilização do suporte apresentado na Figura 3.7, e com o mesmo método de soldadura para todos os ensaios, às temperaturas de 150 °C e 220°C, para a solda de In e SnAg,

respetivamente. Em seguida, deixou-se a amostra fora do forno a arrefecer até à temperatura ambiente. A realização destas junções executou-se utilizando um forno comum, no qual não é possível controlar a temperatura a cada instante.

Tendo em conta a largura do molde onde assentam as fitas, Figura 3.7 a), e a largura de cada fita utilizada, que é de 4 mm, as soldaduras realizaram-se dispondo dois espécimes em cada ensaio, Figura 3.7 b) tendo sido realizados no total quatro ensaios pela ordem apresentada na Tabela 3.8. As amostras ensaiadas seguiram a seguinte configuração de junções:

- Amostras 1.1 e 3.1 – *Lap* não supercondutora com inversão;
- Amostras 1.2 e 3.2 – *Lap* não supercondutora sem inversão;
- Amostras 2.1 e 4.1 – *Bridge* não supercondutora;
- Amostras 2.2 e 4.2 – *Bridge* supercondutora.

Tabela 3.8 - Junções efetuadas.

Ensaio	Amostra	Material de Adição	Tempo (min)			Temperatura do Forno (°C)
			Aquecimento do Forno	Duração da Amostra no Forno	Arrefecimento da Amostra	
1	1.1	In	15	25	20	150
	1.2					
2	2.1	SnAg	15	20	40	220
	2.2 ¹³					
3	3.1	SnAg	15	20	40	220
	3.2					
4	4.1	SnAg	15	20	40	220
	4.2 ¹²					

3.3 Síntese

Em suma, neste capítulo descreveram-se os processos necessários para a realização das junções em fitas SC. Desde a preparação das fitas, passando pelo processo de decapagem, até às características do suporte projetado para os ensaios experimentais, bem como as junções a realizar, indicadas na Figura 3.6. Descreveram-se ainda as características dos materiais de adição, bem como da fita supercondutora utilizada. Por fim, definiram-se as junções a realizar na dissertação elaborada, descritas na Figura 3.8.

¹³ Fitas submetidas ao processo de decapagem.

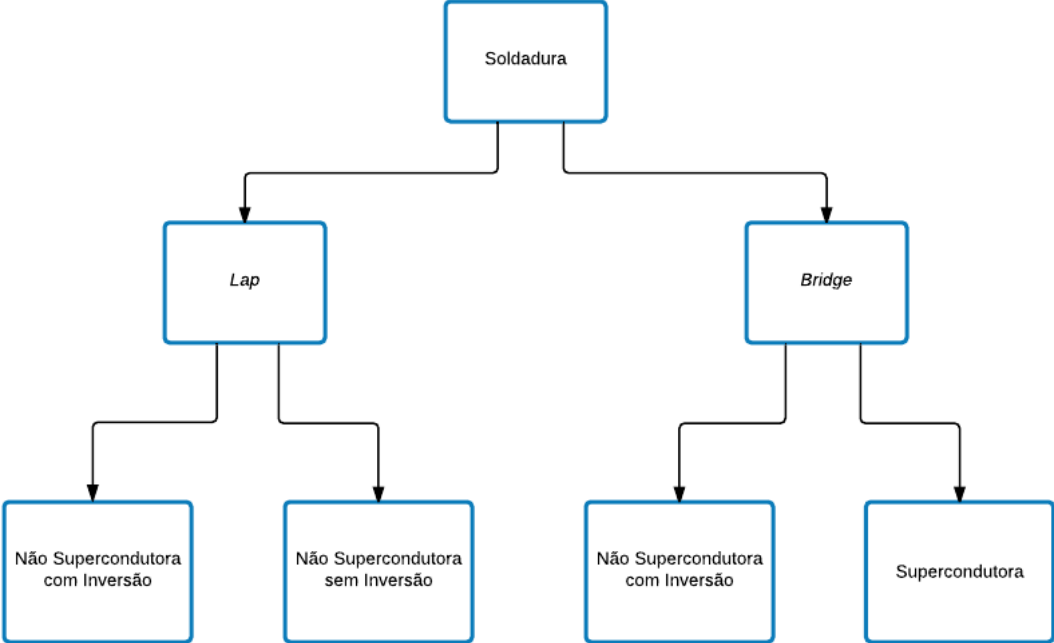


Figura 3.8 - Junções a realizar.

Análise Experimental do Comportamento Elétrico de Junções em Fitas SC

Neste capítulo analisam-se os ensaios laboratoriais realizados por forma a determinar o valor da resistência de junção em cada uma das amostras e tentar responder às *research question* colocadas neste trabalho. É apresentada e explicada a montagem utilizada para a determinação das características $R(I)$ obtidas para cada junção. Finalmente, são discutidos os resultados obtidos, tendo presente as questões levantadas no subcapítulo 1.2, e retiradas as conclusões relevantes.

4.1 Montagem Experimental

De forma a que o material estivesse no estado supercondutor, a determinação da queda de tensão na junção foi efetuada imergindo as diferentes amostras em azoto líquido, a uma temperatura de 77 K.

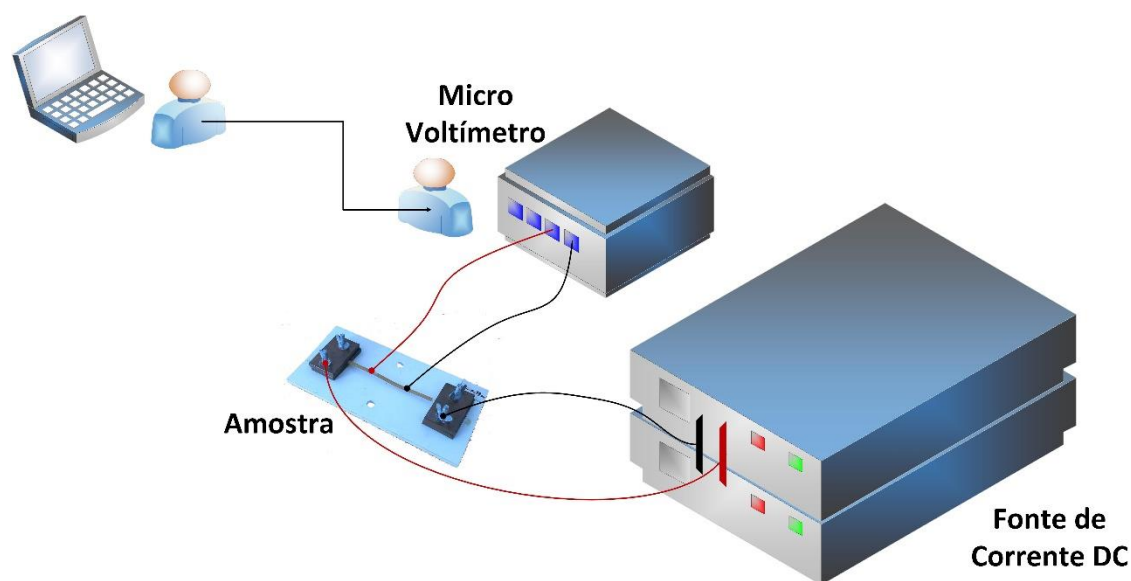


Figura 4.1 – Esquemático da montagem utilizada para medição de tensão na junção.

O material utilizado, e representado esquematicamente na Figura 4.1, para determinar a resistividade das junções realizadas, foi:

- Fonte de corrente DC (EPS8160-60) 0-60 A para permitir a variação da corrente imposta na amostra ensaiada;
- Multímetro de precisão (Keithley-2001) utilizado para medir a queda de tensão na junção da amostra;
- PC utilizado para anotação dos valores medidos bem como para o tratamento dos dados.

As medições foram efetuadas em regime DC, uma vez que a resistividade quase nula ocorre apenas nesse regime. Contrariamente, em regime AC existem perdas por efeito de Joule pelo que não se pode considerar a resistência nula.

Foi aplicada uma corrente DC crescente, com uma gama de valores $I \in [0;110]$ A, uma vez que a corrente crítica I_c tabelada para a fita 2G é 100 A. Para tal, utilizaram-se duas fontes de corrente DC, EPS 8160-60, Figura 4.2 a), de 60 A cada, ligadas em paralelo para alimentar o circuito. As quedas de tensão em cada junção foram adquiridas com um micro voltímetro Keithley-2001, ilustrado na Figura 4.2 c), tendo sido depois elaborado o cálculo da resistência correspondente.



Figura 4.2 - Montagem utilizada para medição de tensão na junção, a) fonte de corrente DC, b) amostra, c) micro voltímetro.

Uma vez que se trata de materiais supercondutores, durante a aquisição de dados a amostra foi colocada dentro de um recipiente de esferovite e mergulhada num banho de azoto

líquido como ilustra a Figura 4.2 b), à temperatura de 77 K, de forma a mantê-lo no estado supercondutor para assim ser possível determinar a corrente crítica da amostra.

Para a aquisição das correntes e respectivas quedas de tensão estava prevista uma forma automática, no entanto, por fatores externos, a recolha de dados foi efetuada manualmente.

4.2 Características $R(I)$ obtidas para as Junções em Fitas SC

A partir dos ensaios realizados e da determinação da resistência na junção, aplicando a lei de Ohm aos dados recolhidos, traçou-se a característica elétrica de cada fita obtendo-se resultados bastante distintos e que são apresentados na Figura 4.3. Estes resultados serão analisados individualmente e com base nas *research question* determinadas no início desta dissertação.

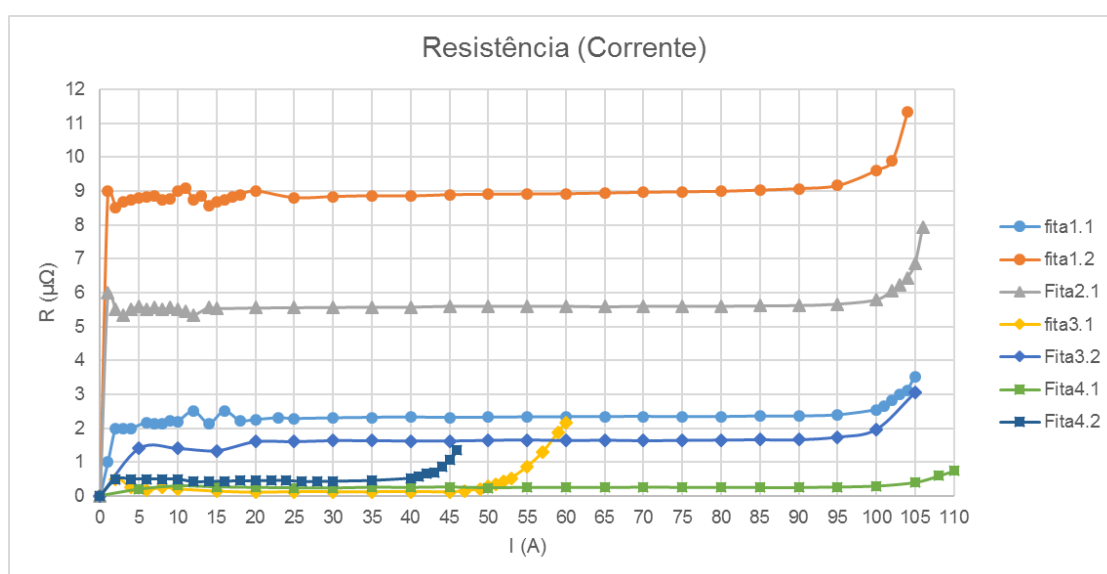


Figura 4.3 - Característica elétrica das junções ensaiadas a 77 K.

