



Universidade Federal de São Carlos (UFSCar)
Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia (CCET)
Departamento de Física (DF)

Isadora Balbino Cavassani

**Supercondutividade aplicada a dispositivos de
inserção: rota de fabricação de bobinas de Nb-Ti para
um Wavelength Shifter de 6,32 T**

Professor orientador: Prof. Dr. Fábio Aparecido Ferri

Co-orientador: Me. Eng. Rafael Molena Seraphim

São Carlos - SP, Brasil

Setembro de 2022

Isadora Balbino Cavassani

RA: 744650

Trabalho Final de Curso apresentado ao Departamento de Física da Universidade Federal de São Carlos como requisito parcial para obtenção do título de bacharela em Engenharia Física.

Orientador Externo (Co-orientador): Me. Eng. Rafael Molena Seraphim

Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais (CNPEM)

Área de Vácuo e Materiais (AVM)

São Carlos - SP, Brasil

Setembro de 2022

Cavassani, Isadora B.

Supercondutividade aplicada a dispositivos de inserção:
rota de fabricação de bobinas de Nb-Ti para um
Wavelength Shifter de 6,32 T / Isadora B. Cavassani --
2022.
36f.

TCC (Graduação) - Universidade Federal de São Carlos,
campus São Carlos, São Carlos

Orientador (a): Fábio Aparecido Ferri

Banca Examinadora: Rafael Molena Seraphim, Alan
Abdalad Vianna, Javier Fernando Ramos Caro

Bibliografia

1. Bobinas supercondutoras. 2. Supercondutividade
aplicada. 3. Dispositivos de inserção. I. Cavassani,
Isadora B.. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática
(SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Ronildo Santos Prado - CRB/8 7325

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, por nunca ter me abandonado. A coragem que Ele me deu para enfrentar as turbulências e a calma no coração para os momentos de angústia foi o que me deu forças para que eu pudesse viver todos os dias esse sonho.

Agradeço à minha família, meu pai José Roberto, minha mãe Vanda e minha irmã Isabella, por terem sido o meu porto seguro e terem acreditado em mim até mesmo nos momentos em que nem eu mesma acreditei. Se hoje estou chegando longe, é porque um dia eles me ensinaram a voar.

Agradeço aos meus colegas da turma 017 do curso de Engenharia Física, por terem compartilhado comigo essa trajetória árdua sempre com muita união. Guardo com carinho todas as tardes no saguão do Departamento de Física estudando juntos para as provas ou rindo das coisas mais simples da vida.

Agradeço à equipe feminina de volei de quadra da A.A.A. UFSCar por ter me proporcionado tantos momentos de leveza e felicidade durante a graduação.

Agradeço aos professores da UFSCar por terem compartilhado o conhecimento e me preparado para ser a profissional que sou hoje. Todo o esforço nas aulas e madrugadas estudando no fim valeram a pena.

Agradeço ao Grupo de Supercondutividade do CNPEM, por ter me dado a oportunidade de fazer parte dessa equipe maravilhosa e trabalhar nesse projeto com muita motivação.

Agradeço em especial ao meu supervisor de estágio e orientador, Rafael, por ter sido um excelente líder nessa trajetória. Sempre com muita paciência e profissionalismo, me guiou durante esses quase dois anos na direção correta, me abrindo várias portas.

Por fim, agradeço a mim mesma, por ter sido resiliente e nunca ter desistido frente às dificuldades. A dedicação me levou a lugares que nem eu mesma ousei em sonhar.

*If you can't find the sunshine, be the
Sunshine.*

Autor desconhecido

Sumário

1	Resumo	1
2	Introdução	2
3	Fundamentos teóricos	4
3.1	Supercondutividade	4
3.1.1	Efeito Meissner	5
3.1.2	Teoria BCS	6
3.1.3	Superfície crítica supercondutora	6
3.1.4	Supercondutores do Tipo I e Tipo II	7
3.1.5	Supercondutores aplicados a aceleradores	8
3.2	Liga Nb-Ti	8
3.3	Fio multifilamentar de Nb-Ti	9
4	Desenvolvimento do projeto	12
4.1	Wavelength Shifter Supercondutor de 6,32 T	12
4.1.1	Projeto Eletromagnético	13
4.1.2	Projeto Mecânico	13
4.1.3	Projeto Criogênico	14
4.1.4	Outros projetos	15
4.2	Definição dos parâmetros do fio e geometria da bobina	16
4.3	Rota de fabricação das bobinas	20
5	Prototipagem	25
5.1	Desenvolvimento do mandril e molde para impregnação	25
5.2	Primeiro protótipo - bobina de cobre	27
5.3	Discussões	30
6	Conclusões	34

Lista de Figuras

1	Representação do espectro das ondas eletromagnéticas e seus comprimentos de onda característicos. Fonte: [3]	2
2	Representação do gráfico de resistividade pela temperatura de Pt e Hg, resultado das experiências de Onnes em 1911. Fonte: [5]	4
3	Representação do efeito Meissner. À esquerda, o campo magnético penetra no material normal. À direita, as linhas de campo são expulsas do interior do material supercondutor. Fonte: [8]	5
4	Representação de um par de Cooper fluindo sem resistência pela rede do material. Fonte: [6]	6
5	Superfície crítica do Nb-Ti. Fonte: [9]	7
6	Representação da geometria de um fio supercondutor com vários filamentos de Nb-Ti alocados em uma matriz de cobre. Fonte: [13]	9
7	Micrografia óptica do fio multifilar de 361 filamentos fabricado por Jorge Otubo apresentada em sua dissertação de Mestrado em 1986. Fonte: [15]	10
8	Fio com 8900 filamentos de Nb-Ti em matriz de cobre do LHC. Fonte: [16]	10
9	Modelo esquemático do SWLS. Fonte: [19]	12
10	Configuração de instalação do SWLS em trecho reto do Sirius. Fonte: [19]	14
11	Modelo 2D esquemático do SWLS. Fonte: [19]	15
12	Representação da geometria das bobinas do SWLS: a) vista do conjunto das bobinas; b) meia simetria inferior; c) meia simetria longitudinal; e d) meia simetria transversal. Fonte: [19]	17
13	Distribuição de campo para o modelo eletromagnético do SWLS. Fonte: [19]	18
14	Gráfico de $J \times B$ contendo a curva crítica, a load line e a margem de operação para o modelo de fio supercondutor. Fonte: [19]	19
15	Gráfico do perfil de campo do modelo eletromagnético simulado em comparação com o modelo ideal. Fonte: [19]	19
16	Representação dos fios adjacentes e isolamento de fibra de vidro entre camadas e nas bordas para o modelo previsto. Fonte: adaptado de [19]	20
17	Representação da geometria e dimensões das bobinas centrais e laterais do modelo previsto. Fonte: adaptado de [19]	21
18	Representação do processo de bobinagem para as bobinas centrais do modelo: a) o mandril e o suporte cobertos com camada dupla de fibra de vidro; b) bobina sendo enrolada camada por camada com isolamento entre-camadas de fibra de vidro; c) 18 camadas enroladas com 60 espiras cada e cobertas com dupla isolamento de fibra de vidro. Fonte: adaptado de [19]	22

19	Representação das bobinas impregnadas à vácuo: a) conjunto da bobinagem inserido no molde de impregnação; b) resina epóxi impregna o conjunto; c) bobina impregnada. Fonte: adaptado de [19]	23
20	Representação do conjunto das bobinas, <i>yoke</i> e clamps do modelo. Fonte: adaptado de [19]	24
21	Representação dos clamps e fixações para o modelo. Fonte: adaptado de [19]	24
22	Representação do desenho técnico do conjunto para bobinagem: mandril, núcleo e suporte. Fonte: adaptado de [19]	25
23	Representação do desenho técnico do conjunto para impregnação à vácuo: vista superior e inferior. Fonte: adaptado de [19]	26
24	Representação do desenho técnico do conjunto para impregnação à vácuo, vistas em corte frontal e lateral e detalhes da saída do fio. Fonte: adaptado de [19]	26
25	Mandril de alumínio do primeiro protótipo: a) durante e b) após o processo de bobinagem da bobina de cobre. Fonte: Grupo de Supercondutividade do CNPEM.	27
26	Molde para impregnação: a) visão superior e b) visão inferior sem a tampa. Fonte: Grupo de Supercondutividade do CNPEM.	28
27	Setup de impregnação à vácuo do primeiro protótipo: a) parte superior e b) parte inferior. Fonte: Grupo de Supercondutividade do CNPEM.	29
28	Primeiro protótipo a) durante o desmolde e b) fora do molde . Fonte: Grupo de Supercondutividade do CNPEM.	30
29	Presença de rachaduras na superfície do primeiro protótipo da bobina. Fonte: Grupo de Supercondutividade do CNPEM.	31
30	Cortes da seção transversal da bobina e imagens das amostras obtidas com o microscópio óptico. Fonte: Grupo de Supercondutividade do CNPEM.	31
31	Desalinhamento dos fios na amostra #1 da seção transversal da bobina protótipo. Fonte: Grupo de Supercondutividade do CNPEM.	32
32	Vãos sem resina na amostra #3 da seção transversal da bobina protótipo. Fonte: Grupo de Supercondutividade do CNPEM.	32
33	Espaço com resina e posicionamento da fibra de vidro observados na amostra #2 da seção transversal da bobina protótipo. Fonte: Grupo de Supercondutividade do CNPEM.	33

1 Resumo

A demanda pela construção de uma linha de luz de tomografia de Raios-X de alta energia no acelerador síncrotron brasileiro, Sirius, exigiu o desenvolvimento do projeto de um ímã supercondutor com campo magnético superior a 6 T. Visando isso, houve o interesse da Divisão de Engenharia e Tecnologia do Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais (CNPEM) em iniciar pesquisas no ramo da Supercondutividade.

Nesse sentido, uma equipe multidisciplinar desenvolveu o projeto preliminar de um ímã supercondutor de três polos, um central e dois laterais, de 6,32 T de campo de pico, denominado Superconducting Wavelength Shifter (SWLS). A definição dos modelos do ímã se baseou em simulações buscando respeitar as premissas de projeto: operação em trecho reto, reaproveitamento do máximo de equipamentos de um ímã supercondutor desativado no CNPEM, campo magnético acima de 6 T, perfil de campo estreito na região do polo central ($\text{FWHM} \approx 30$), *gap* magnético de 7 mm e margem de operação acima de 20%.

O modelo eletromagnético do SWLS possui um conjunto composto por 6 bobinas supercondutoras de Nb-Ti. Definidos os parâmetros do fio supercondutor e a geometria do modelo, foi proposta uma rota de fabricação para as bobinas supercondutoras. Posteriormente, ela foi validada com o desenvolvimento de um protótipo de cobre. Este Trabalho Final de Curso apresenta conceitos importantes sobre supercondutividade aplicada a dispositivos de inserção, como o SWLS, e o desenvolvimento do projeto do ímã supercondutor para definição dos modelos e rota de fabricação das bobinas, bem como a prototipagem de uma bobina de cobre como forma de validação da rota.

Palavras-chave: Supercondutores. Bobinas supercondutoras. Supercondutividade aplicada. Dispositivos de inserção. Ímã de Nb-Ti.

2 Introdução

Quando partículas eletricamente carregadas são aceleradas ou desaceleradas, são produzidas ondas eletromagnéticas com diferentes frequências. Além da luz visível, ou seja, a luz que é refletida pelos objetos e captada por nossos cérebros dando origem às cores, o espectro das ondas eletromagnéticas envolve também as luzes que não são visíveis para os seres humanos, os raios gama, raios-X, radiação ultravioleta, a luz infravermelha, as micro-ondas e as ondas de rádio. Cada tipo de onda eletromagnética é definida através de seu intervalo de comprimento de onda característico conforme observamos na [Figura 1](#). Por exemplo, a luz visível é composta pela estreita faixa do espectro das ondas eletromagnéticas que possuem comprimentos de onda variando de 400 a 700 nanômetros. [\[1\]](#), [\[2\]](#)

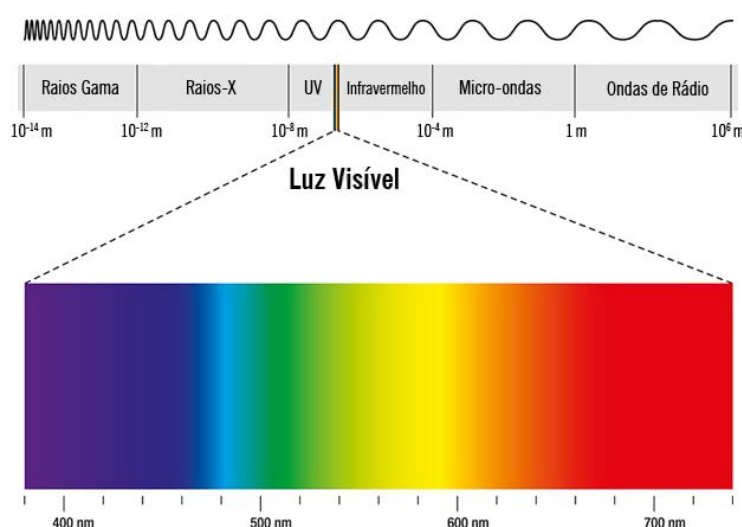


Figura 1: Representação do espectro das ondas eletromagnéticas e seus comprimentos de onda característicos. Fonte: [\[3\]](#)

O entendimento dos fenômenos que produzem ondas eletromagnéticas nos permite desenvolver tecnologias que recebem e transmitem informações através das ondas, como por exemplo, as redes Wi-Fi que utilizam ondas de rádio, equipamentos eletrodomésticos que utilizam micro-ondas para aquecer alimentos, radiografias e tomografias que utilizam raios-X para produzir imagens médicas detalhadas, entre outros. Além disso, assim como o nosso cérebro utiliza a luz visível para enxergar e identificar propriedades macroscópicas dos objetos, como formas e cores, podemos utilizar as outras ondas eletromagnéticas para investigar as propriedades microscópicas dos materiais, como sua composição atômica e sua estrutura eletrônica. [\[1\]](#)

Quando partículas carregadas são aceleradas próximas à velocidade da luz e são desviadas de sua trajetória pela influência de campos magnéticos, é produzido um tipo de radiação de alto brilho e fluxo que possui comprimentos de onda variando desde os raios-X até a luz infravermelha. Essa radiação é chamada de luz síncrotron e é extremamente importante para a

comunidade científica, pois ela é capaz de penetrar em amostras de matéria e revelar características microscópicas com grande precisão e detalhamento em curtos espaços de tempo. [2]

As fontes de luz síncrotron são compostas por diversos equipamentos de alta tecnologia. O feixe de elétrons é produzido por um canhão de elétrons e injetado no acelerador linear, onde as partículas são aceleradas. Quando atingem uma velocidade próxima à da luz, elas são conduzidas por meio de uma linha de eletroímãs ao acelerador injetor, onde os elétrons são acelerados por cavidades de radiofrequência e a energia é aumentada. Então, elas são injetadas no anel de armazenamento e passam pelos dispositivos de inserção que alteram a trajetória das partículas, resultando na criação de um feixe de luz síncrotron. A luz síncrotron é emitida e guiada para as linhas de luz instaladas ao redor do anel, que são as estações experimentais. [4]

No acelerador injetor e no anel de armazenamento, os elétrons são mantidos em órbitas circulares por um conjunto de ímãs, denominado rede magnética. A rede magnética é uma combinação cuidadosamente projetada de ímãs dipolos, responsável pela deflexão da trajetória dos elétrons; ímãs quadrupolos, responsáveis pela focalização do feixe; e ímãs sextupolos, responsáveis por corrigir defeitos monocromáticos. [4]

Portanto, os ímãs constituem uma parte importante da estrutura do acelerador síncrotron e garantem que a trajetória das partículas seja alterada, gerando a luz síncrotron. A utilização de fios supercondutores nos enrolamentos das bobinas dos ímãs em dispositivos de inserção é capaz de produzir radiação síncrotron com fluxos e energias ainda maiores do que os ímãs comuns, sendo de enorme interesse para a comunidade científica.

Dessa forma, visto que existe uma demanda de construção de uma linha de luz de tomografia de Raios-X de alta energia no Sirius, fonte de luz síncrotron do Laboratório Nacional de Luz Síncrotron do CNPEM, foi preciso desenvolver um projeto conceitual de um ímã supercondutor que respeitasse as exigências da máquina.

Este trabalho apresenta uma rota de fabricação de bobinas de Nb-Ti para um Wavelength Shifter de 6,32 T, proposta do projeto conceitual do ímã supercondutor a ser utilizado como dispositivo de inserção da linha de tomografia de Raios-X. No capítulo 3, são apresentados os fundamentos teóricos sobre supercondutividade, o supercondutor Nb-Ti e fios multifilamentares de Nb-Ti necessários para entender conceitos importantes para o desenvolvimento do projeto. No capítulo 4, é apresentado o desenvolvimento do projeto do Superconducting Wavelength Shifter, bem como os modelos desenvolvidos nos projetos eletromagnético, mecânico e criogênico. Além disso, é apresentado como foi definido o fio a ser utilizado e a geometria do conjunto de bobinas do ímã, bem como a rota de fabricação das bobinas desse modelo. No capítulo 5, é apresentada a prototipagem de uma bobina de cobre com as mesmas características do modelo eletromagnético, feita utilizando a proposta de fabricação, e as discussões levantadas para melhorias dos próximos protótipos. Por fim, no capítulo 6 são levantadas as conclusões desse projeto.

3 Fundamentos teóricos

3.1 Supercondutividade

Em 1911, conhecia-se a propriedade de alguns materiais de conduzir cargas elétricas ao longo de sua rede de átomos, a condutividade, e a oposição a esse movimento, a resistividade. Sabia-se que, assim como a maioria das propriedades físicas dos materiais, a resistividade variava com a temperatura em uma relação praticamente linear. Como ela diminuía com a redução da temperatura, acreditava-se que em temperaturas muito baixas, próximas do zero absoluto, a resistividade poderia tender a zero. [5]

A supercondutividade foi observada pela primeira vez em 1911 quando Heike Onnes, da Universidade de Leiden, trabalhava em seu laboratório de baixas temperaturas com mercúrio e platina, resfriando-os com hélio líquido. Ao resfriar a platina, sua resistividade diminuiu até atingir um valor residual. Porém, ao resfriar o mercúrio, sua resistividade sofreu uma descontinuidade e decaiu para próxima de zero ao atingir uma temperatura próxima de 4 K, conforme mostra a representação da [Figura 2](#). Além disso, Onnes percebeu que, abaixo de 4,2 K, a corrente transportada podia persistir por tempo indefinido, e que, somente ao expor a amostra de mercúrio a um campo magnético forte o suficiente, maior que um campo magnético crítico ($B > B_c$), o material voltava ao seu estado normal. [5, 6]

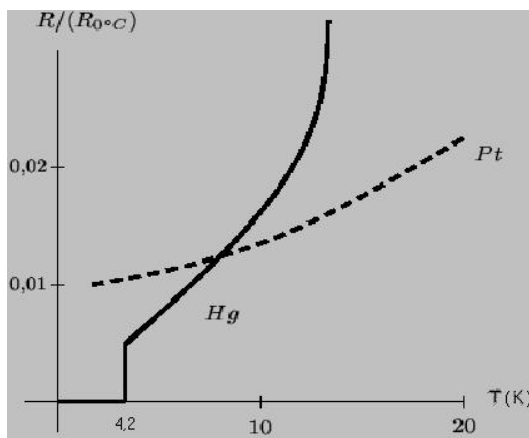


Figura 2: Representação do gráfico de resistividade pela temperatura de Pt e Hg, resultado das experiências de Onnes em 1911. Fonte: [5]

Definiu-se, então, os supercondutores como sendo os materiais que perdem a resistência à corrente elétrica quando estão abaixo de uma temperatura crítica denominada T_c . A partir dessa descoberta inicial, a supercondutividade passou a ser testada em diversos materiais, em geral metais, e vários supercondutores novos foram descobertos. [6]

Em 1933, o fenômeno do efeito Meissner foi descoberto por Meissner e Ochsenfeld quando analisavam a distribuição das linhas de campo magnético dos materiais quando submetidos a campos magnéticos suficientemente pequenos abaixo da temperatura crítica. Eles observaram

que uma corrente é induzida e cria um campo interno contrário ao campo aplicado, ou seja, os supercondutores repelem o campo magnético de forma que o campo em seu interior é zero. [5]

Em 1957, a supercondutividade a baixas temperaturas foi descrita pela teoria BCS, teoria que leva as iniciais de John Bardeen, Leon Cooper e John Schrieffer. Essa teoria se baseia na suposição de que a corrente se forma não através de elétrons individuais, mas de pares de elétrons com momento e spins contrários que ocupam um estado quântico único, os chamados pares de Cooper. [5]

Em 1986, Alex Mueller e Georg Bednorz descobriram o primeiro material supercondutor de altas temperaturas, um composto de óxido de cobre com bário e lantânio. Essa descoberta foi um fato surpreendente, visto que o composto é um material do tipo cerâmica, até então considerado isolante e um péssimo condutor de eletricidade.

Desde então, vários outros supercondutores foram descobertos e eles passaram a ser divididos em dois tipos de acordo com suas propriedades supercondutoras na presença de um campo aplicado: Supercondutores do Tipo I e supercondutores do Tipo II. [5]

3.1.1 Efeito Meissner

Sabe-se que quando um material normal é submetido a um campo magnético, este penetra no corpo. Porém, foi constatado que os materiais no estado supercondutor agem como diamagnetos perfeitos, ou seja, em campos suficientemente pequenos eles repelem as linhas de campo, mantendo um campo magnético interno nulo, conforme mostra o esquema da [Figura 3](#). [7]

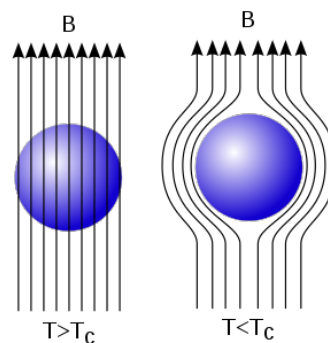


Figura 3: Representação do efeito Meissner. À esquerda, o campo magnético penetra no material normal. À direita, as linhas de campo são expulsas do interior do material supercondutor. Fonte: [8]

Esse efeito acontece porque uma corrente de blindagem é induzida na superfície do material, criando um campo interno contrário ao campo aplicado com uma direção e intensidade suficientes para anular as linhas de campo que penetram o material.

3.1.2 Teoria BCS

Os pares de Cooper são elétrons que ocupam um estado quântico único e que se associam em pares enquanto se deslocam em um material com o auxílio de fônons, que são oscilações mecânicas que se propagam pela rede cristalina de um sólido. Essa agitação mecânica causa uma concentração de carga positiva no local de propagação, atraindo outro elétron que forma um par de Cooper, como mostra a [Figura 4](#). A teoria BCS é baseada na assunção de que a corrente dos supercondutores se forma não através de elétrons individuais, mas de pares de Cooper.

Em altas temperaturas, os pares de Cooper se quebram devido a alta agitação, porém, em baixas temperaturas eles formam um condensado que flui sem resistência pelo material e atua expulsando campos magnéticos externos fracos, ocasionando o efeito Meissner e explicando a supercondutividade em baixas temperaturas. [\[5, 6\]](#)

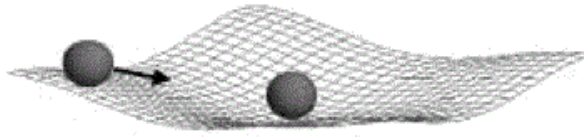


Figura 4: Representação de um par de Cooper fluindo sem resistência pela rede do material. Fonte: [\[6\]](#)

3.1.3 Superfície crítica supercondutora

As propriedades dos supercondutores definem três parâmetros críticos que influenciam na sua transição do estado normal para o supercondutor e vice-versa: a temperatura, o campo aplicado e densidade de corrente.

O *quench* é o processo em que o material transiciona de seu estado supercondutor para o estado normal. Isso ocorre quando os limites da superfície crítica supercondutora são atingidos espontaneamente. Esse processo gera excesso de energia e superaquecimento, que se não for controlado rapidamente pode danificar o equipamento.

A temperatura foi a primeira propriedade descoberta, em que ela precisa ser mantida abaixo de um valor denominado temperatura crítica ($T < T_c$) para que o material se mantenha no estado supercondutor. O segundo parâmetro é o campo magnético aplicado, que também precisa ser baixo o suficiente ($H < H_c$) para que não desestabilize a supercondutividade, o que pode ser explicado pela observação de que a supercondutividade e a magnetização são mutuamente excludentes. Já o terceiro parâmetro é o valor crítico de densidade de corrente (J_c), acima do qual ocorre dissipação de energia e aquecimento do supercondutor. A densidade de corrente crítica também está associada ao próprio campo magnético induzido na superfície do material. [\[9, 11\]](#)

Dessa forma, o estado supercondutor de um material está delimitado por uma superfície tridimensional definida por T_c , H_c e J_c , a superfície crítica. O esquema da [Figura 5](#) representa

a superfície crítica do Nb-Ti.