Segundo a norma IEC 61788-3 a corrente crítica determina-se pelo critério $E_c = 1\mu\text{V}/\text{cm}$, no entanto esta norma aplica-se a fitas supercondutoras únicas. No caso de junções entre fitas supercondutoras tal pode não se verificar uma vez que o material de soldadura adiciona resistência à fita supercondutora total.

De forma a obter uma análise coerente para os gráficos definiu-se que o valor de corrente, para comparação de resistência entre as diferentes junções, corresponderá a aproximadamente 70% da corrente crítica, corrente medida no instante exatamente anterior ao aumento abrupto de resistência, estando os valores apresentados na Tabela 4.1. A definição deste valor é relevante para o funcionamento uma vez que é necessária uma margem de segurança de forma a que não seja atingida a corrente crítica.

Tabela 4.1 - Valor de corrente definido para comparação de valores.

Fita	1.1	1.2	2.1	3.1	3.2	4.1	4.2
$I_{\text{crítica}} \text{ (A)}$	95	95	100	45	90	95	35
$I_{\text{COMP}} \text{ (A)}$	70	70	70	30	65	70	26

4.3 Análise e Discussão dos Resultados Obtidos Experimentalmente

Como se pode verificar, na Figura 4.3, os valores de resistência e corrente elétrica aproximam-se dos valores apresentados na literatura estudada, apresentando, no entanto, alguma degradação de corrente face ao valor apresentado pelo fabricante, de 100 A, bem como o elevado valor de resistência de uma das junções. Assim, para um estudo detalhado e conciso analisaram-se os resultados obtidos em prol das questões colocadas.

→ **Para um dado material de soldadura, qual a influência do tipo de junção na resistência e corrente crítica da fita?**

Relativamente ao material utilizado, tem como finalidade identificar junções com fita de In, Figura 4.4, e junções com pasta de SnAg, Figura 4.6. Esta análise tem como finalidade identificar a junção mais apropriada para um dado material, de acordo com os requisitos. Dependendo da utilização, a melhor junção não é obrigatoriamente aquela que apresenta menor resistência, uma vez que a corrente I_c também é um fator decisivo.

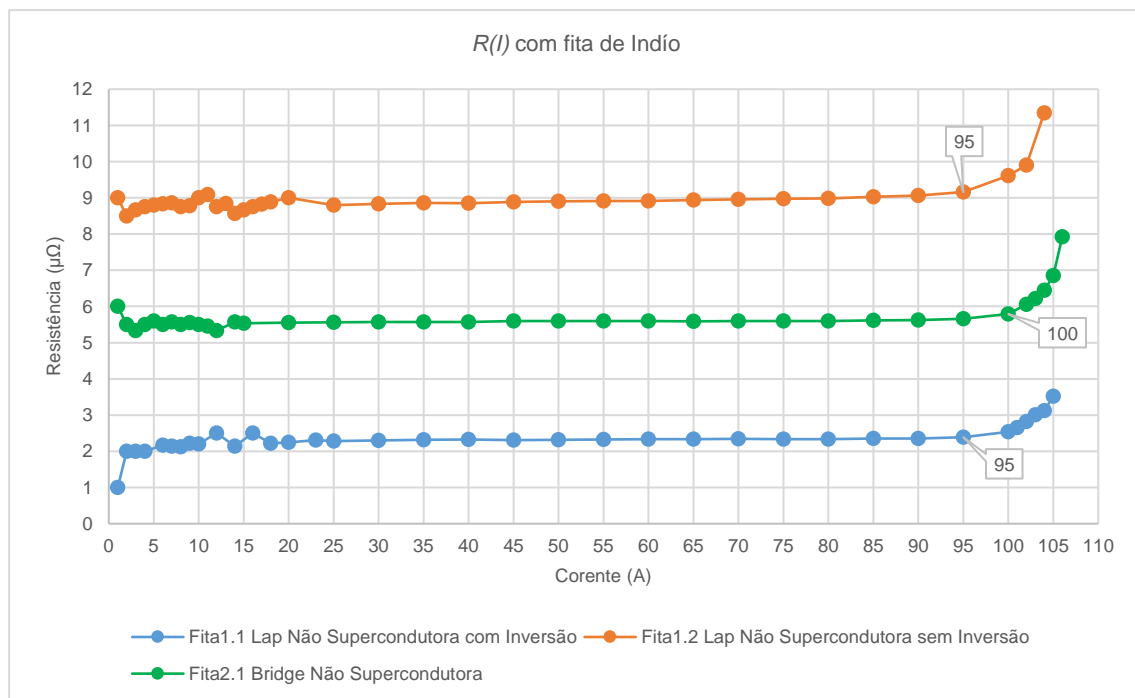


Figura 4.4 - Característica elétrica utilizando fita de índio nas diferentes junções.

No gráfico da Figura 4.4 observa-se que as diferentes junções têm um comportamento semelhante relativamente à sua corrente crítica, não apresentando uma degradação significativa comparativamente à corrente crítica da fita supercondutora SuperPower utilizada, com um $I_c = 100$ A.

Contrariamente à corrente, a resistência apresentada pelas diferentes junções, utilizando índio, tem uma grande variação de valores, $\epsilon [2;9] \mu\Omega$, sendo que a junção do tipo *Lap* não supercondutora com inversão é a que apresenta menor resistência elétrica, cerca de $2.34 \mu\Omega$.

A fita 1.1 oferece uma menor resistência que a fita 1.2, como se verifica no gráfico da Figura 4.4, o que se encontra de acordo com o apresentado no subcapítulo 2.5, sendo a junção 1.1 feita entre as camadas de proximidade com a camada supercondutora ao invés da junção 1.2 que é feita entre as camadas de proximidade com a camada do substrato.

Com o intuito de explicitar a junção *Lap* e *Bridge* apresenta-se na Figura 4.5 o circuito elétrico equivalente de cada uma das junções, respetivamente.

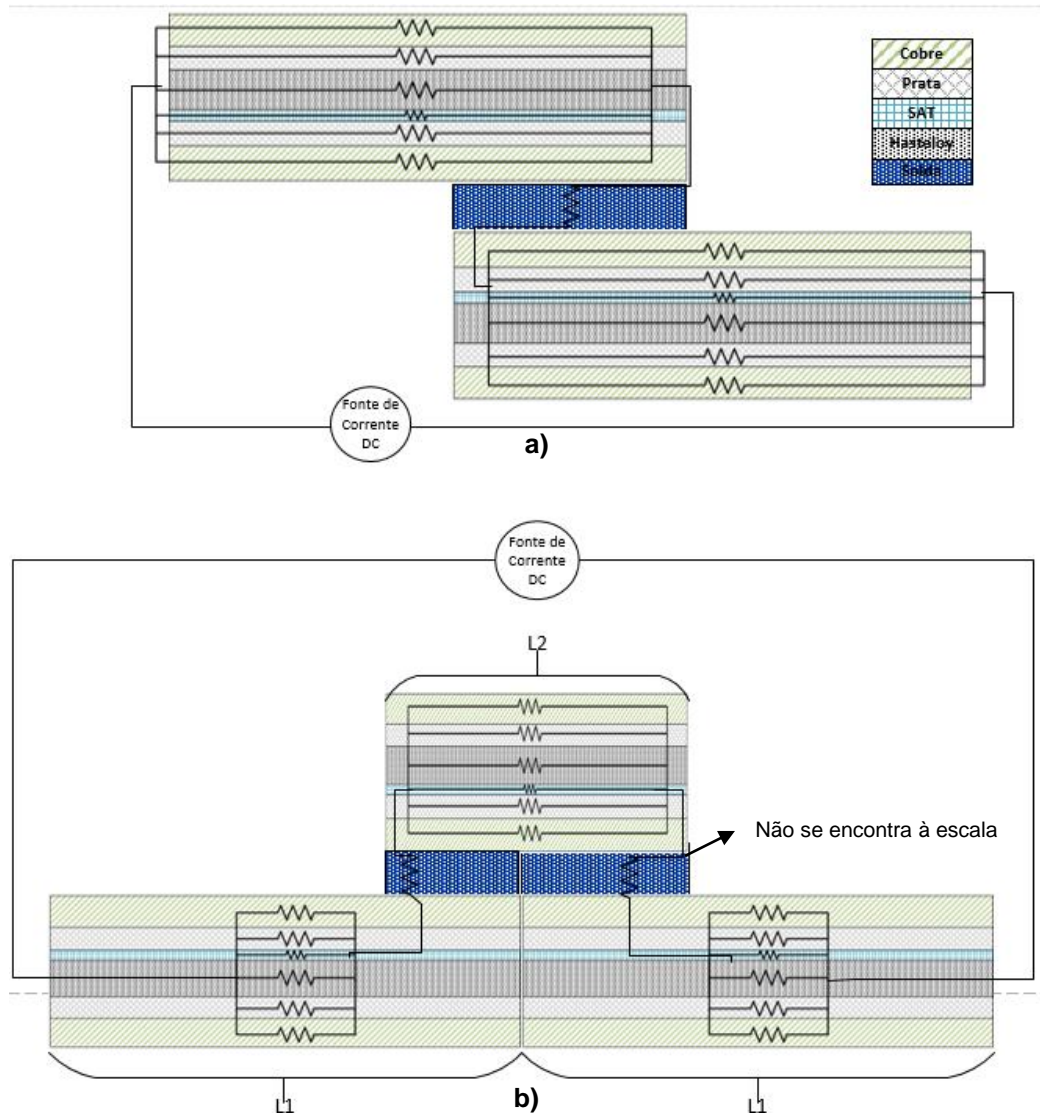


Figura 4.5 - Esquema elétrico equivalente da junção a) *Lap* e b) *Bridge*.

Analisando cada um dos circuitos da Figura 4.5 verifica-se que na junção *Lap* existe a série de duas fitas com o material de adição e na junção *Bridge* tem-se a série de três fitas com o material de adição, ou seja, para a configuração a) tem-se:

$$R_{lap} = (R_{cu} \square R_{ag} \square R_{Hts} \square R_{hast} \square R_{ag} \square R_{cu}) + R_{solda} + (R_{cu} \square R_{ag} \square R_{Hts} \square R_{hast} \square R_{ag} \square R_{cu}) \quad (4.1)$$

E para a configuração b) tem-se:

$$R_{bridge} = (R_{cu1} \square R_{ag1} \square R_{SAT1} \square R_{has1} \square R_{ag1} \square R_{cu1}) + R_{solda} + \left(\begin{matrix} R_{cu2} \square R_{ag2} \square R_{SAT2} \\ R_{has2} \square R_{ag2} \square R_{cu2} \end{matrix} \right) + \quad (4.2)$$

$$+ R_{solda} + (R_{cu1} \square R_{ag1} \square R_{SAT1} \square R_{has1} \square R_{ag1} \square R_{cu1})$$

Sabendo que a resistência elétrica para condutores homogêneos de secção constante, dada por:

$$R = \rho \times \frac{l}{S} \quad (4.3)$$

Onde ρ é a resistividade do material, l o comprimento percorrido pela corrente e S a secção transversal atravessada pela corrente elétrica, e usando os valores teóricos de resistividade correspondentes a cada elemento, a 77 K, apresentados na Tabela 4.2 e na