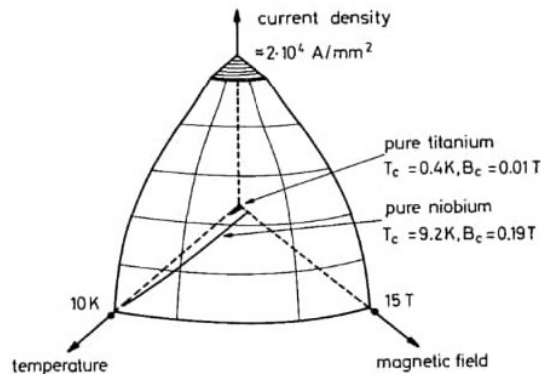


Figura 5: Superfície crítica do Nb-Ti. Fonte: [9]

3.1.4 Supercondutores do Tipo I e Tipo II

O grupo de supercondutores do Tipo I é, em geral, formado pelos metais e algumas ligas metálicas que já são condutores à temperatura ambiente. Na maioria das vezes, possuem uma T_c crítica baixa e sua supercondutividade pode ser explicada pela teoria BCS, visto que a temperatura baixa diminui as vibrações dos átomos do cristal e permite o fluxo de elétrons sem dificuldade através do material. Dentro desse grupo de supercondutores estão os primeiros supercondutores descobertos, o mercúrio, chumbo e estanho, e outros exemplos descobertos mais tarde são o alumínio, titânio, zinco, entre outros. Neles, a transição para o estado supercondutor se dá de maneira abrupta e é acompanhada do efeito Meissner, em que quando exposto a um campo magnético aplicado baixo o suficiente ($B < B_c$), o campo é nulo no interior do material. [6, 11]

Já o grupo de supercondutores do Tipo II é, em geral, formado por ligas metálicas e outros compostos, como por exemplo o Nb-Ti, Nb_3Sn , MgB_2 , entre outros. Em geral, possuem temperaturas críticas associadas mais altas que as do Tipo I, e para esses materiais cujas temperaturas críticas associadas são altas, como por exemplo as cerâmicas, a teoria BCS não se aplica e estudos ainda estão sendo conduzidos para explicar o mecanismo que leva a supercondutividade nesses casos. No entanto, a característica mais marcante dos supercondutores do Tipo II é a transição gradual do estado supercondutor para o estado normal, com a presença de um estado intermediário. Ou seja, esse tipo de material apresenta dois campos críticos, o primeiro (B_{c1}) define o limite para a exclusão total das linhas de campo em seu interior, e o segundo (B_{c2}) define a transição para o estado normal. Entre B_{c1} e B_{c2} o supercondutor se mantém no estado misto, onde o material permite a penetração de algum campo magnético (região normal) cercada pela região supercondutora, os chamados vórtices. O estado misto se mantém até que os núcleos se sobrepõem e o estado supercondutor é perdido. [6, 12]

3.1.5 Supercondutores aplicados a aceleradores

Todas as propriedades dos supercondutores devem ser levadas em consideração ao escolher um material para uma aplicação específica, procurando-se maximizar os parâmetros da superfície crítica. Em contrapartida, ao avaliar sua utilização em aplicações tecnológicas, as propriedades mecânicas, metalurgia, maleabilidade e custo também devem ser considerados. Dessa forma, é preciso combinar esses fatores para encontrar os materiais que melhor se adequam a aplicação desejada. [8, 11]

Nb, Nb-Ti, Nb₃Sn, BISCCO-2212 e YBCO são materiais que se destacam pela combinação dos fatores descritos acima. No entanto, os supercondutores Nb-Ti e Nb₃Sn geralmente são escolhidos como materiais para fabricar enrolamentos de bobinas para ímãs supercondutores por conta de suportarem altos campos magnéticos, possuírem temperaturas críticas que podem ser atingidas com a utilização de líquidos criogênicos, possuírem fortes forças de aprisionamento de vórtices garantindo uma alta densidade de corrente crítica, e serem comercialmente disponíveis em larga escala. [9, 11, 13]

Apesar de possuir um campo crítico superior menor que o do Nb₃Sn ($T_c = 14$ K, $B_{c2} (4,2$ K) = 20 T), que é quebradiço, o Nb-Ti ($T_c = 10$ K, $B_{c2} (4,2$ K) = 14 T) é dúctil, o que é positivo do ponto de vista de fabricação. Dessa forma, sua ductibilidade permitiu que métodos simples e efetivos fossem desenvolvidos para a fabricação em larga escala de fios e cabos multifilamentares para aplicação em aceleradores de partículas. [9, 11, 13]

3.2 Liga Nb-Ti

O nióbio é encontrado na natureza na forma de sais complexos, como Columbita, Pirocloro e Samarskita, e é muito utilizado na indústria siderúrgica e na obtenção de compostos supercondutores. O processo de obtenção do metal varia conforme a sua origem, porém, uma das formas é extrair da natureza o óxido de nióbio e reduzir a metal através da técnica de aluminotermia, em que se mistura o óxido com alumínio pulverizado, se faz uma combustão e o resultado fornece óxido de alumínio e o metal nióbio puro [14]. Para garantir a pureza do metal, a amostra deve passar por várias fusões à vácuo, por exemplo, por feixe de elétrons.

A fusão à vácuo por feixe de elétrons é um método que utiliza um equipamento composto por um forno com uma fonte de potência, um sistema de vácuo, um sistema de refrigeração, um sistema de supervisão e uma câmara de fusão. A matéria-prima é colocada no forno sob vácuo e é fundida quando é incidida por um feixe de elétrons. [14]

Já o titânio é encontrado na natureza em forma de minérios, como a Ilmenita, Rutilo e Titanomagnetita, e é muito utilizado nas indústrias naval, química e aeronáutica. O processo de obtenção do metal também varia conforme a sua origem e o objetivo do produto final. O titânio é encontrado no mercado em forma de esponja metálica e é possível passá-la por fusões a vácuo por feixe de elétrons para formar lingotes de titânio puro. [14]

A liga Nióbio-Titânio (Nb-Ti) é uma liga dúctil e facilmente trabalhada a frio, o que

garante propriedades desejáveis para matéria-prima de ímãs supercondutores. Ela também pode ser obtida pelo método de fusão à vácuo por feixe de elétrons utilizando os metais puros descritos anteriormente após passar por vários processos metalúrgicos. As amostras de nióbio são serradas em chapas e laminadas e são utilizadas para embrulhar as amostras de titânio após serem aplainadas. Esse conjunto passa por diversos passos de fusão à vácuo por feixe de elétrons resultando em lingotes de Nb-Ti com alta pureza. Estudos apontam que a liga é otimizada quando apresenta composição de 40 a 60% em peso atômico de titânio. [14]

3.3 Fio multifilamentar de Nb-Ti

Os parâmetros críticos de um fio supercondutor são determinados pela composição química, no caso da temperatura e campo críticos, e pela microestrutura definida pelo processo de fabricação, no caso da densidade de corrente crítica. Dessa forma, estudos foram efetuados para determinar o processo de fabricação que maximiza as propriedades do material supercondutor. Na supercondutividade, os fios multifilamentares são importantes para garantir a passagem de altas correntes sem danificar o equipamento.

O processo de fabricação mais comum de fios multifilamentares de Nb-Ti consiste em agrupar um grande número de filamentos finos, de até $100\ \mu\text{m}$, e alocá-los em uma matriz de cobre, de seção transversal circular, conforme mostra a [Figura 6](#). A confecção dividida em vários filamentos finos aumenta as forças de aprisionamento e auxilia na estabilidade do fio. Já a matriz de cobre, por ser um material fortemente condutor, oferece um caminho para o excesso de corrente e dissipação de calor caso o estado supercondutor seja perdido, além de fornecer estabilidade mecânica para o sistema. [13, 9, 11]

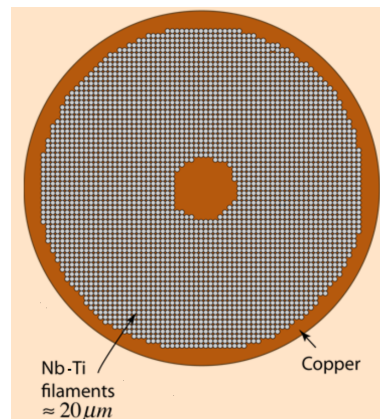


Figura 6: Representação da geometria de um fio supercondutor com vários filamentos de Nb-Ti alocados em uma matriz de cobre. Fonte: [13]

Para se obter um fio multifilamentar, a liga Nb-Ti passa por diversos processos termomecânicos para formar monofilamentos e depois agrupá-los, sem danificar as características e propriedades dos materiais. Por exemplo, no trabalho de Jorge Otubo [14], as amostras de Nb-Ti

são aplainadas e trefiladas e passam por tratamento térmico. Então, cada amostra é embutida em um tubo de cobre e o conjunto é trefilado e passado por tratamento térmico novamente, formando monofilamentos de Nb-Ti envolvidos em cobre. Depois, esses monofilamentos são cortados, agrupados, embutidos novamente em tubo de cobre e passam por deformação e tratamento térmico, formando um fio multifilamentar. Esse processo é repetido até que se obtenha o número desejado de filamentos no fio. [14, 15]

Na [Figura 7](#), é possível observar um exemplo de um fio multifilamentar de 361 filamentos de Nb-Ti, fabricado em um laboratório do Instituto de Física da USP através do método descrito acima. [15]

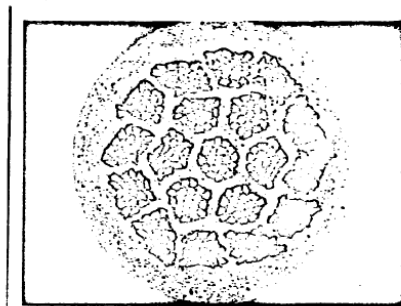


Figura 7: Micrografia óptica do fio multifilamentar de 361 filamentos fabricado por Jorge Otubo apresentada em sua dissertação de Mestrado em 1986. Fonte: [15]

Na [Figura 8](#), para comparação, é possível observar o fio multifilamentar com 8900 filamentos de Nb-Ti em matriz de cobre utilizado no acelerador *Large Hadron Collider* (LHC) da Organização Europeia para a Pesquisa Nuclear (CERN) como enrolamentos das bobinas dos ímãs supercondutores.

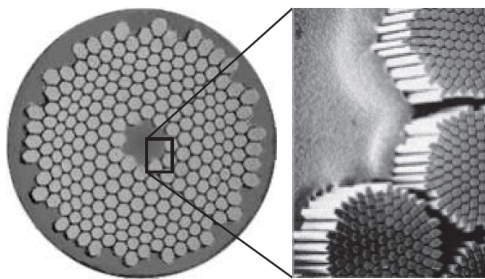


Figura 8: Fio com 8900 filamentos de Nb-Ti em matriz de cobre do LHC. Fonte: [16]

Para se utilizar um fio multifilamentar de Nb-Ti em alguma aplicação, é preciso definir quais serão os parâmetros do fio, como o seu diâmetro, o número de filamentos, o diâmetro dos filamentos, a razão cobre-supercondutor, o passo de torção, o revestimento e o isolamento. Esses parâmetros são decididos com base em estudos de estabilização de fios supercondutores e relatórios de operação de fios existentes e validados através de simulações. [17, 18, 16]

Em condições operacionais otimizadas de aceleradores síncrotrons, o diâmetro do fio normalmente é escolhido em cerca de 0,85 mm. O diâmetro dos filamentos, geralmente abaixo de 50 μm , é escolhido de forma que seja pequeno o suficiente para reduzir a passagem e distorção de campo entre filamentos, mas mantendo o custo de processamento baixo e passando a quantidade de corrente necessária para a operação. O número de filamentos é escolhido de acordo com o diâmetro dos filamentos e a densidade de corrente crítica que se deseja atingir. [17, 18, 16]

A matriz de cobre, inserida durante o processo de fabricação do fio multifilamentar, serve para proteger o material de perder sua característica supercondutora. A razão entre a área de Cu e de Nb-Ti no fio (razão Cu:Nb-Ti) é escolhida de forma a garantir a proteção do material. Outra forma de evitar a formação de fluxos internos de campo e proteger o supercondutor é torcer os fios. Nos cabos de Rutherford, o passo de torção geralmente é escolhido na ordem de 20 a 30 vezes o diâmetro do fio. [17, 18, 16]

Para bobinas de grande porte ou altos campos, somente a matriz de cobre pode não ser suficiente para proteger o supercondutor então, os fios são isolados com camadas de polímeros, como fitas de Kapton, para evitar que os fios fiquem em contato uns com os outros diretamente. [17, 18, 16]

4 Desenvolvimento do projeto

4.1 Wavelength Shifter Supercondutor de 6,32 T

O Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais (CNPEM), possui no Laboratório Nacional de Luz Síncrotron uma fonte de luz síncrotron de 4ª geração em comissionamento chamada Sirius. Atualmente, a produção do fluxo de fótons no acelerador se dá através de dipolos convencionais e dispositivos de inserção de campo limitado em 3,2 T .