Tabela 4.3, pode determinar-se a resistência equivalente correspondente a cada tipo de junção. Substituindo nas equações (4.1 e (4.2 esses valores verifica-se que, teoricamente, a junção *Bridge* e a junção *Lap* têm um valor equivalente de resistência igual:

$$R_{lap} = (16.03 \times 10^{-3} \square 1.52 \times 10^{-3} \square 11.25 \times 10^{-3} \square 80.36 \times 10^{-3} \square 16.03 \times 10^{-3} \square 1.52 \times 10^{-3}) + 10.59 \times 10^{-9} + (16.03 \times 10^{-3} \square 1.52 \times 10^{-3} \square 11.25 \times 10^{-3} \square 80.36 \times 10^{-3} \square 16.03 \times 10^{-3} \square 1.52 \times 10^{-3}) \Leftrightarrow R_{lap} = 1.3 \text{ m}\Omega$$

$$R_{bridge} = (12.47 \times 10^{-3} \square 1.19 \times 10^{-3} \square 8.75 \times 10^{-3} \square 62.5 \times 10^{-3} \square 12.47 \times 10^{-3} \square 1.19 \times 10^{-3}) + 2.12 \times 10^{-9} + (7.13 \times 10^{-3} \square 0.68 \times 10^{-3} \square 5.00 \times 10^{-3} \square 35.71 \times 10^{-3} \square 7.13 \times 10^{-3} \square 0.68 \times 10^{-3}) + 2.12 \times 10^{-9} + (12.47 \times 10^{-3} \square 1.19 \times 10^{-3} \square 8.75 \times 10^{-3} \square 62.5 \times 10^{-3} \square 12.47 \times 10^{-3} \square 1.19 \times 10^{-3}) \Leftrightarrow R_{bridge} = 1.3 \text{ m}\Omega$$

Isto permite concluir que a diferença entre o tipo de junção depende do tipo de aplicação a que a esta se destina, uma vez que, teoricamente, o valor equivalente da resistência é igual. Esta comparação é realizada considerando um condutor homogêneo e um “caminho” de corrente uniforme. Uma vez que experimentalmente, a corrente num supercondutor pode tomar diversos caminhos e diversos valores numa secção, e tendo em conta que se trata de um ambiente não controlado, esta igualdade não se verifica nos valores obtidos nos ensaios laboratoriais. Seguidamente, analisam-se os resultados experimentais e verifica-se a diferença de valores entre os diferentes tipos de junção.

Tabela 4.2 – Resistência correspondente ao material de cada camada da fita supercondutora a 77K, para a junção *Lap*.

	ρ (Ω .m)	S (m^2)	Espessura (μ m)	l (m)	R (Ω)
Prata	2.85×10^{-9}	8×10^{-9}	2	4.5×10^{-2}	16.03×10^{-3}
Cobre	2.71×10^{-9}	80×10^{-9}	20		1.52×10^{-3}
YBCO	1×10^{-9}	4×10^{-9}	1		11.25×10^{-3}
Hasteloy	1.25×10^{-6}	0.7×10^{-6}	50		80.36×10^{-3}
Índio	1.6679×10^{-8}	80×10^{-6}	50.8	50.8×10^{-6}	10.59×10^{-9}

Tabela 4.3 - Resistência correspondente ao material de cada camada da fita supercondutora a 77K, para a junção *Bridge*

	ρ ($\Omega.m$)	S (m^2)	l1 (m)	l2 (m)	R1 (Ω)	R2 (Ω)
Prata	2.85×10^{-9}	8×10^{-9}	3.5×10^{-2}	2.0×10^{-2}	12.47×10^{-3}	7.13×10^{-3}
Cobre	2.71×10^{-9}	80×10^{-9}			1.19×10^{-3}	0.68×10^{-3}
YBCO	1×10^{-9}	4×10^{-9}			8.75×10^{-3}	5.00×10^{-3}
Hastelloy	1.25×10^{-6}	0.7×10^{-6}			62.5×10^{-3}	35.71×10^{-3}
Índio	1.6679×10^{-8}	40×10^{-6}	50.8×10^{-6}		2.12×10^{-9}	

Observando o gráfico da Figura 4.4 percebe-se que, no caso das junções com índio como material de adição, a junção que melhor resultado apresenta é a junção *Lap*. Dessa forma pode concluir-se que, experimentalmente, há diferenças no tipo de junção realizado. Essa diferença pode dever-se ao processo de junção e à maneira como a fita foi disposta no molde de soldadura.

De notar que apesar da realização de quatro junções, apenas três foram ensaiadas até ao fim uma vez que a junção *Bridge* supercondutora se danificou durante o ensaio, não sendo possível obter resultados.

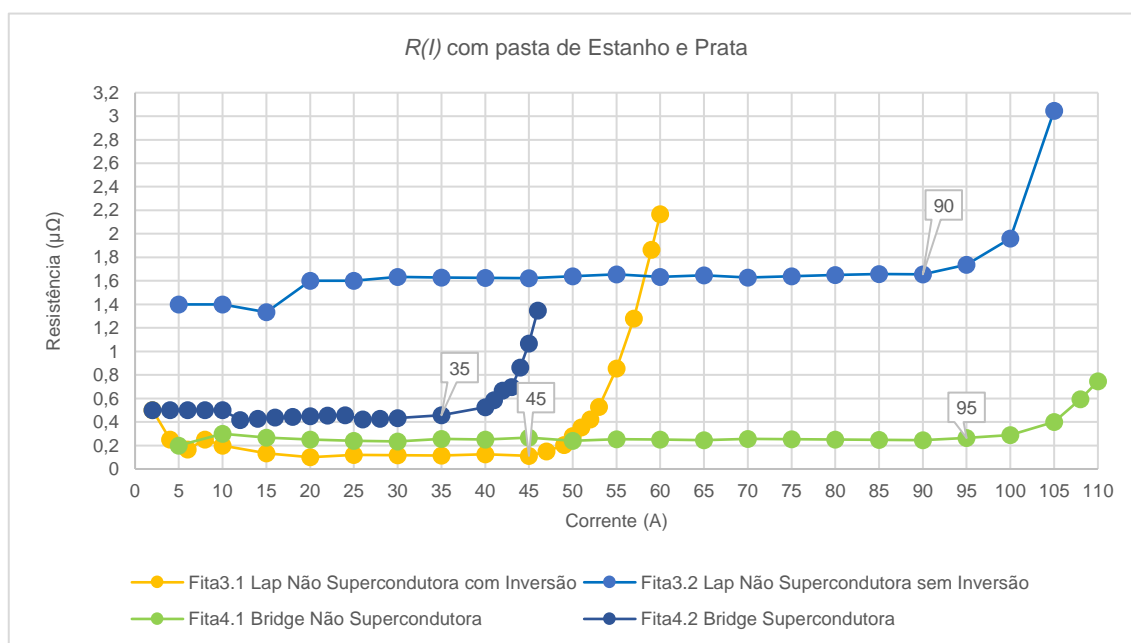


Figura 4.6 - Característica elétrica utilizando pasta de estanho e prata nas diferentes junções.

Analogamente à análise da Figura 4.4, as fitas 3.1 e 3.2, da Figura 4.6, apresentam um comportamento idêntico no que diz respeito à resistência da junção sendo que a junção entre as camadas com proximidade da camada supercondutora consegue muito menor resistência que a junção entre camadas com proximidade da camada do substrato. No entanto, na fita 3.1 verifica-se uma degradação da corrente crítica na ordem dos 50% relativamente às características fornecidas pela *SuperPower*. Este acontecimento pode dever-se ao rápido aquecimento do material de adição que leva a que a temperatura da junção aumente e consequentemente o material passe do estado supercondutor para o estado normal de funcionamento.

Numa primeira análise do gráfico ilustrado na Figura 4.6 percebe-se que, contrariamente às junções com índio, a utilização de estanho e prata como material de adição apresenta uma maior uniformidade relativamente ao valor de resistência e uma maior degradação da corrente crítica.

Em suma, através dos resultados anteriormente apresentados, pode-se inferir que o tipo de junção influencia o comportamento elétrico da amostra. No entanto, não é possível afirmar que um determinado tipo de junção seja o melhor independentemente do tipo de material de soldadura. Este resultado faz com que seja pertinente analisar a questão levantada no subcapítulo 1.2 e que a seguir se aborda.

→ **Para uma dada junção, qual a influência do material de soldadura utilizado, para a resistência e corrente crítica da fita?**

A análise dos próximos gráficos procura responder à questão colocada relativamente à influência do material de adição utilizado em cada uma das amostras. Assim, apresentam-se quatro gráficos correspondentes a cada uma das junções realizadas:

- *Lap* não supercondutora com inversão;
- *Lap* não supercondutora sem inversão;
- *Bridge* não supercondutora;
- *Bridge* supercondutora.

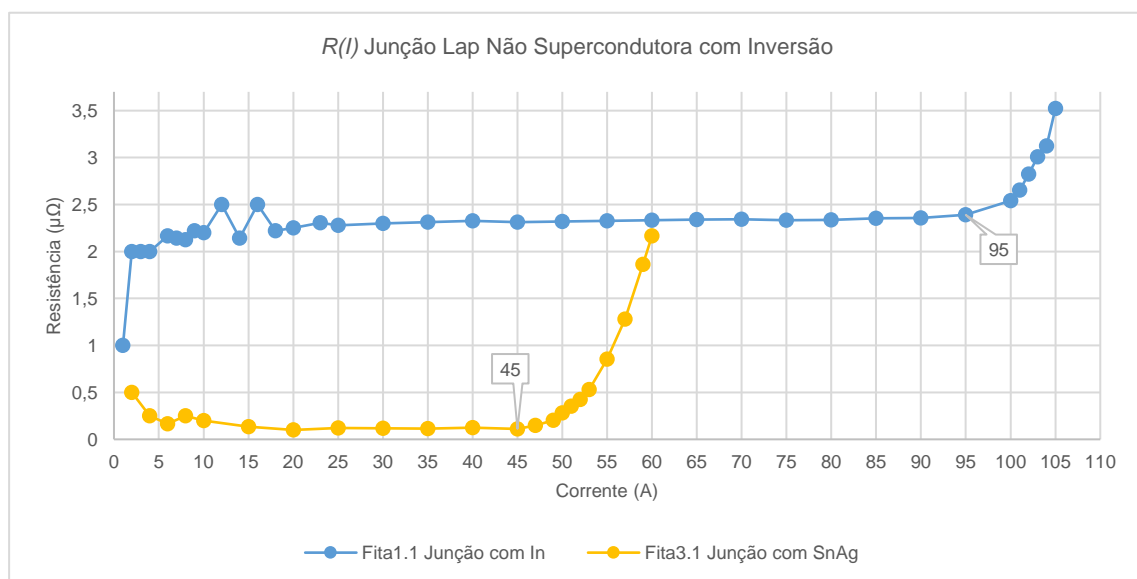


Figura 4.7 – Comparação entre a característica elétrica de diferentes materiais para uma junção do tipo *Lap* Não Supercondutora com Inversão.

Na Figura 4.7 observa-se que a junção apresenta uma boa característica elétrica relativamente à resistência da junção, aproximadamente de $0,11 \mu\Omega$, existindo, contudo, uma degradação de corrente bastante notável, sendo concretamente $I_c = 45 \text{ A}$. Isto pode dever-se, como referido anteriormente, ao rápido aquecimento do material de adição que resulta no aumento da temperatura da junção e consequentemente uma passagem antecipada do material do estado supercondutor para o estado normal de funcionamento. Desta forma percebe-se que

para uma junção deste tipo, *Lap* não supercondutora com inversão, apesar de uma resistência menor, a fita utilizando pasta de estanho e prata como material de adição apresenta uma corrente I mais reduzida. Dessa forma, consoante a utilização pretendida a junção com menor resistência, isto é, utilizando pasta SnAg, poderá ser uma boa opção, no entanto se forem necessárias correntes de funcionamento maiores pode ter que se abdicar da resistência tão diminuta em prol de um limite de I_c maior.

Resumindo, para este tipo de junções nenhum dos materiais parece ser o mais adequado quando se pensa globalmente nas características elétricas da junção, isto é, baixa resistência e elevada corrente crítica.

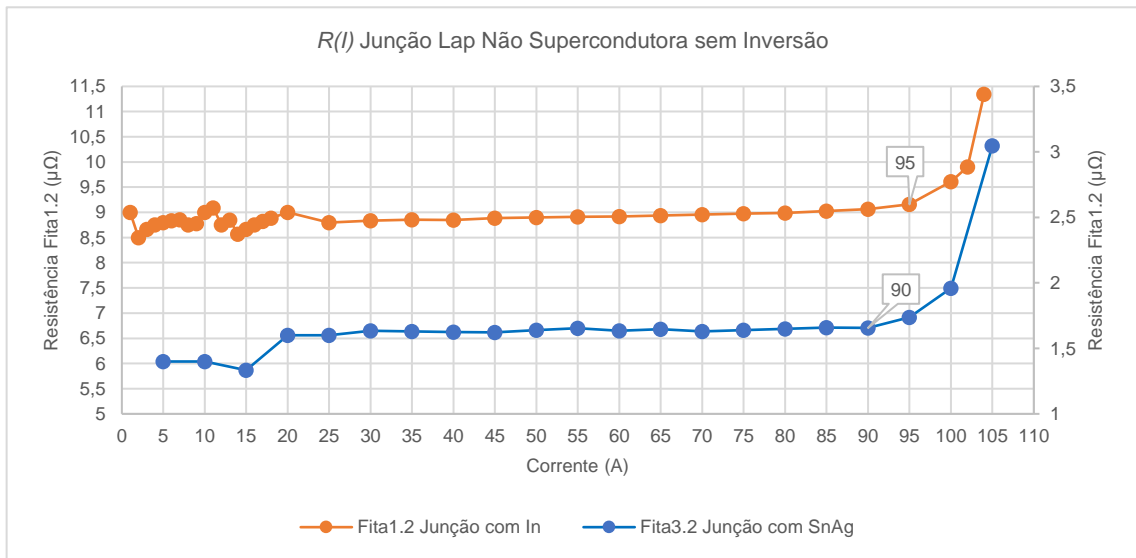


Figura 4.8 - Comparação entre a característica elétrica de diferentes materiais para uma junção do tipo *Lap* Não Supercondutora sem Inversão.

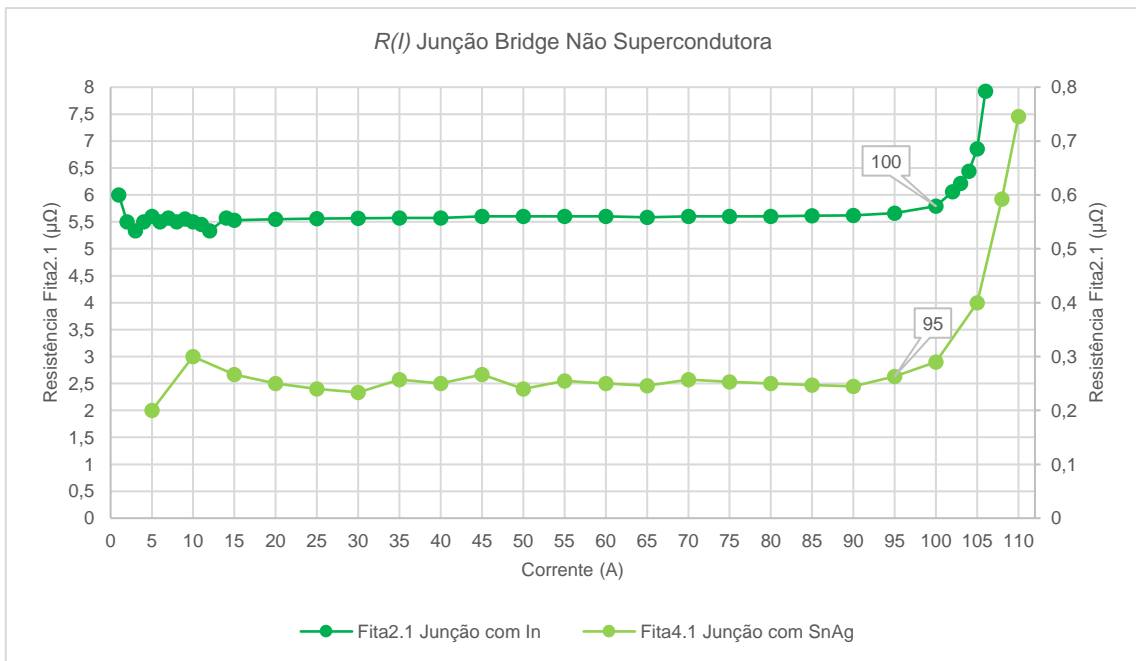


Figura 4.9 - Comparação entre a característica elétrica de diferentes materiais para uma junção do tipo *Bridge* Não Supercondutora.

Contrariamente ao comportamento analisado na Figura 4.7, nos gráficos da Figura 4.8 e Figura 4.9, verifica-se que não existe degradação de I_c sendo os valores compreendidos entre 90 e 100 A, o que se mostra superior ao valor de I_c tabelado pelo fabricante da fita de YBCO da *SuperPower*.

Um fator comum nesta questão, e que se pode verificar nesta última análise, é que a resistência equivalente das junções realizadas com fita de índio como material de adição é sempre superior à resistência das junções realizadas com pasta de estanho e prata. Apesar do índio ser um material que apresenta uma resistividade menor relativamente ao SnAg, esta ocorrência pode prender-se pelo facto da camada de material de adição ser pouco densa o que leva a uma menor secção e consequentemente uma maior resistência nessa camada. Por outro lado, o facto do material de adição ser submetido a altas temperaturas durante certos períodos de tempo pode resultar na alteração das suas propriedades elétricas, tais como o aumento da resistividade do mesmo.

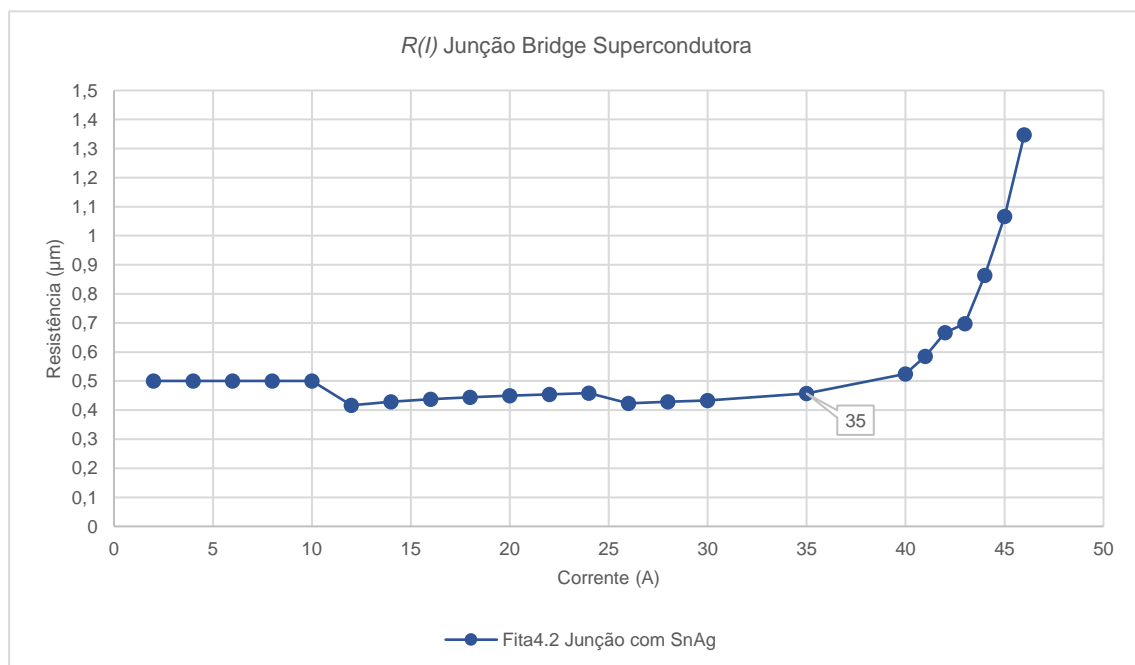


Figura 4.10 - Característica elétrica para uma junção do tipo *Bridge* Supercondutora.

Numa primeira análise do gráfico apresentado na Figura 4.10 verifica-se que apenas uma junção é apresentada, com pasta de SnAg, uma vez que a junção com fita de índio como material de adição se danificou durante o ensaio laboratorial, concluindo-se que este é um material mais frágil e que em certas condições poderá não ser o mais adequado.

Relativamente aos resultados apresentados verifica-se que apesar de uma boa resistência de junção, aproximadamente $0,423\mu\Omega$, existe uma degradação da corrente crítica na ordem dos 60%. Para além do fato referido anteriormente, o rápido aquecimento do material de adição e consequente aumento da temperatura da junção que resulta numa passagem abrupta e precoce do material do estado supercondutor para o estado normal de funcionamento, o caso desta fita ter sido sujeita ao processo de decapagem pode ter originado uma corrosão das

camadas adjacentes, entre elas a camada supercondutora, levando à degradação da característica da fita mesmo antes desta ser submetida ao processo de junção.

4.4 Síntese

Na Tabela 4.4 podem-se comparar os resultados obtidos para cada amostra, sendo importante referir que a degradação da I_c ocorre apenas em dois dos ensaios realizados e que as junções com SnAg apresentam resistências de junção bastante favoráveis.

Tabela 4.4 - Síntese dos valores obtidos experimentalmente.

Amostra	Material	R ($\mu\Omega$)	I_c (A)
Lap não supercondutora com inversão	Fita de Índio	2.33	95
Lap não supercondutora sem inversão		8.957	95
Bridge não supercondutora		5.6	100
Lap não supercondutora com inversão	Pasta de Estanho e Prata	0.11	45
Lap não supercondutora sem inversão		1.64	90
Bridge não supercondutora		0.25	95
Bridge supercondutora		0.457	35



Figura 4.11 – Fitas Danificadas durante os Ensaaios.

Na Figura 4.11, é possível observar a degradação de algumas das amostras depois de submetidas a um banho criogénico e ensaiadas até ao seu limite de corrente, o que levou ao aquecimento extremo do material e, conseqüente, rutura. Esse aquecimento pode ser verificado nos ensaios simulados onde se concluiu que a fita suportava uma variação de temperatura até 9 K, ou seja, $T \in [77, 86]$ K, ou seja, para valores acima da temperatura crítica, $T_c=86$ K, a fita supercondutora pode queimar.

CAPÍTULO
5**Simulação do Comportamento Elétrico e Térmico de Junções em Fita SC.**

O *software* de elementos finitos, Flux2D, juntamente com a ferramenta *simulink*, do Matlab, permite a simulação do comportamento elétrico das fitas supercondutoras e o estudo da alteração da temperatura aquando do aumento da corrente aplicada às amostras. Esta é uma maneira de estudar a influência das características elétricas no comportamento térmico da amostra.

Neste capítulo apresentam-se as simulações de elementos finitos realizadas, recorrendo ao *software* Flux2D, com o objetivo de analisar a resistência de cada camada constituinte da fita supercondutora bem como do material de adição. Por outro lado, estudou-se também a variação da resistência com a temperatura.

Sendo a simulação de junções no *software* elementos finitos, Flux2D, um trabalho complementar a esta dissertação, escolheu-se, com base nos resultados experimentais, a junção *Lap* Não Supercondutora com Inversão e fita de índio. Esta foi a junção na qual se obtiveram melhores resultados de resistência quer para a soldadura com índio, quer para a pasta de SnAg, sendo esta última mais difícil de modelizar uma vez que não se consegue saber em concreto a espessura utilizada na junção efetuada experimentalmente.