De acordo com a demanda pela construção de uma linha de luz de tomografia de Raios-X de alta energia (>150 keV) que exige o desenvolvimento de um ímã supercondutor com campo magnético superior a 6 T, a Divisão de Engenharia e Tecnologia do CNPEM, em parceria com o CERN, iniciou a premissa de projeto de um Superconducting Wavelength Shifter. O projeto se baseia em um ímã supercondutor com uma bobina central e duas bobinas laterais porposto para operar em um trecho reto sem alterar as características do feixe de elétrons da máquina.

Além disso, a antiga fonte de luz do CNPEM, o UVX, foi desativada e nela operava um ímã supercondutor de 4 T, o Wiggler Supercondutor (SCW). Nesse contexto, a fim de seguir o design parecido com o de outros laboratórios, como o CERN, e reduzir os custos do projeto, o WLS está sendo desenvolvido de modo que se reaproveite o máximo de equipamentos e componentes possíveis do SCW. O modelo esquemático do WLS pode ser observado na [Figura 9](#)

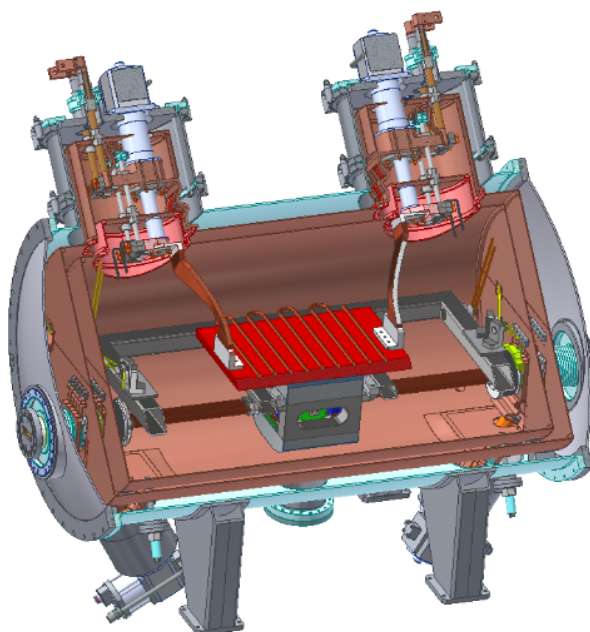


Figura 9: Modelo esquemático do SWLS. Fonte: [\[19\]](#)

Ao longo do desenvolvimento do projeto, foi necessário o esforço conjunto de uma equipe

multidisciplinar envolvendo várias áreas e grupos do CNPEM para garantir que as demandas ópticas da máquina fossem respeitadas sob condições térmicas e mecânicas extremas. Dessa forma, várias discussões foram promovidas para se desenvolver o projeto conceitual do SWLS e foram realizadas diversas simulações magnéticas, mecânicas e térmicas para avaliar se as propriedades dos modelos satisfaziam as condições desejadas para o dispositivo, como campo magnético acima de 6 T, largura de meia altura do campo adequada, integridade estrutural do modelo, temperatura baixa o suficiente para o funcionamento do fio supercondutor de Nb-Ti, entre outros.

4.1.1 Projeto Eletromagnético

O projeto eletromagnético é um dos mais importantes para o dispositivo, pois é ele que define os parâmetros essenciais para seguir as exigências ópticas da máquina. A proposta para o SWLS é que o dispositivo opere em um trecho reto com campo magnético acima de 6 T, perfil de campo estreito na região do polo central (FWHM ≈ 30), campo integrado nulo fornecido pelos polos laterais, *gap* magnético mínimo de 7 mm e margem de operação acima de 20%.

Para a criação do design eletromagnético, o Grupo de Ímãs do CNPEM realizou simulações magnéticas com diversos modelos variando as características do fio supercondutor, número de espiras e camadas da bobina, corrente aplicada, material dos polos, dimensão e geometria das bobinas para avaliar qual apresentava o melhor desempenho quanto às premissas do projeto.

4.1.2 Projeto Mecânico

O projeto mecânico se baseou na reutilização do máximo de componentes possível do SCW, sendo eles: os *cryocoolers*, responsáveis pela resfriamento criogênico; a câmara de vácuo externa, responsável por garantir que o criostato seja colocado e se mantenha em vácuo; os escudos térmicos operando em 20 K e 60 K ligados aos *cryocoolers*, que atuam como bloqueadores de radiação; e a câmara de vácuo do feixe de elétrons, responsável por manter a região do feixe em ultra-alto vácuo. A massa fria, composta pelas bobinas supercondutoras, polos, *yoke*, suportes, entre outros componentes mantidos em temperaturas criogênicas, será substituída pelo novo modelo proposto pelo Projeto Criogênico.

Por ser um dispositivo de inserção, o SWLS precisa operar em um trecho reto da máquina. Dessa forma, sua instalação exige a presença de outros componentes, sendo eles válvulas de setor, *bellows*, bombas iônicas, câmaras revestidas com filme NEG, e sensores *Beam Positioning Monitors* (BPMs). A configuração de instalação prevista para o SLWS pode ser observada na [Figura 10](#), bem como o espaço disponível de 1782 mm para o dispositivo.

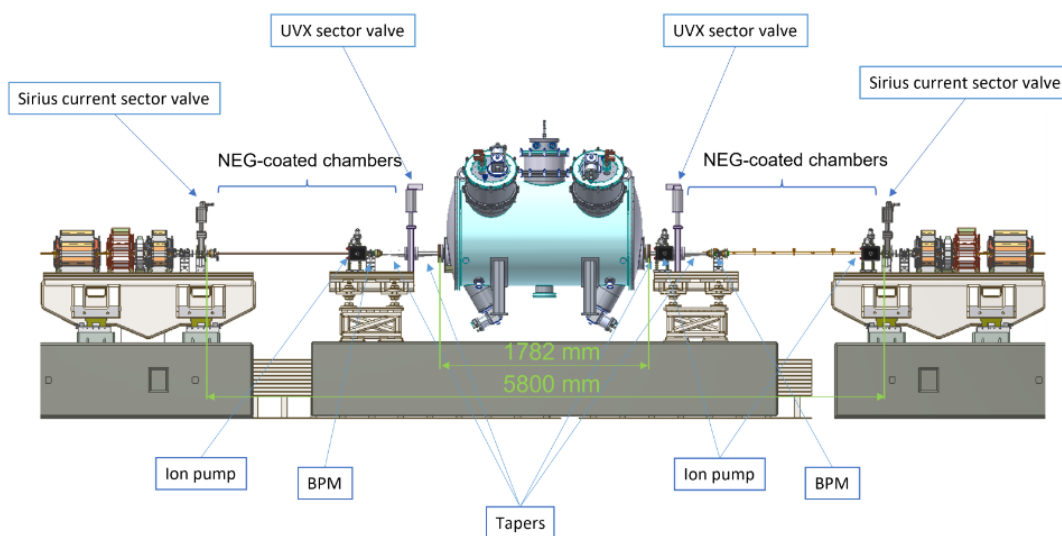


Figura 10: Configuração de instalação do SWLS em trecho reto do Sirius. Fonte: [19]

4.1.3 Projeto Criogênico

O projeto criogênico é responsável por garantir que a temperatura de operação do dispositivo seja mantida abaixo da temperatura de operação das bobinas (5 K), ou seja, abaixo da temperatura crítica do material supercondutor utilizado, fornecendo uma margem de operação. Nesse contexto, simulações térmicas foram realizadas para avaliar o fluxo de calor transferido por condução, convecção e radiação de vários modelos criogênicos e seus impactos na temperatura de operação.

O modelo proposto se baseia em um conceito “seco”, em que a operação é mantida somente através da condução de calor entre as bobinas e os resfriadores criogênicos. Esse modelo é capaz de manter a temperatura das bobinas em torno de 4,15 K, oferecendo uma margem maior de segurança durante a operação. Porém, visto que ele possui baixa potência de extração de calor, oferece complicações no processo de *cool-down* e situações de *quench* do supercondutor. Então, foi adicionada uma massa de cobre, denominada *cold bus*, com canais de refrigeração por nitrogênio líquido para auxiliar no processo de resfriamento inicial.

A Figura 11 mostra o modelo esquemático do SWLS e é possível observar a disposição dos componentes. O criostato externo é mantido em vácuo através de bombas iônicas e possui um formato cilíndrico reaproveitado do SCW. Quatro *cryocoolers* fazem parte do sistema, cujos primeiros estágios são conectados ao escudo térmico externo para manter a temperatura de 60 K. O segundo estágio dos dois *cryocoolers* inferiores são conectados ao escudo térmico interno para manter a temperatura de 20 K e à câmara de vácuo do canal de elétrons. O escudo de 60 K é coberto com 30 camadas de *Multilayer Insulation* (MLI) para auxiliar no bloqueio de radiação e ambos os escudos são suspensos e separados entre si por esferas de fibra de vidro. *Links* térmicos de cobre são utilizados para conectar o segundo estágio dos *cryocoolers* superiores

à massa de cobre que possui canais de resfriamento de Nitrogênio líquido para *cooldown*. A base da massa fria é suportada por tiras de Kevlar. A parte superior e inferior do *yoke* é feita de aço carbono 1006, onde os polos das bobinas centrais e laterais são fixados. As paredes laterais do *yoke* são feitas de aço inox 316 L para garantir resistência estrutural e possuem aberturas para que os conectores térmicos possam se ligar aos *clamps* das bobinas.

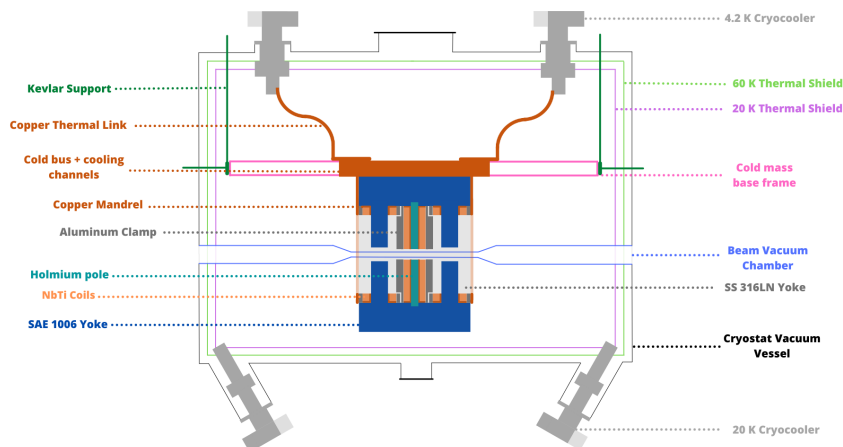


Figura 11: Modelo 2D esquemático do SWLS. Fonte: [19]

Devido ao baixo calor específico do cobre na temperatura de operação ($0,09942 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$), a *cold bus* não pode atuar como inércia térmica auxiliando no estabilidade de temperatura. Sua função se restringe à distribuição de temperatura entre a fonte de refrigeração e as bobinas. Portanto, esse modelo está sendo reavaliado e estudado para ser otimizado nas próximas etapas do projeto.

4.1.4 Outros projetos

As *current leads* são os componentes que conectam a fonte de corrente elétrica às bobinas. Por serem responsáveis por conduzir corrente da região de temperatura ambiente à de temperatura criogênica, são a maior fonte de calor do sistema criogênico. Portanto, precisam ser desenvolvidos de modo a otimizar o fluxo de calor que entra no sistema para não comprometer o projeto criogênico. O modelo projetado possui uma parte resistiva de bronze e uma parte que usa um supercondutor de alta temperatura, provavelmente fitas de Bi-2223.

Para que o dispositivo supercondutor funcione adequadamente, é preciso que a fonte de energia possua as características de baixa tensão, alta corrente, alta precisão e estabilidade. As alternativas de desenvolver internamente ou comprar uma fonte de corrente com as especificações ainda estão em discussão.

O sistema de proteção contra *quench* considerado para o dispositivo se baseia em uma proteção ativa. Ele possui sensores de diferença de potencial, cujo sinal é filtrado e tratado por

um sistema de validação em que, em caso de *quench*, uma chave é acionada para cortar a conexão entre a fonte de corrente e as bobinas e ligando as bobinas a um resistor, localizado fora do criostato, que dissipa a energia excessiva e reduz os danos.

4.2 Definição dos parâmetros do fio e geometria da bobina

Para que as simulações magnéticas no software Simcenter MagNet [20] sejam feitas pelo Grupo de Ímãs do CNPEM, é necessário determinar qual é a área de Nb-Ti dos fios supercondutores que compõem os enrolamentos das bobinas. As simulações são como um processo iterativo, em que, definida a corrente desejada, a área de Nb-Ti é uma variável que permite analisar se o modelo atinge as características desejadas.