Finalmente, são abordados os resultados obtidos e a comparação dos mesmos com os resultados obtidos experimentalmente.

5.1 Caracterização da Amostra no Flux2D

Para simulação no *software* Flux2D é necessário definir cada elemento constituinte da amostra a simular. Para tal, é preciso definir diversos critérios, indicadas na Figura 5.1, e descritos seguidamente:

1. **Parâmetros** definem a altura e comprimento de cada camada constituinte da fita supercondutora e do material de adição;
2. **Pontos e Linhas** necessários para construir a face correspondente a cada camada da fita;

3. **Construir Faces**, faces correspondentes a cada elemento da fita. São as faces que dizem respeito a cada material constituinte da fita e a cada elemento do circuito elétrico;
4. **Material** que corresponde a cada face da fita. É necessário definir o tipo de material e algumas propriedades necessárias para a simulação como a resistência, condutividade térmica e capacidade térmica;
5. **Circuito Elétrico** correspondente à junção a simular;
6. **Parâmetros I/O e Sensores** que guardam os valores a cada instante da simulação para se conseguir uma simulação temporal;
7. **Malha dos Elementos** dividindo cada face em elementos finitos, através da criação de malhas;
8. **Cenário para *simulink*** de forma a criar um bloco para cosimulação entre o flux2D e o Matlab, de forma a conseguir-se realizar a simulação no tempo e com a influência do instante anterior no cálculo do instante seguinte. Uma vez que se pretende analisar o comportamento térmico bem como o comportamento elétrico da fita e que ambos têm influência um no outro, isto é, a temperatura da fita aumenta com o aumento da corrente, é necessário criar, no flux2D, um cenário “*Transient Thermal*” e um cenário “*Transient Magnetic*”.

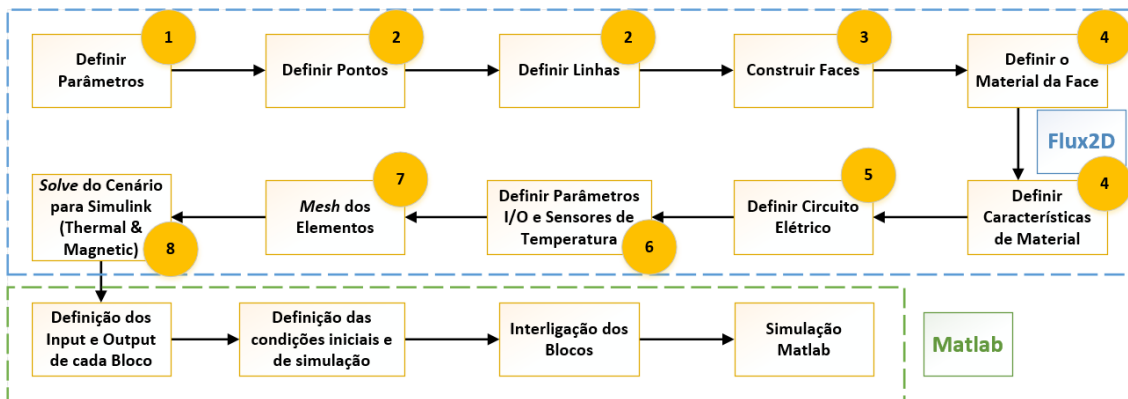


Figura 5.1 - Diagrama para Configuração de uma fita supercondutora no software Flux2D.

Para uma melhor interpretação da configuração deste tipo de amostras são apresentadas no Anexo I, imagens ilustrativas de cada passo indicado na Figura 5.1, referentes ao ambiente de trabalho do software Flux2D.

5.2 Circuito Elétrico no Flux2D

Por forma a definir os elementos nos quais foram medidos os valores pretendidos, esquematizou-se no Flux2D, o circuito elétrico equivalente da amostra simulada. Como representado na Figura 5.2, a corrente é aplicada à amostra e divide-se pelas diferentes camadas de acordo com as características dos diferentes materiais, nomeadamente secção e resistividade, sendo esperado que a camada supercondutora seja a que recebe maior corrente uma vez que é o material com menor resistividade. A equivalência do circuito pode ser vista

como um paralelo de resistências, correspondentes a cada camada da fita supercondutora, em série com a resistência do material de adição.

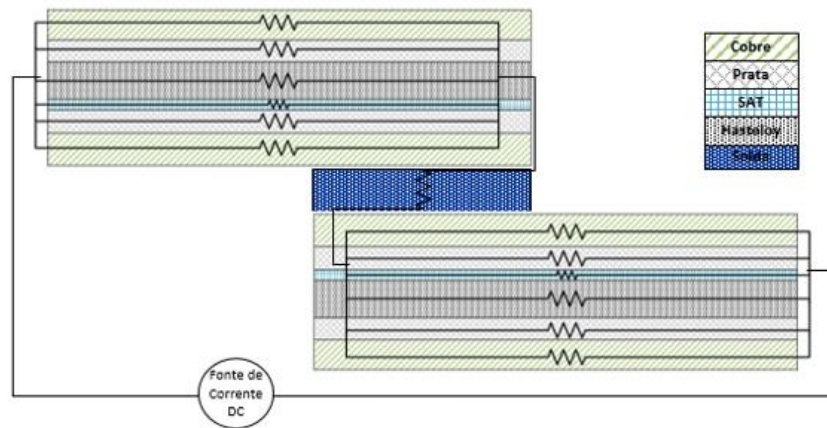


Figura 5.2 - Esquema elétrico correspondente à junção de duas fitas supercondutoras.

5.3 Cosimulação (Flux2D & Matlab)

Através da cosimulação entre os programas Flux2D e Matlab foi possível simular o comportamento elétrico de uma junção, bem como analisar a influência da temperatura na variação de resistência em cada camada da fita supercondutora percebendo-se qual o material que origina maior resistência na junção final.

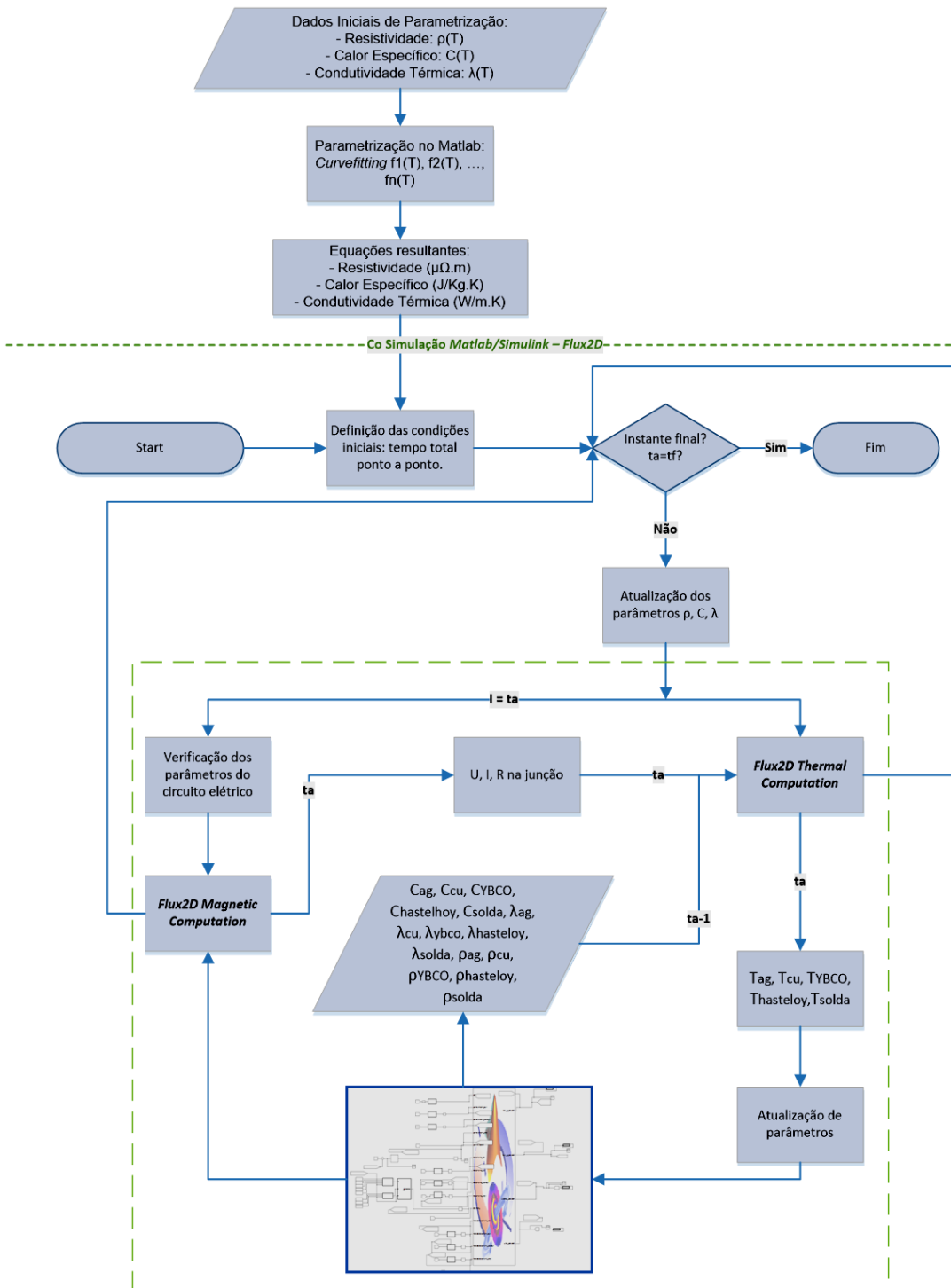
Para tal foi necessário parametrizar o comportamento da resistividade, ρ , da condutividade térmica, λ , e do calor específico, C , de cada material para a realização da simulação

Seguindo a Figura 5.3, primeiramente foi necessário parametrizar as equações que representam o comportamento de ρ , λ e C de cada material em função da temperatura. Com os dados necessários recolhidos utilizou-se a ferramenta do Matlab, *ctool*, para realizar ajuste dos dados, obtendo-se funções polinomiais de 2º e 3º grau correspondentes a $\rho(T)$, $\lambda(T)$ e $C(T)$ de cada material, apresentadas no Anexo III.

Obtidas as equações e juntamente com dados provenientes de um trabalho de doutoramento em curso¹⁴ (Arsénio et al. 2016), que descrevem o comportamento elétrico e térmico da fita supercondutora, definiu-se o tempo de simulação. Neste caso, utilizou-se o tempo para representar o valor de corrente aplicado, ou seja, definiu-se um tempo total de simulação de 200 ms, com um passo discreto de 5 ms. Assim, a corrente aplicada ao circuito simulado será definida por $I \in [1, 175]$ A, isto é, com um incremento de 5 A por passo.

Finalmente, findo o tempo de simulação os valores de todos os parâmetros pré-definidos são guardados no ficheiro Excel que permite a análise e discussão desses valores e, numa fase final, a comparação com os valores experimentais, possibilitando a validação do trabalho realizado laboratorialmente.

¹⁴ Agradeço ao meu coorientador, Pedro Arsénio, pela disponibilização de parte do seu trabalho/investigação.



15

Figura 5.3 - Fluxograma explicativo da cosimulação.

Obtidos os resultados da simulação procedeu-se à análise dos mesmos. Observando-se a Figura 5.4 verifica-se que a camada que oferece maior resistência à fita é a camada do material de adição, $R_{in} \approx 0.42 \mu\Omega$. Este é um valor que se enquadra dentro dos valores analisados na revisão bibliográfica realizada no capítulo 2 permitindo perceber que a parametrização dos componentes correspondentes ao cálculo da resistência foi corretamente calculada.

15 Verificar o Anexo IV

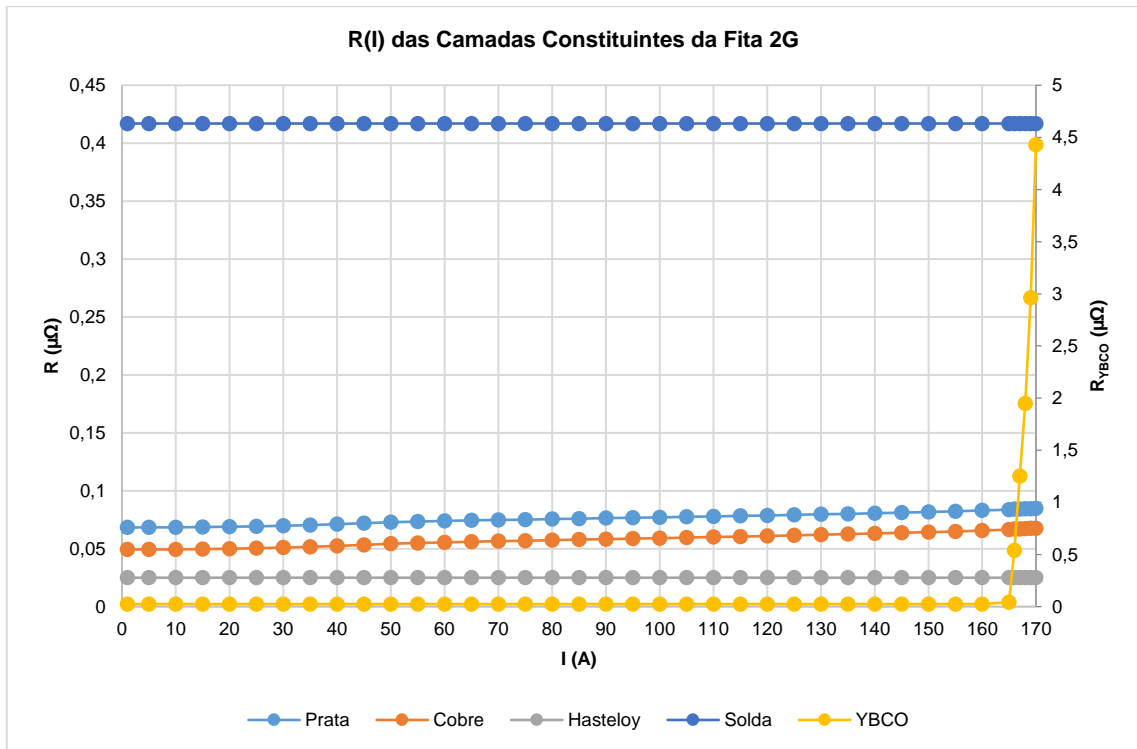


Figura 5.4 – Caraterística elétrica das camadas constituintes da fita supercondutora 2G e do material de adição In.

Por outro lado, observa-se na Figura 5.4 que todas as camadas com exceção da camada correspondente ao material supercondutor, YBCO, apresentam um comportamento retilíneo. Já o YBCO apresenta um comportamento retilíneo até uma dada corrente e, depois do ponto de I_c , sofre um aumento abrupto de resistência. Este aumento, representativo da passagem do estado supercondutor para o estado normal, introduz na junção como um todo o comportamento supercondutor desejado do material, como verificado no estudo das propriedades supercondutoras no subcapítulo 2.2.

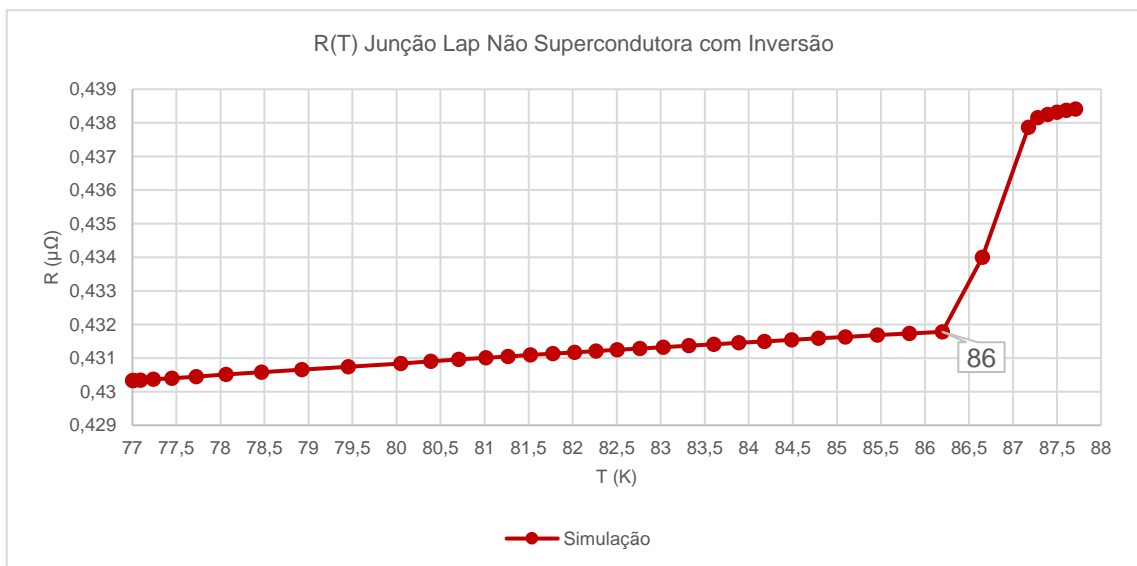


Figura 5.5 – Simulação do Comportamento Térmico da Junção *Lap* Não Supercondutora com Inversão com soldadura de In.

Analisando o gráfico apresentado na Figura 5.5 verifica-se que o comportamento térmico da junção corresponde ao esperado, e estudado anteriormente. Sendo a temperatura um dos limites da supercondutividade, pelo gráfico da figura percebe-se que a temperatura crítica, T_c , correspondente à junção simulada corresponde a $T_c \approx 86$ K. Dessa forma pode referir-se que a fita suporta, no estado supercondutor, um aumento da temperatura de cerca de 9 K até atingir o seu limite e transitar para o estado normal.

5.4 Comparação de Resultados de Simulação e Experimentais

Como mencionado anteriormente, realizou-se a simulação de uma junção *Lap* não supercondutora com inversão e com In como material de adição, para estudar o comportamento térmico da mesma. Nessas simulações foi também determinada a característica elétrica da junção sendo possível realizar a comparação entre os resultados simulados e obtidos experimentalmente. Dessa forma foi possível perceber a fiabilidade do dimensionamento efetuado para a simulação em Flux2D.

Na Figura 5.6, abaixo apresentada, comparam-se os valores de resistência medidos experimentalmente, $R_{LAB} \approx 2.33 \mu\Omega$, e em ambiente de simulação, $R_{SIM} \approx 0.431 \mu\Omega$, concluindo-se que a resistência calculada em simulação apresenta um menor valor de resistência, contudo também uma menor variação de valor, ou seja, apesar de sofrer um aumento de resistência aos 155 A, esta continua a ser de diminuto valor quando comparado com a resistência obtida experimentalmente.

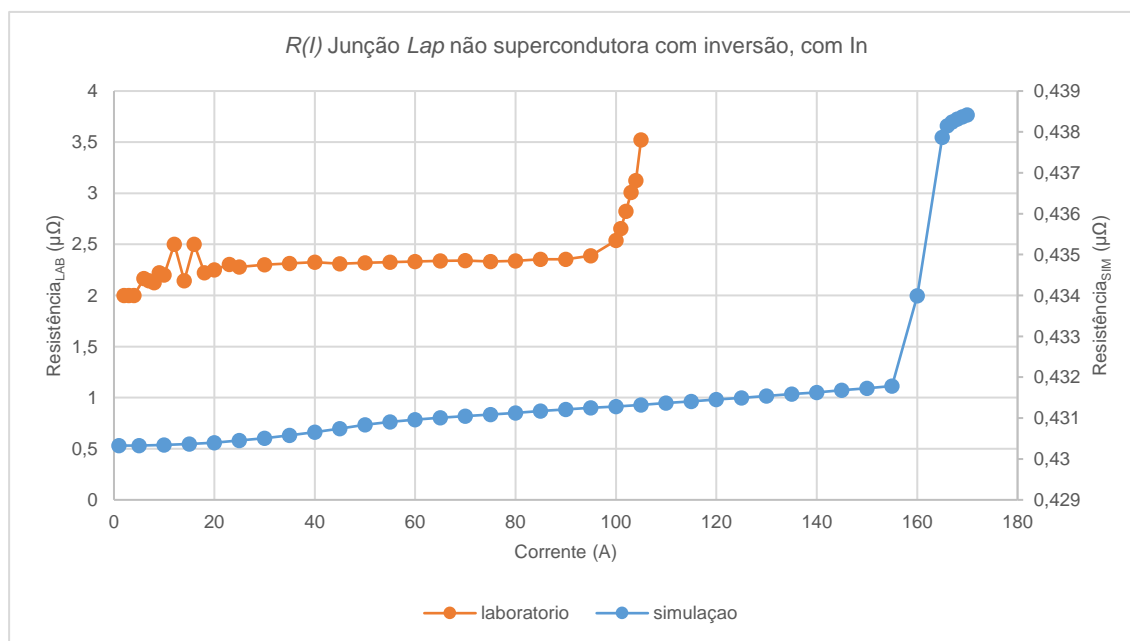


Figura 5.6 - Característica Elétrica da Junção *Lap* Não Supercondutora com Inversão, com material de adição In.

Relativamente à corrente crítica da junção verifica-se uma diferença de valores, $I_{CLAB} \approx 95$ A e $I_{CSIM} \approx 155$ A, entre o valor de laboratório e o valor simulado, respetivamente. Uma vez que o valor de I_c indicado pelo fabricante das fitas 2G utilizadas é cerca de 100 A, o que se verificou

nos ensaios experimentais ainda que com alguma degradação, conclui-se que o dimensionamento correspondente à variação de corrente elétrica na simulação não foi o mais adequado já que o valor de I_c aproxima-se dos 155 A, ou seja, apresenta um aumento de cerca de 55 A. Esta discrepância de correntes críticas deve-se a uma parametrização menos adequada dos modelos inseridos no ambiente de simulação Flux2D, uma vez que neste ambiente não é tida em conta a degradação da fita causada pelos processos de junção e pelo próprio ensaio experimental.

5.5 Síntese

No capítulo 5 apresentou-se a descrição para modelização e parametrização de uma junção com fita supercondutora no *software* Flux2D juntamente com o Matlab. Realizou-se o ensaio por simulação de um tipo de junção com fita supercondutora e analisaram-se os resultados obtidos bem como a comparação de valores entre o ensaio experimental e a simulação, concluindo que a modelização realizada necessita de melhorias no que diz respeito ao comportamento da corrente crítica numa fita supercondutora.

CAPÍTULO
6**Conclusões e Trabalho Futuro**

O trabalho realizado apresentou resultados experimentais bem como de simulação de junções entre fitas supercondutoras de segunda geração. As características dessas junções foram obtidas de acordo com a norma (IEC 61788-3, 2006), por forma a ser possível determinar a corrente crítica das mesmas.

Sendo este um trabalho de investigação, o tema não se encerra com esta contribuição, sendo necessário identificar trabalho futuro importante para a continuação da investigação relacionada com o tema aqui apresentado.