Após diversas simulações, foi considerado o fio comercialmente disponível pela Luvata Inc. [21] para a modelagem do projeto eletromagnético. Suas características são razão de Cu/Nb-Ti de 0,97, diâmetro do fio de 0,85 mm e isolamento de Formvar de 0,025 mm, que satisfazem as exigências do projeto, incluindo a validação da razão cobre/supercondutor pelo grupo responsável pela proteção contra *quench*.

O Wavelength Shifter Superconductor é composto por três pares de polos com bobinas de Nb-Ti, sendo um par de polos magnéticos centrais de alto campo cercado por pares de polos laterais de aço carbono 1006. A fim de intensificar o campo magnético nos polos centrais, um polo de hólmio será utilizado nas bobinas centrais como concentrador de fluxo magnético. Nas simulações magnéticas, levando em consideração as características de campo necessárias, a geometria atual do ímã foi definida. Na Figura 12, podemos observar a geometria completa dos pares de bobinas, polos e *yoke* superior e inferior, cujos valores dos parâmetros estão listados na Tabela 1.

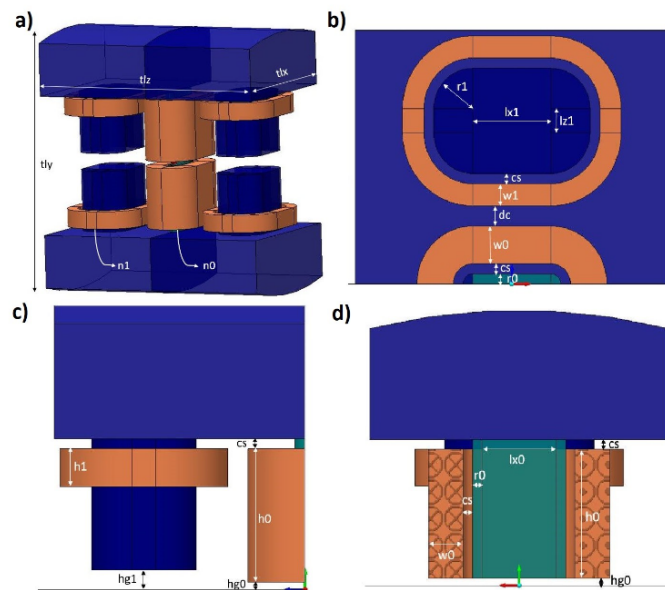


Figura 12: Representação da geometria das bobinas do SWLS: a) vista do conjunto das bobinas; b) meia simetria inferior; c) meia simetria longitudinal; e d) meia simetria transversal. Fonte: [19]

Tabela 1: Valores dos parâmetros representados na Figura 12. Fonte: [19]

Parâmetros da geometria do conjunto de bobinas do SWLS	
Comprimento total no eixo x - tlx [mm]	250
Comprimento total no eixo y - tly [mm]	250
Comprimento total no eixo z - tlz [mm]	240
Número de espiras na bobina central - n_0	1080
Número de espiras na bobina lateral - n_1	180
Meio \textit{gap} magnético na bobina central - hg_0 [mm]	3,5
Meio \textit{gap} magnético n bobina lateral - hg_1 [mm]	10
Raio do polo central - r_0 [mm]	6
Comprimento do polo central no eixo x - lx_0 [mm]	40
Raio do polo lateral - r_1 [mm]	20
Comprimento do polo lateral no eixo x - lx_1 [mm]	40
Comprimento do polo lateral no eixo z - lz_1 [mm]	10,83
Espaçamento do mandril - cs [mm]	3
Distância entre as bobinas - dc [mm]	10
Altura da bobina central - h_0 [mm]	54,6
Comprimento da bobina central - w_0 [mm]	19,35
Altura da bobina lateral - h_1 [mm]	16,8
Comprimento da bobina lateral - w_1 [mm]	10,95

A Figura 13 e a Tabela 2 mostram os resultados das simulações com relação aos parâmetros de campo eletromagnético para o modelo do SWLS. Podemos observar que o campo de pico (6,32 T) e a largura de meia altura (FWHM) de 30,8 mm estão de acordo com os requisitos do projeto,

bem como o campo induzido na bobina está abaixo do campo crítico do material supercondutor.

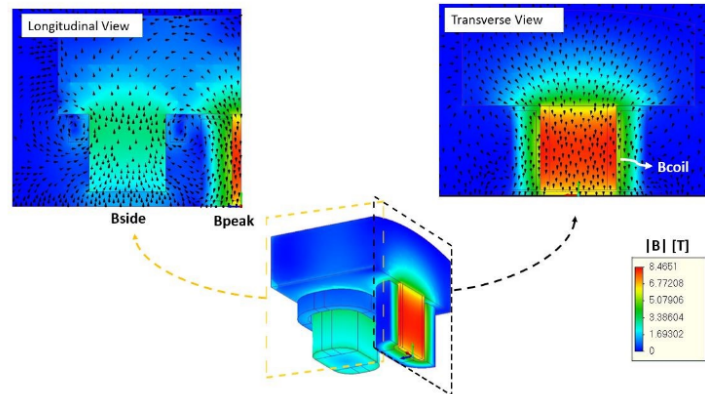


Figura 13: Distribuição de campo para o modelo eletromagnético do SWLS. Fonte: [19]

Tabela 2: Resultados de campo para o modelo eletromagnético do SWLS. Fonte: [19]

Parâmetros de campo para o modelo eletromagnético do SWLS	
Corrente [A]	228
Campo de pico - Bpeak [T]	6,32
Campo na região do polo lateral - Bside [T]	1,43
Campo máximo nas bobinas - Bcoil [T]	5,30
FWHM [mm]	30,8

Definida a geometria das bobinas, é possível realizar simulações para se obter o ponto de operação do dispositivo e a margem de operação dado a temperatura de operação e a temperatura de *current sharing*, que representa a temperatura acima da qual o material começa a perder sua capacidade supercondutora e começa a compartilhar corrente com o condutor de proteção (cobre) até que a temperatura crítica seja atingida e o estado supercondutor seja perdido completamente.

A Figura 14 mostra o gráfico de densidade de corrente crítica por campo magnético induzido na bobina que contém a curva crítica do Nb-Ti próximo da temperatura de operação de 5 K (em amarelo) e próximo da temperatura de *current sharing* de 6,1 K (em laranja). Estabelecida a corrente (228 A) que precisa ser abaixo de 300 A (devido aos limites de segurança da fonte de corrente) e estabelecida a área de Nb-Ti do fio supercondutor em $0,298 \text{ mm}^2$ (fio da Supercon), podemos obter a densidade de corrente (792 A/mm^2). Sendo o campo magnético máximo induzido na bobina igual a 5,30 T (obtido através das simulações), podemos obter o ponto de operação, que define as condições em que o dispositivo operará. A reta traçada da origem até o ponto de operação é uma representação da *load line* e a continuação da reta até atingir um ponto da curva crítica do Nb-Ti é a margem, que representa um fator de segurança para a operação do dispositivo sem que ele seja danificado. Para fios de Nb-Ti, a margem necessita representar uma porcentagem maior do que 20% da linha de carregamento. Como

podemos observar no gráfico, esse modelo satisfaz as condições necessárias com uma margem de 24,0 %.

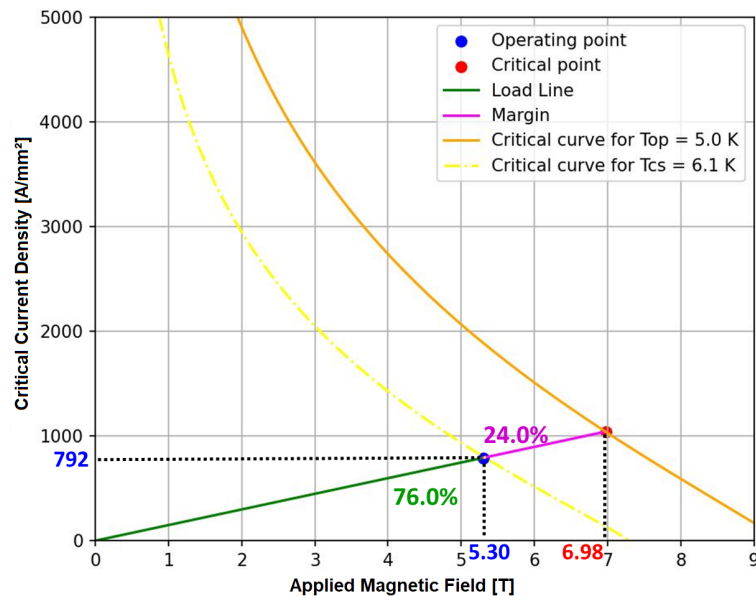


Figura 14: Gráfico de JxB contendo a curva crítica, a load line e a margem de operação para o modelo de fio supercondutor. Fonte: [19]

A Figura 15 mostra o perfil de campo do modelo simulado em comparação com o perfil de campo ideal proposto para o projeto pelo Grupo de Física de Aceleradores (FAC) do Sirius, cujo pico central possui um campo integrado de 20.15 T.m. Apesar de o perfil de campo estar ligeiramente deslocado, visto que o modelo atende os requisitos de projeto quanto ao campo de pico e largura de meia altura, os resultados foram aprovados pelo FAC.

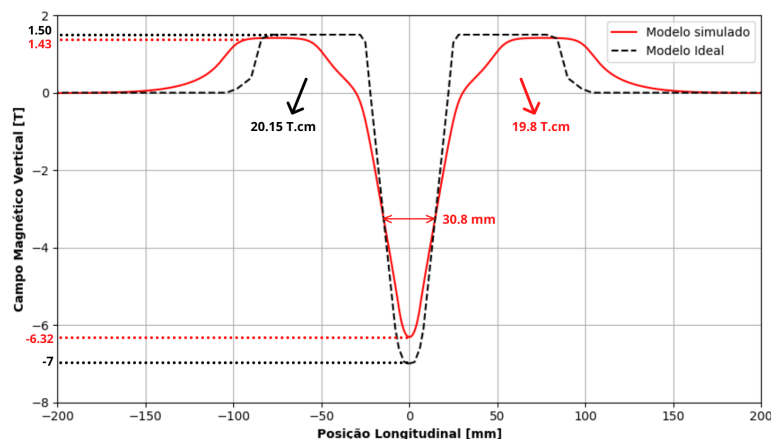


Figura 15: Gráfico do perfil de campo do modelo eletromagnético simulado em comparação com o modelo ideal. Fonte: [19]

4.3 Rota de fabricação das bobinas

A geometria do modelo eletromagnético descrita na seção anterior prevê que o fio supercondutor das bobinas possua diâmetro de 0,85 mm, com razão Cu/Nb-Ti de 0,97 e uma camada de isolamento de polímero Formvar de 0,025 mm. Segundo o modelo, as bobinas centrais possuem 18 camadas com 60 espiras cada e as laterais possuem 10 camadas com 18 espiras cada, enroladas no formato *racetrack*, com isolamento de fibra de vidro com espessura de 0,150 mm entre camadas e 0,300 mm nas bordas. A [Figura 16](#) representa a configuração de isolamento de fibra de vidro entre camadas de fios adjacentes e nas bordas, e a [Figura 17](#) representa as dimensões e geometria das bobinas centrais e laterais do modelo.