6.1 Conclusões

Tendo como propósito aplicações práticas, o estudo do comportamento elétrico das junções realizadas permitiu responder às questões colocadas no início desta dissertação e retirar algumas conclusões importantes, assim como contribuir para trabalho futuro realizado nesta área.

Considera-se que, dos materiais de adição estudados, o que apresenta uma maior viabilidade de utilização no que diz respeito à resistência associada à junção é a pasta SnAg. Para além de uma menor resistência equivalente em todos os ensaios realizados, quando comparada com a fita de In, numa primeira análise demonstra melhor resistência mecânica já que as junções realizadas com índio apresentaram uma constituição mais frágil, chegando a ocorrer a destruição de uma delas. De notar que esta verificação deveria ter sido realizada experimentalmente, através da realização de ensaios de tração aplicados às junções, de forma a comprovar e comparar a sua resistência mecânica. Tal não foi possível uma vez que o equipamento existente apresentava forças mínimas de tração superiores às forças máximas que uma fita supercondutora suporta.

Num panorama geral os resultados permitiram perceber que a escolha do tipo de junção ou do material de adição depende das características necessárias para a aplicação desejada. Dos resultados obtidos conclui-se que mesmo existindo degradação de corrente crítica em algumas junções, estas apresentam uma baixa resistência, nomeadamente [0.11; 0.457] $\mu\Omega$, o

que pode ser favorável em aplicações que não necessitem de uma corrente muito elevada. Analogamente, para as fitas em que se verificou uma diminuta degradação de corrente obtiveram-se resistências de [0.25; 1.64; 2.33] $\mu\Omega$ para as melhores junções.

Considera-se também importante a realização destes mesmos ensaios num número maior de amostras por forma a validar os resultados obtidos. Tal não foi possível pela falta de material supercondutor 2G.

Por fim, o desempenho da simulação realizada e da respetiva parametrização de valores apesar de apresentar resultados aceitáveis necessita de uma melhor configuração no que diz respeito aos limites da corrente crítica e ao critério para esses limites.

6.2 Trabalho Futuro

O trabalho desenvolvido permitiu verificar o comportamento de diferentes junções com diferentes materiais de adição e perceber o seu comportamento elétrico. No entanto, de forma a permitir a otimização dessas junções torna-se necessária uma análise detalhada relativamente às propriedades mecânicas das mesmas, bem como dos materiais de adição aqui utilizados. Uma vez que os ensaios se realizam em ambiente criogénico parece relevante o desenvolvimento de um protótipo capaz de fixar as amostras, mergulhadas em azoto líquido e durante os ensaios laboratoriais de tração mecânica.

Por último, tendo em consideração os resultados obtidos por simulação, é importante estudar experimentalmente o comportamento térmico dos vários tipos de junções possíveis, uma vez que o aumento da temperatura terá consequentes efeitos nas propriedades elétricas e mecânicas de qualquer junção realizada. É também importante criar um ambiente de simulação parametrizado de raiz e genérico a qualquer tipo de junção e característica.

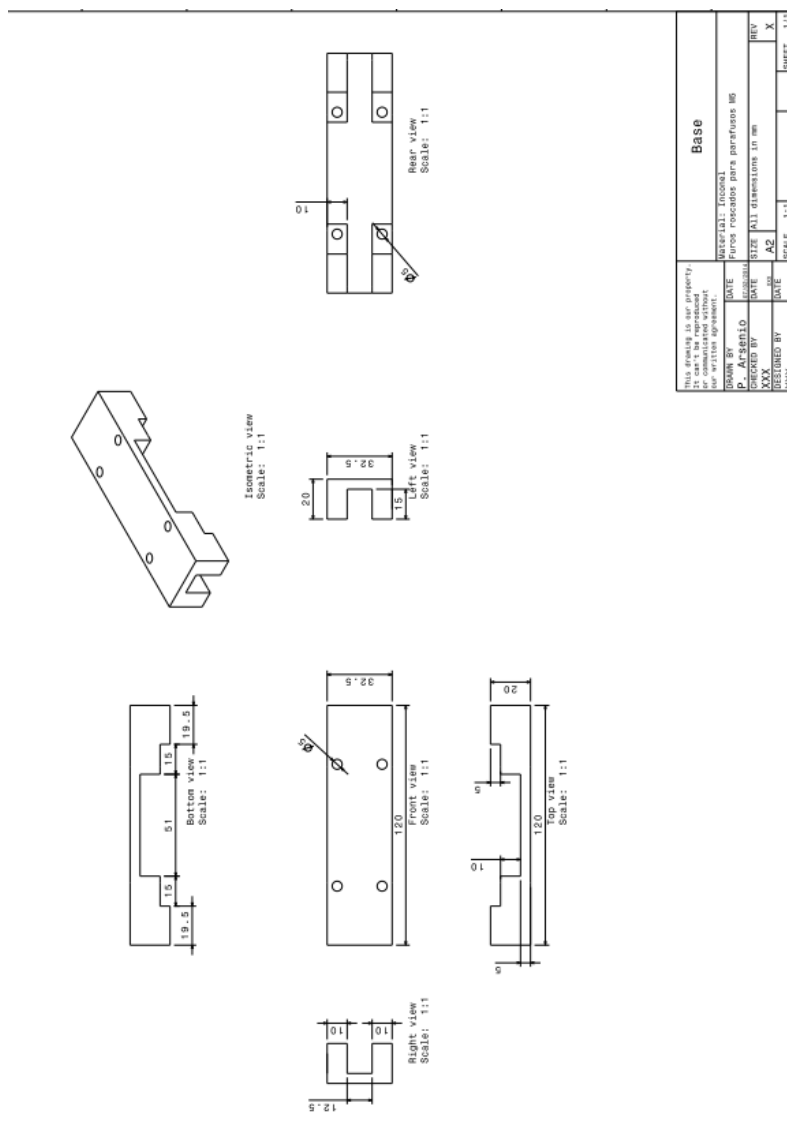
Bibliografia

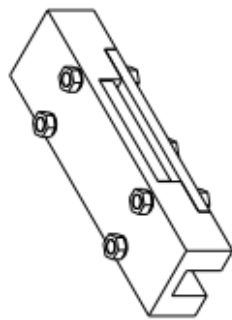
- Arsénio, P., 2012. *Desenvolvimento e Análise de um Limitador de Corrente Indutivo Baseado em Fita Supercondutora Bi-2223*.
- Arsénio, P. et al., 2016. Numerical Simulations of an Inductive Type Fault Current Limiter Based on Electromagnetic and Temperature Dependent Parameters Introduction Problem and Approaches Results and Discussion Conclusions. , pp.1–44.
- Arsénio, P., 2015. Research protocol. , 1, pp.1–10.
- Bagrets, N., Barth, C. & Weiss, K.-P., 2014. Low Temperature Thermal and Thermo-Mechanical Properties of Soft Solders for Superconducting Applications. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 24(3), pp.1–3.
- Baldan, C. a. et al., 2013. Electrical and Superconducting Properties in Lap Joints for YBCO Tapes. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, pp.1–4.
- Baldan, C. a. et al., 2009. Evaluation of Electrical Properties of Lap Joints for BSCCO and YBCO Tapes. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 19(3), pp.2831–2834.
- Chang, K.S. et al., 2008. Joint characteristics of YBCO coated conductor by removing a metallic stabilizer. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 18(2), pp.1220–1223.
- Fogelholm, R., Rapp, ?? & Grimvall, G., 1981. Electrical resistivity of indium: Deviation from linearity at high temperatures. *Physical Review B*, 23(8), pp.3845–3851.
- IEC, 2006. International Standard IEC 61788-3. , 2006.
- Jun Lu et al., 2010. Lap Joint Resistance of YBCO Coated Conductors. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 21(3), pp.3009–3012.
- Kalsi, S.S., 2011. *Applications of High Temperature Superconductors to Electric Power Equipment*,
- Kamerlingh Onnes, H., 1913. Investigations into the properties of substances at low temperatures , which have led , amongst other things , to the preparation of liquid helium. *Nobel Lecture*, pp.306–336.
- Kato, J.Y. et al., 2006. Diffusion joint of YBCO coated conductors using stabilizing silver layers. *Physica C: Superconductivity and its Applications*, 445-448(1-2), pp.686–688.
- Kato, J.Y. et al., 2006. Diffusion joint of YBCO coated conductors using stabilizing silver layers. *Physica C: Superconductivity and its Applications*, 445-448(1-2), pp.686–688.

- Kim, H.S. et al., 2009. Joint characteristics of the YBCO coated conductor (CC) by chemical etching. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 19(3), pp.2835–2838.
- Konstantopoulou, K. et al., 2015. Effect of the axial stress and the magnetic field on the critical current and the electric resistance of the joints between HTS coated conductors. *Superconductor Science and Technology*, 28(6), p.064001.
- Lee, H.G., 2007. Analysis of a Joint Method Between Superconducting YBCO Coated Conductors. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 17(2), pp.3266–3269.
- Melhem, Z., 2011. *High Temperature Superconductors (HTS) for Energy Applications*,
- Müller, K. A.; Bednorz, J.G., 1986. (1986) Bednorz - Mueller, Z Phys B (CM) 64, 189.pdf. *Zeitschrift für Physik B Condensed Matter*.
- Plakida, N., 2010. *High-Temperature Cuprate Superconductors: Experiment, Theory, and Applications*,
- Seidel, P., 2015. *Applied Superconductivity* P. Seidel, ed.,
- Sheahen, T., 2002. *Introduction to High-Temperature Superconductivity* T. Sheahen, ed., Kluwer Academic Publishers.
- Shiohara, Y. et al., 2013. Future prospects of high T_c superconductors-coated conductors and their applications. *Physica C: Superconductivity*, 484, pp.1–5.
- Super Power, 2011. *SuperPower® 2G HTS Wire Specifications*,
- Zhou, Y., 2008. *Microjoining and Nanojoining*,

Anexos

Anexo I. Geometria do Suporte de Junção de Fitas





Isometric view
Scale: 1:1



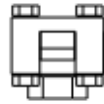
Bottom view
Scale: 1:1



Right view
Scale: 1:1



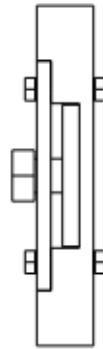
Front view
Scale: 1:1



Left view
Scale: 1:1



Rear view
Scale: 1:1

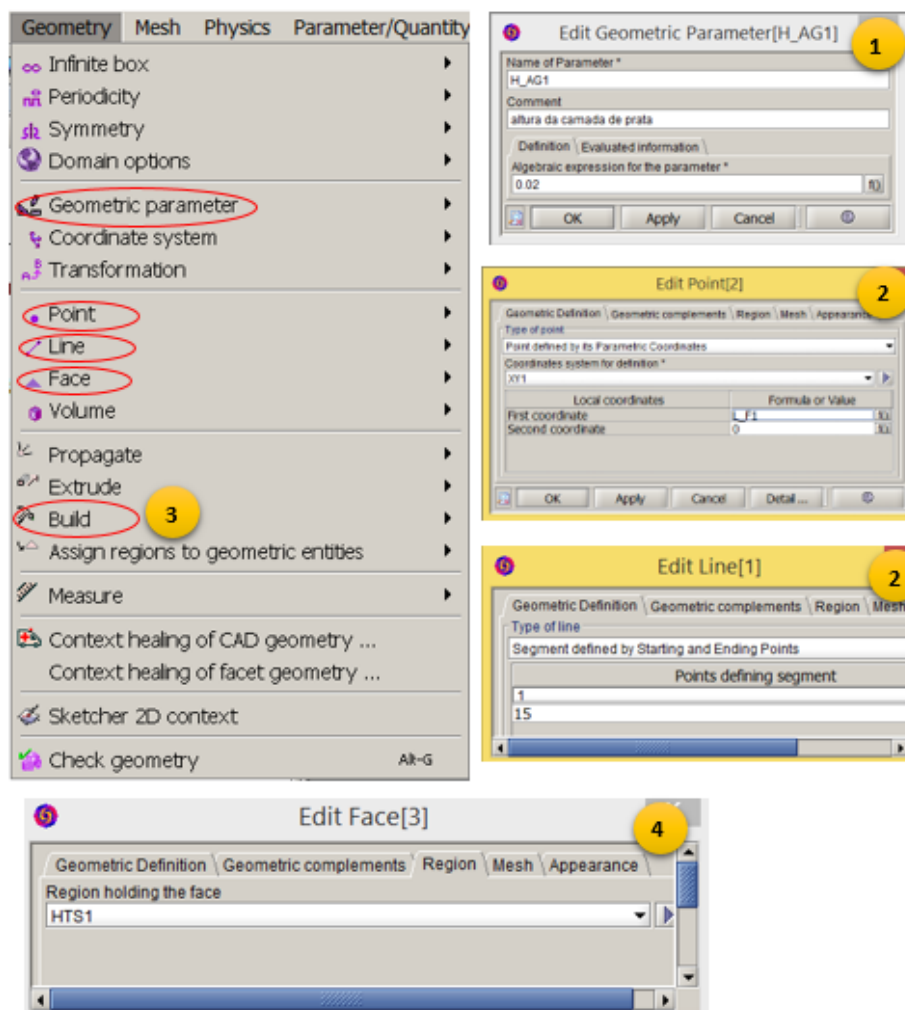


Top view
Scale: 1:1

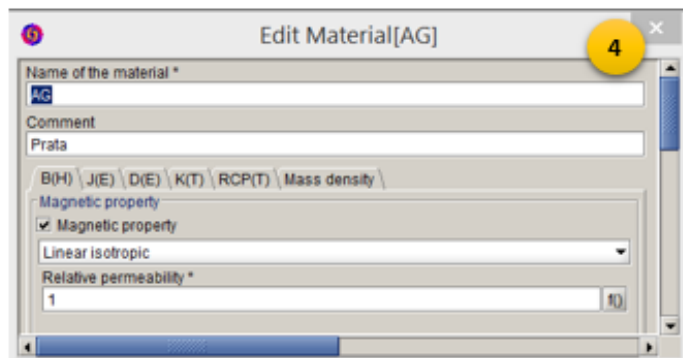
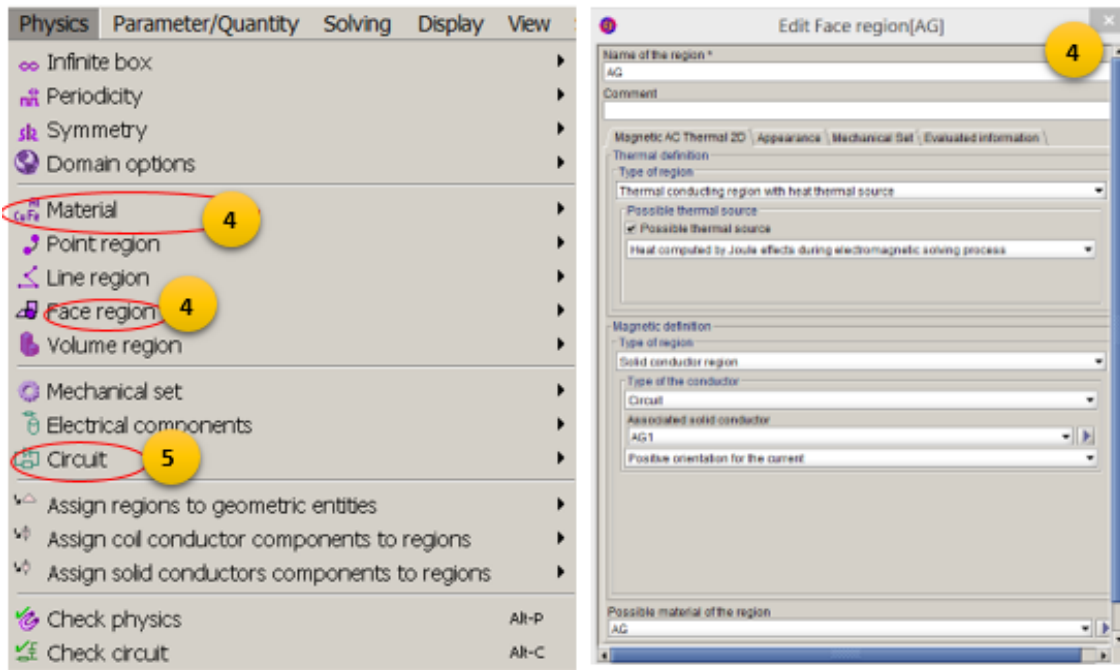
THIS DRAWING IS OUR PROPERTY. IT CAN'T BE REPRODUCED OR COMMUNICATED WITHOUT OUR WRITTEN AGREEMENT.		DRAWN BY P. Arsenio		DATE XXX	MATERIAL: Inconel	Assembly	
CHECKED BY XXX		DATE XXX	SIZE A2	ALL DIMENSIONS IN MM	REV X		
DESIGNED BY XXX		DATE XXX	SCALE 1:1	SHEET 1/1			

Anexo II. Configuração Flux2D

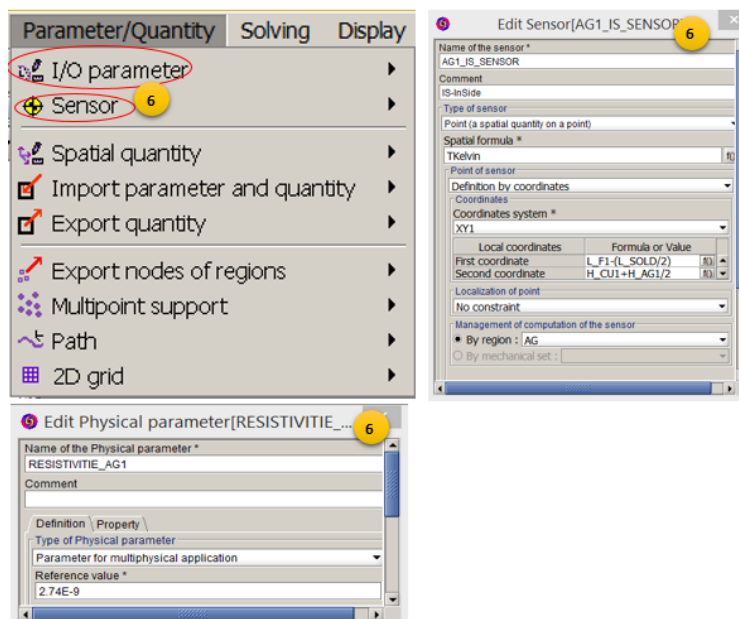
Anexo 2.1 – Geometry Tool

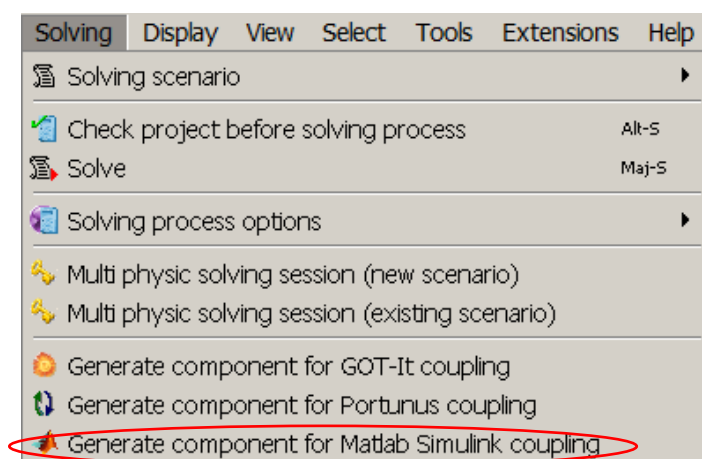


Anexo 2.2 - Physics Tool



Anexo 2.3 – Parameter/Quantity Tool



Anexo 2.4 – Solving Tool

Anexo III. Equações de *Fitting*

Anexo 3.1 – Resistividade

$$\text{Cobre} - \rho_{\text{cobre}}(T) = 6.85 \times 10^{-11} \cdot T - 3.30 \times 10^{-9} \text{ } [\Omega \cdot \text{m}]$$

$$\text{Prata} - \rho_{\text{prata}}(T) = 6.11 \times 10^{-11} \cdot T - 1.97 \times 10^{-9} \text{ } [\Omega \cdot \text{m}]$$

$$\text{Hastelloy} - \rho_{\text{hastelloy}}(T) = 1.17 \times 10^{-10} \cdot T + 1.25 \times 10^{-6} \text{ } [\Omega \cdot \text{m}]$$

$$\text{Indio} - \rho_{\text{indio}}(T) = 3.515 \times 10^{-5} \cdot T^2 + 0.02153 \cdot T - 0.1984 \text{ } [\Omega \cdot \text{m}]$$

$$\text{SAT} - \begin{cases} \rho_{\text{SAT},S}(J,T) = \frac{E_C}{J} \cdot \left(\frac{J}{J_C(T)} \right)^{n(T)} \\ \rho_{\text{SAT},N}(T) = 1.25 \times 10^{-7} \cdot T + 1.15 \times 10^{-5} \end{cases} \text{ } [\Omega \cdot \text{m}]$$

Anexo 3.2 – Condutividade Térmica

$$\text{Cobre} - \lambda_{\text{cobre}}(T) = 416.3 - 5.904 \times 10^{-2} \cdot T + \frac{7.087 \times 10^7}{T^3} \text{ } [\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$$

$$\text{Prata} - \lambda_{\text{prata}}(T) = 431.4 - 1.817 \times 10^{-2} \cdot T + \frac{1.708 \times 10^7}{T^3} \text{ } [\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$$

$$\text{Hastelloy} - \lambda_{\text{hastelloy}}(T) = 0.0238 \cdot T + 5.896 \text{ } [\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$$

$$\text{Indio} - \lambda_{\text{indio}}(T) = 416.3 - 5.904 \times 10^{-2} \cdot T + \frac{7.087 \times 10^7}{T^3} \text{ } [\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$$

$$\text{SAT} - \lambda_{\text{SAT}}(T) = 5 \text{ } [\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$$

Anexo 3.3 – Calor Específico

$$\text{Cobre} - C_{\text{cobre}}(T) = -9.463 \times 10^7 \cdot T^{-0.8292} + 4.279 \times 10^6 \text{ } [\text{J} \cdot \text{K}^{-1}]$$

$$\text{Prata} - C_{\text{prata}}(T) = -1.983 \times 10^8 \cdot T^{-1.23} + 2.643 \times 10^6 \text{ } [\text{J} \cdot \text{K}^{-1}]$$

$$\text{Hastelloy} - C_{\text{hastelloy}}(T) = 4.14 \times 10^6 + \frac{5.92 \times 10^5 - 4.14 \times 10^6}{1 + \left(\frac{T}{120.42} \right)^{2.39}} \text{ } [\text{J} \cdot \text{K}^{-1}]$$

$$\text{SAT} - C_{\text{SAT}}(T) = 4.05 \times 10^6 - 1.73 \times 10^8 \cdot T^{-0.9747} \text{ } [\text{J} \cdot \text{K}^{-1}]$$

Anexo IV. Ambiente Matlab