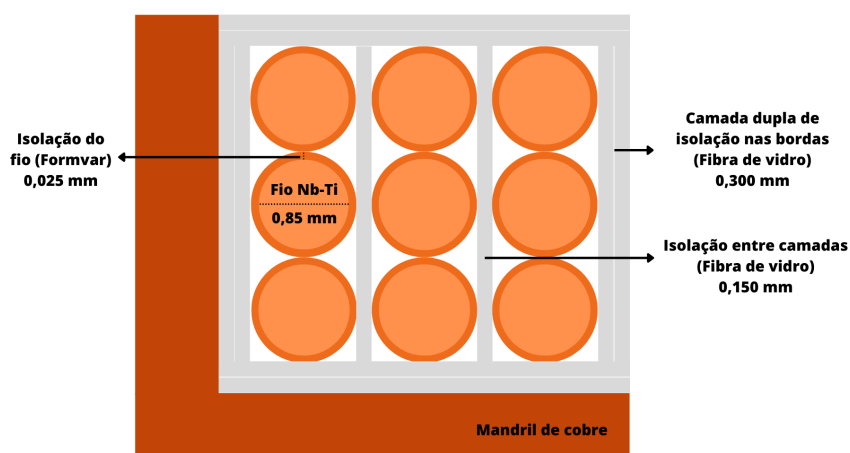


Figura 16: Representação dos fios adjacentes e isolamento de fibra de vidro entre camadas e nas bordas para o modelo previsto. Fonte: adaptado de [\[19\]](#)

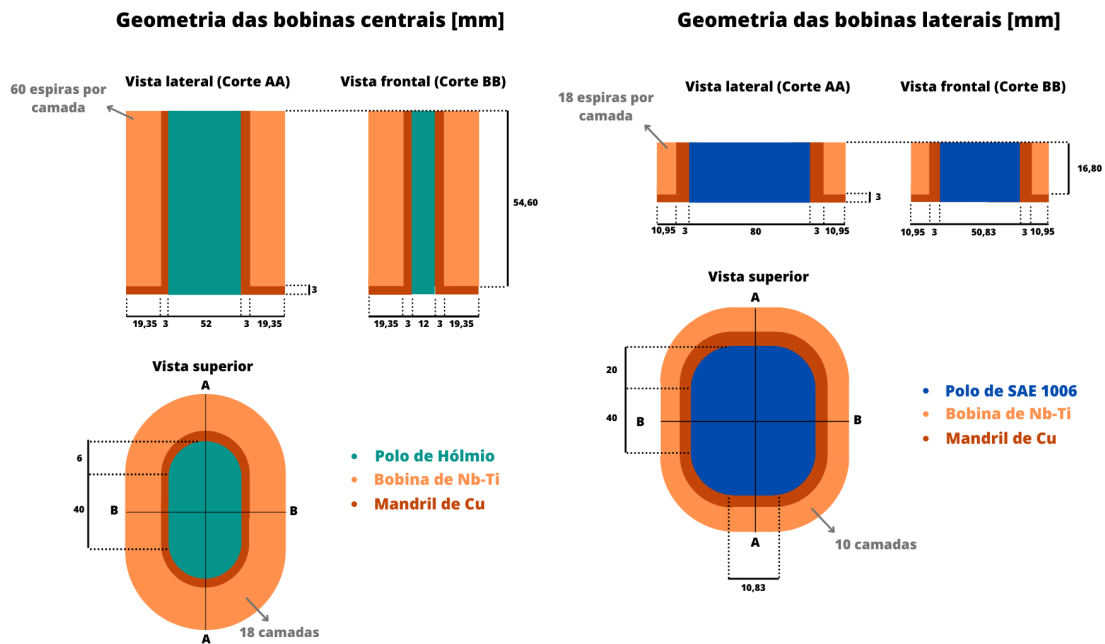


Figura 17: Representação da geometria e dimensões das bobinas centrais e laterais do modelo previsto. Fonte: adaptado de [19]

Durante a fabricação, as bobinas serão enroladas diretamente em um mandril de cobre que comporá posteriormente o conjunto das bobinas, facilitando a fixação das bobinas no *yoke* e polos. A escolha do material do mandril se baseou na proximidade de dilatação térmica entre o cobre e o fio multifilamentar de Nb-Ti, que possui grande quantidade de cobre em sua composição, para evitar que a bobina se separe do mandril durante o processo de *cool-down* (refriamento à temperatura criogênica para ativação do ímã) ou *warm-up* (aquecimento à temperatura ambiente para manutenção ou desativação) do dispositivo.

A Figura 18 representa o processo de bobinagem dos fios supercondutores para produção das bobinas centrais em formato *racetrack*: a) Um suporte de aço inoxidável será utilizado no processo de bobinagem para auxiliar na fixação na bobinadeira, no suporte das camadas externas e promover integridade mecânica para o núcleo do mandril. O processo se dará cobrindo o mandril e suporte com duas camadas de fibra de vidro de espessura de 0,150 mm e enrolando as espiras camada por camada (a). Para as bobinas centrais, 60 espiras serão enroladas na primeira camada e cobertas com uma camada de fibra de vidro de 0,150 mm para isolamento entre camadas (b). Então, esse processo é repetido até que as 18 camadas sejam completadas e cobertas com mais uma camada dupla de fibra de vidro (c). Para as bobinas laterais o processo será o mesmo, porém com 18 espiras por camada e um total de 10 camadas.

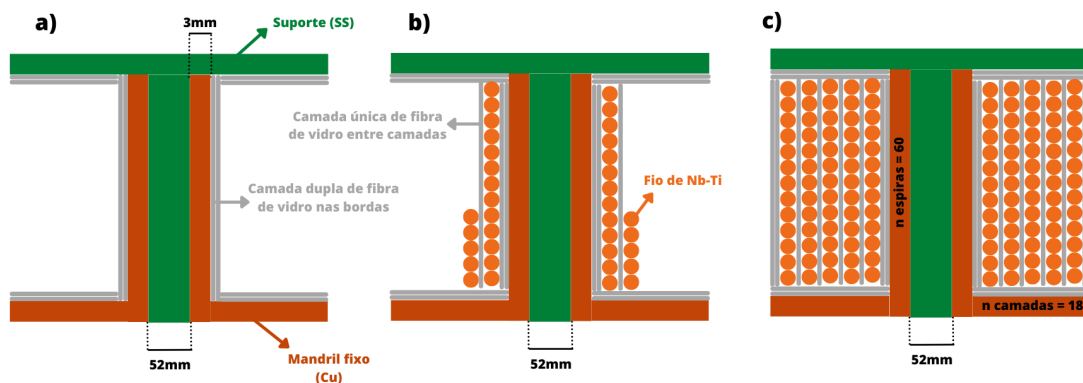


Figura 18: Representação do processo de bobinagem para as bobinas centrais do modelo: a) o mandril e o suporte cobertos com camada dupla de fibra de vidro; b) bobina sendo enrolada camada por camada com isolamento entre-camadas de fibra de vidro; c) 18 camadas enroladas com 60 espiras cada e cobertas com dupla isolamento de fibra de vidro. Fonte: adaptado de [19]

Para evitar rachaduras e movimentação dos fios durante o processo de *cool-down* ou *warm-up* e ativação do ímã, a bobina precisa ser impregnada à vácuo com resina. Como os metais, incluindo os supercondutores, são extremamente sensíveis devido à sua baixa capacidade térmica a baixas temperaturas, uma pequena movimentação nos fios (de somente alguns μm) já pode ser suficiente para causar *quench*. Dessa forma, ao impregnar a bobina, os componentes se tornam um bloco sólido reduzindo os impactos causados pela deflexão e força de Lorentz nos fios. O composto de resina selecionado para o procedimento de impregnação foi o Araldite, composto pela resina Araldite F, Endurecedor HY905, Flexibilizador DY040 e Acelerador DY062, disponível no catálogo da empresa brasileira MaxEpoxi [22]. A seleção da resina se baseou, além das indicações do CERN, na compatibilidade com a fibra de vidro e o fio supercondutor, a disponibilidade e orçamento. As propriedades, como viscosidade, temperatura do processo de impregnação, elasticidade e condutividade térmica, foram avaliadas de forma que fossem compatíveis com o esperado pelas simulações mecânicas e térmicas do modelo.

A Figura 19 representa a bobina impregnada. O conjunto da bobina, mandril e suporte será inserido dentro do molde de impregnação para ser colocado em vácuo (a). A resina então será inserida no molde e impregnará através das camadas de fibra de vidro e espaço entre os fios (b). Após o processo completo de cura da resina, o desmolde é feito e a bobina impregnada com o mandril é retirada (c).

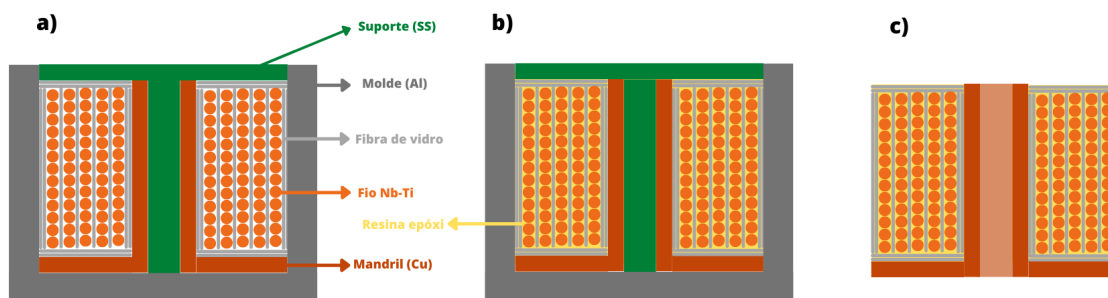


Figura 19: Representação das bobinas impregnadas à vácuo: a) conjunto da bobinagem inserido no molde de impregnação; b) resina epóxi impregna o conjunto; c) bobina impregnada. Fonte: adaptado de [19]

Completos os processos de bobinagem e impregnação das duas bobinas centrais e quatro laterais, o conjunto será montado e fixado no *yoke*. Os polos de hólmio e de aço serão inseridos no espaço interno do mandril e fixados no *yoke*. *Clamps* horizontais de alumínio serão inseridos ao redor das bobinas e fixos no *yoke* para neutralizar as movimentações devido à força de Lorentz na bobina, que tende a expandir. *Clamps* verticais serão inseridos para sustentar as bobinas. A Figura 20 representa o conjunto de bobinas do modelo, os *clamps* individuais e os polos fixados ao *yoke*. Na Figura 21 é possível observar mais detalhadamente os *clamps* horizontais e verticais e suas fixações.

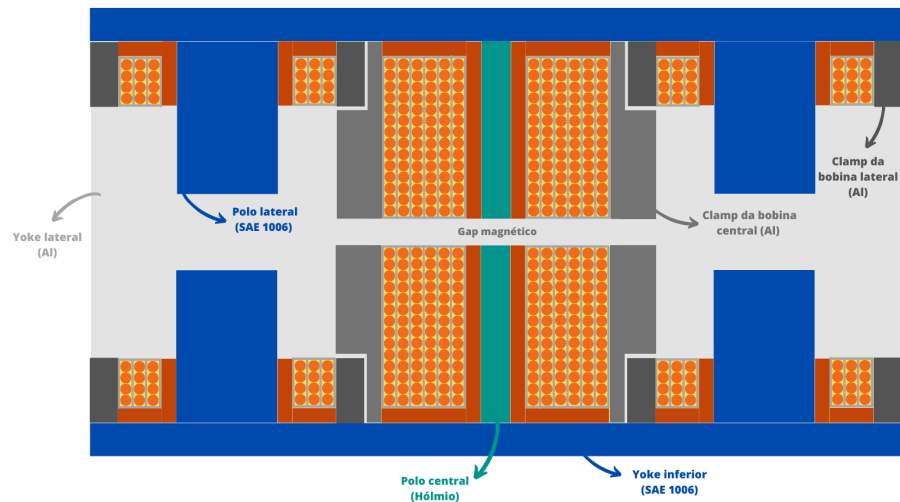


Figura 20: Representação do conjunto das bobinas, *yoke* e clamps do modelo. Fonte: adaptado de [19]

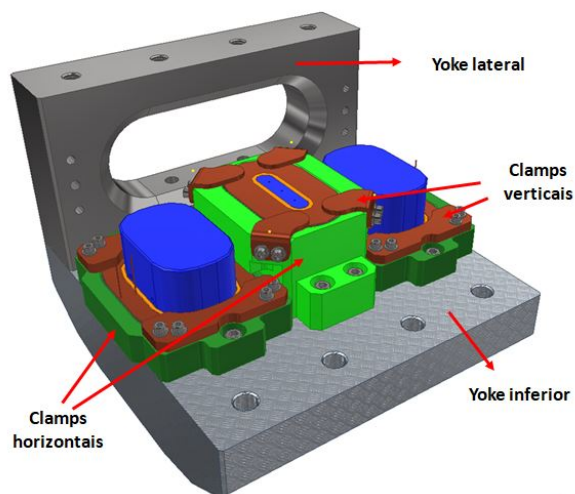


Figura 21: Representação dos clamps e fixações para o modelo. Fonte: adaptado de [19]

5 Prototipagem

5.1 Desenvolvimento do mandril e molde para impregnação

Definidos os parâmetros do fio, a geometria das bobinas e suas rotas de fabricação, deu-se início à prototipagem. A primeira etapa se deu com o desenvolvimento do mandril e do molde de impregnação.

O mandril foi projetado de forma a ser composto por três peças: o mandril de cobre, o núcleo do suporte e a tampa do suporte, que são fixados através de parafusos. A bobina será enrolada ao redor do mandril de cobre, o núcleo do suporte fornece sustentação para o mandril e fixação na bobinadeira, e a tampa do suporte fornece limitação para a última camada da bobina. A [Figura 22](#) mostra uma representação do desenho técnico desenvolvido para o conjunto do mandril e suporte do modelo.

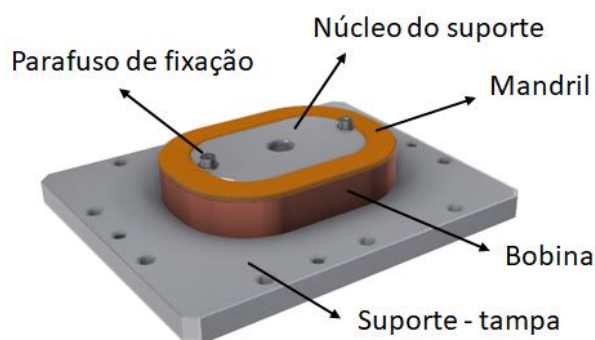


Figura 22: Representação do desenho técnico do conjunto para bobinagem: mandril, núcleo e suporte. Fonte: adaptado de [\[19\]](#)

O molde para impregnação foi projetado de modo a permitir que o conjunto seja colocado em vácuo para ser impregnado com resina e que o desmolde seja facilitado. Após a bobinagem, o mandril com a bobina, o núcleo e o suporte são inseridos no molde para compor o conjunto de impregnação. A [Figura 23](#) mostra uma representação do desenho técnico desenvolvido para o molde de impregnação na qual é possível observar seus componentes: núcleo, mandril, bobina, peça de alumínio quadripartida, *o'ring*, parte central do molde e parte inferior do molde na vista superior sem a tampa da bobinagem; e mandril, peça de alumínio quadripartida, peça de alumínio bipartida, *o'ring*, parte central do molde e tampa do suporte da bobinagem na vista inferior sem a parte inferior do molde. Os *o'rings* serão utilizados para selar a estrutura e possibilitar a criação de vácuo. A estrutura do molde será composta por três seções (tampa da bobinagem, parte central e parte inferior) para facilitar o desmolde. Já a peça de alumínio quadripartida posicionada entre a parte central do molde e a bobina, além de facilitar o desmolde, também possuirá a função de evitar que a bobina fique aderida ao molde na impregnação.

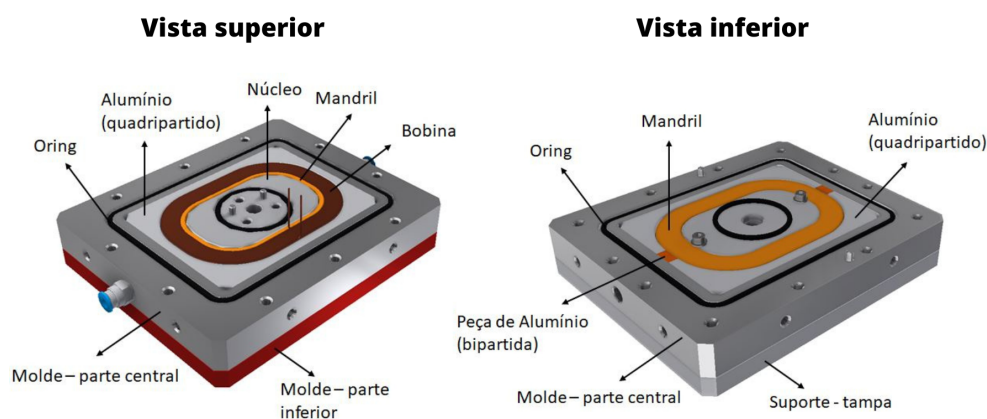


Figura 23: Representação do desenho técnico do conjunto para impregnação à vácuo: vista superior e inferior. Fonte: adaptado de [19]

A figura [Figura 24](#) mostra o desenho técnico do molde de impregnação nas vistas em corte frontal e lateral, em que é possível observar alguns detalhes da estrutura. O canal de entrada da resina possui um formato cônico para reduzir o acúmulo de resina e atravessa uma peça bipartida de alumínio que pode ser retirada no processo de desmolde e auxiliar na quebra da resina acumulada. Além disso, durante o processo de impregnação, o fio da entrada e saída da bobinagem precisa ser excluído do processo para que futuras conexões de passagem de corrente sejam feitas. Dessa forma, a saída do fio conta com colares de teflon para evitar aderência, *o' rings* pequenos para selar a região. O conector festo foi colocado para testar a criação de vácuo na saída dos fios.

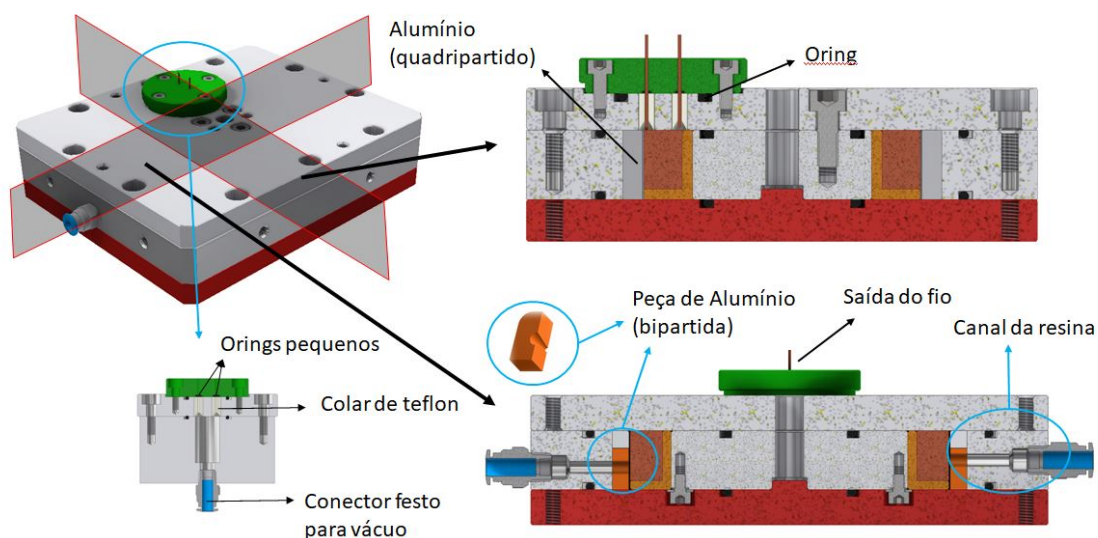


Figura 24: Representação do desenho técnico do conjunto para impregnação à vácuo, vistas em corte frontal e lateral e detalhes da saída do fio. Fonte: adaptado de [19]

5.2 Primeiro protótipo - bobina de cobre

O objetivo do primeiro protótipo foi entender o processo prático de bobinagem e impregnação para as bobinas *racetrack* com fio de 0,9 mm propostas pelo modelo e levantar melhorias para os próximos protótipos.

Devido ao alto custo dos fios supercondutores, o primeiro protótipo foi feito com fio de cobre com o mesmo diâmetro do fio de Nb-Ti do modelo (0,9 mm), seguindo o modelo da bobina lateral. Além disso, de acordo com a disponibilidade de material na oficina do CNPEM, o mandril foi feito de alumínio. A [Figura 25](#) mostra o mandril no a) processo de bobinagem e b) no final da bobinagem. Conforme previsto pela rota de fabricação, uma camada dupla de fibra de vidro foi posicionada antes da primeira camada e após a última camada, e uma camada única foi posicionada entre camadas. No entanto, em razão da dificuldade de fixação da fibra de vidro, a camada dupla prevista para ser posicionada na parte inferior e superior da bobina não foi colocada. Esse impedimento está sendo reavaliado pela equipe para que se possa levantar soluções para os próximos protótipos.

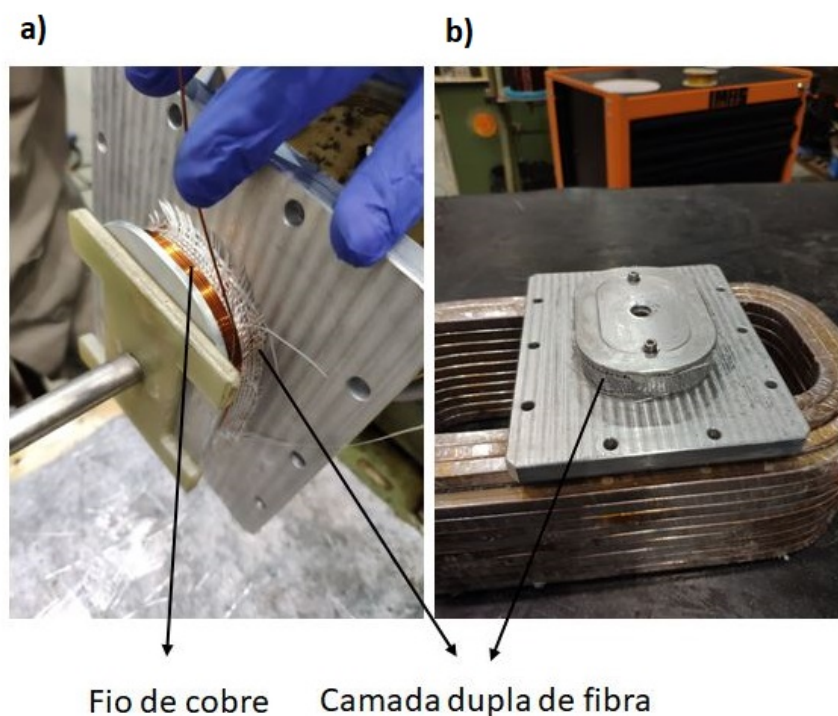


Figura 25: Mandril de alumínio do primeiro protótipo: a) durante e b) após o processo de bobinagem da bobina de cobre. Fonte: Grupo de Supercondutividade do CNPEM.

Após o processo de bobinagem, a bobina de cobre foi inserida no molde de impregnação e envolvida pela peça de alumínio quadripartida. Os fios de entrada e saída da bobina foram encaixados na saída dos fios e o molde de impregnação foi fechado pelo suporte da bobinagem

e tampa do molde. A [Figura 26](#) mostra o molde de impregnação da bobina de cobre na visão superior (a) em que é possível observar a saída do fio e o suporte da bobinagem; e na visão inferior (b) sem a tampa inferior do molde em que é possível observar o mandril, a peça de alumínio quadripartida, a bobina e os parafusos de fixação.

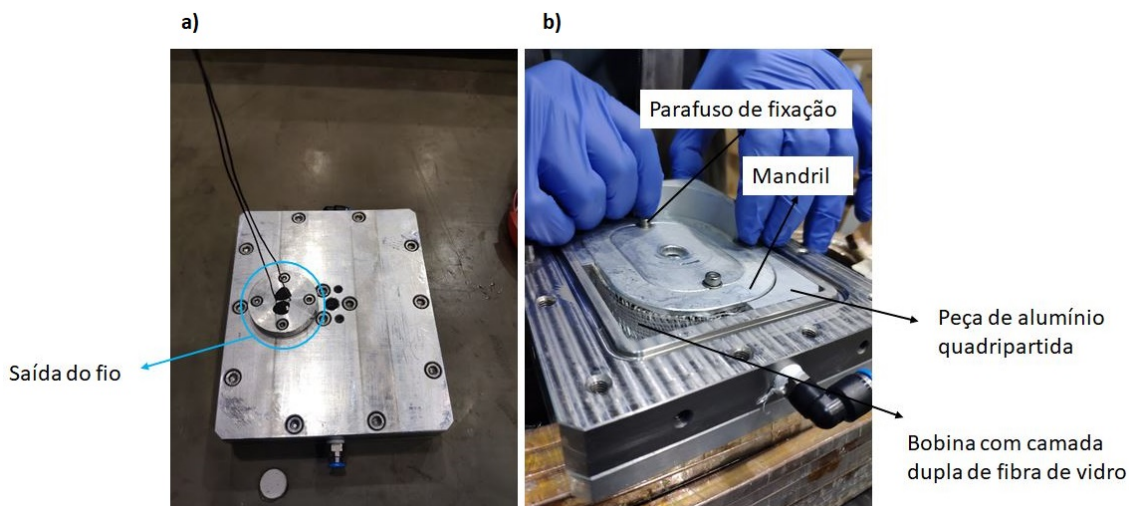


Figura 26: Molde para impregnação: a) visão superior e b) visão inferior sem a tampa. Fonte: Grupo de Supercondutividade do CNPEM.

Então, a bobina passou pelo processo de impregnação à vácuo. A resina foi mantida por 1 hora à vácuo na temperatura de 50°C (indicada pelo fornecedor) dentro do recipiente para degasagem do conjunto, reduzir sua viscosidade e reduzir a formação de bolhas. Com o molde mantido à 80°C, a impregnação foi realizada em aproximadamente 1 hora e meia. Então, o molde foi mantido por 6 horas na temperatura de 80°C e mais 6h na temperatura de 140°C para cura da resina. A [Figura 27](#) mostra o *setup* do processo de impregnação, em que é possível observar os seus componentes: controlador de temperatura, eletrônica de vácuo, “pulmão” de resina, reservatório de resina, conjunto de molde e bobina na parte superior (a), e a bomba de vácuo na parte inferior (b) do *setup*.

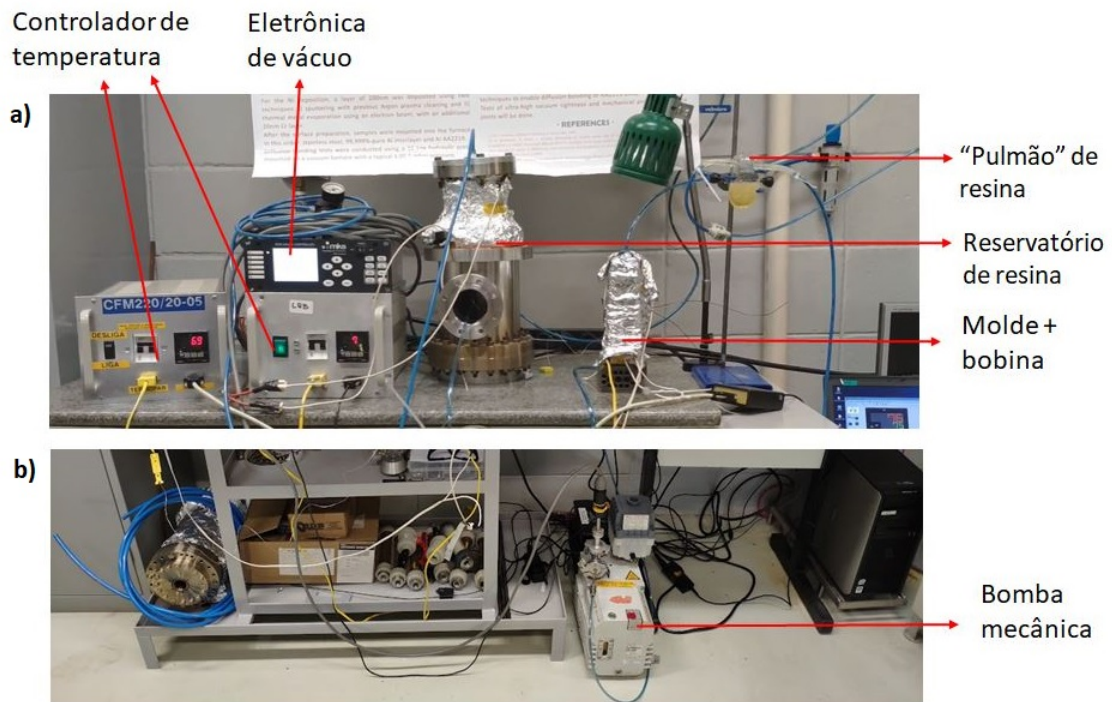


Figura 27: *Setup* de impregnação à vácuo do primeiro protótipo: a) parte superior e b) parte inferior. Fonte: Grupo de Supercondutividade do CNPEM.

Completo o processo de cura da resina, o conjunto foi desmoldado e a bobina foi retirada do molde. A [Figura 28](#) mostra o molde sem a tampa após o processo de impregnação (a) e a bobina impregnada fora do molde (b).

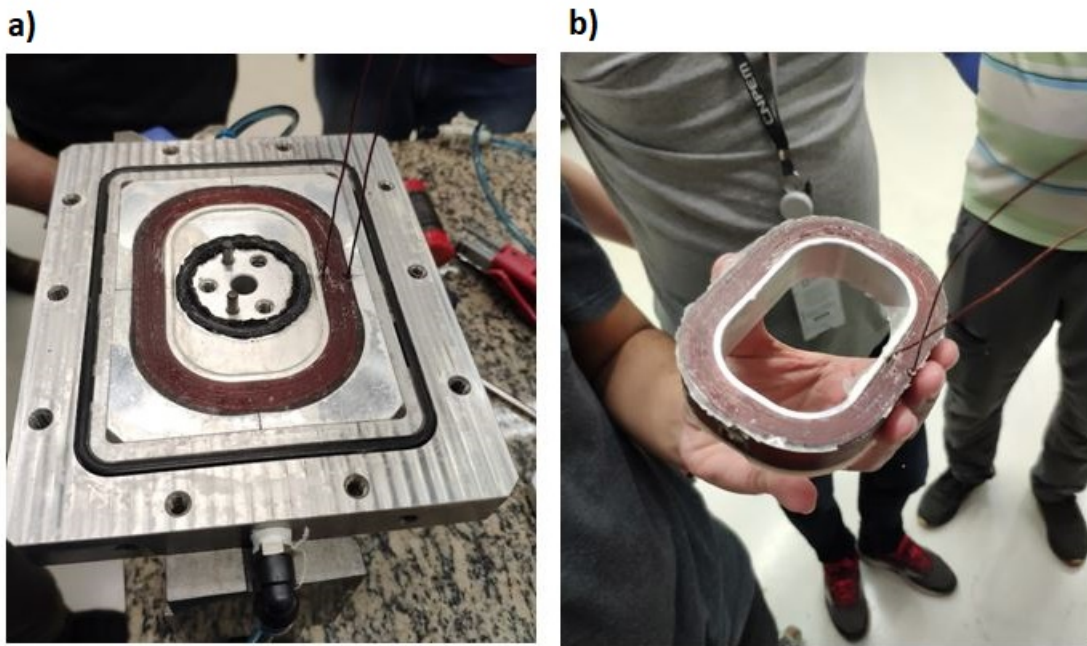


Figura 28: Primeiro protótipo a) durante o desmolde e b) fora do molde . Fonte: Grupo de Supercondutividade do CNPEM.

5.3 Discussões

Finalizado o primeiro protótipo, a bobina foi analisada para posterior discussão e levantamento de melhorias. A primeira observação feita após o desmolde foi a presença de rachaduras na superfície externa da bobina impregnada, que pode ser observada na [Figura 29](#). Algumas rachaduras são suficientemente profundas a ponto de expor parte dos fios da última camada ao ambiente, sendo prejudicial para a estabilidade dos fios, que podem se movimentar ao longo das rachaduras. Esses defeitos podem indicar ineficiência no processo de impregnação ou agressividade demasiada no processo de desmolde.

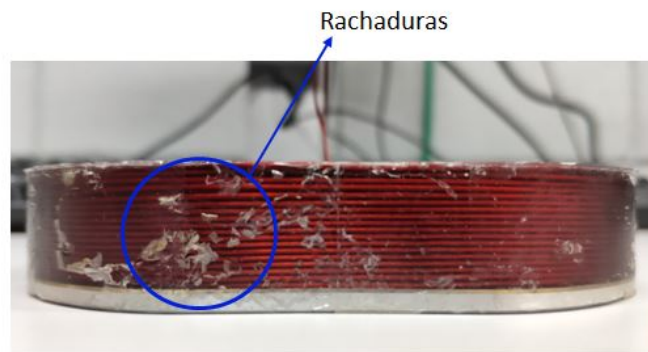


Figura 29: Presença de rachaduras na superfície do primeiro protótipo da bobina. Fonte: Grupo de Supercondutividade do CNPEM.

Após essa primeira análise visual, a bobina foi então testada quanto ao isolamento elétrico, cujo resultado foi de 5 kV como tensão máxima para que não haja ruptura da rigidez dielétrica do composto isolante.

Posteriormente, amostras da seção transversal da bobina foram retiradas para que análises mais detalhadas pudessem ser feitas através do uso do microscópio óptico. A [Figura 30](#) mostra o planejamento de corte das amostras e as suas imagens registradas com o microscópio.

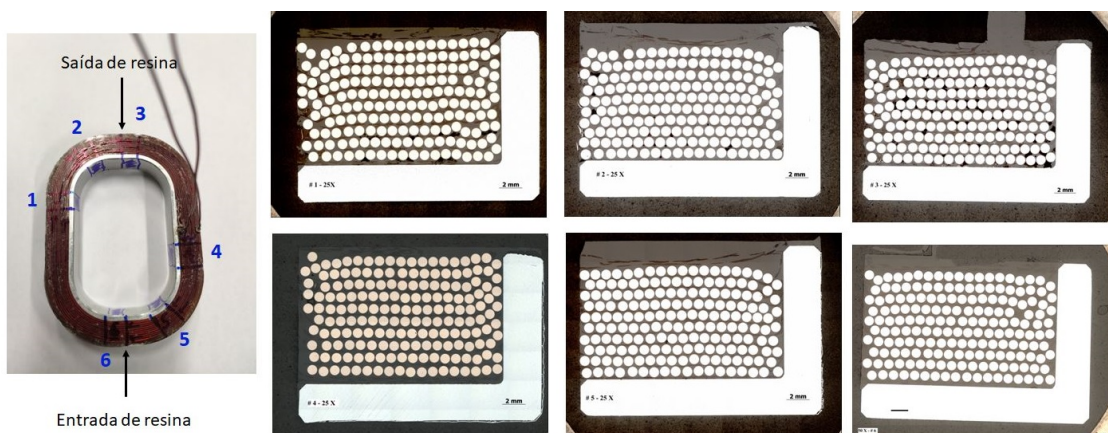


Figura 30: Cortes da seção transversal da bobina e imagens das amostras obtidas com o microscópio óptico. Fonte: Grupo de Supercondutividade do CNPEM.

É possível observar em todas as amostras de seção transversal que as camadas mais próximas das bordas inferior e superior apresentam desalinhamento dos fios, como mostra o exemplo da amostra #1 na [Figura 31](#). Uma das causas do desalinhamento pode ser a falta da camada dupla de fibra de vidro nessas posições das bordas, o que dificulta a acomodação dos fios.

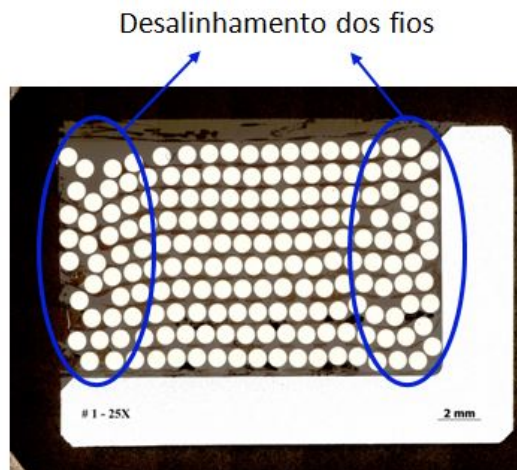


Figura 31: Desalinhamento dos fios na amostra #1 da seção transversal da bobina protótipo. Fonte: Grupo de Supercondutividade do CNPEM.

Em algumas amostras, principalmente naquelas próximas à saída de resina, é possível observar regiões em que a impregnação não foi adequada. A [Figura 32](#) mostra o exemplo da amostra #3, em que existem vários vãos sem resina, que podem permitir a movimentação dos fios. Essa irregularidade pode ter se dado devido à vários motivos, podendo ser um deles a presença de bolhas na resina durante o processo de impregnação.



Figura 32: Vãos sem resina na amostra #3 da seção transversal da bobina protótipo. Fonte: Grupo de Supercondutividade do CNPEM.

Além disso, também é possível observar que em algumas amostras, por exemplo na amostra #2 como mostra a [Figura 33](#), existe um grande espaço preenchido com resina na camada mais externa, o que pode ser um indicativo de que a acomodação "fio sobre fio" prevista não se deu de maneira correta. Os fios podem ter se acomodado nos vãos da camada anterior, fazendo com que a largura da bobina fosse menor e sobrasse espaço no mandril para a resina impregnada. Outra observação a ser feita é o posicionamento das fibras de vidro na camada mais externa, que não ficaram rente aos fios após a impregnação, provavelmente devido ao espaço extra entre a camada mais externa e o limite do molde de impregnação.

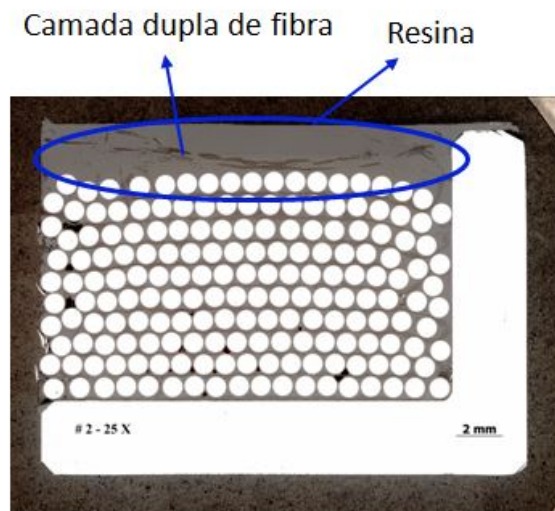


Figura 33: Espaço com resina e posicionamento da fibra de vidro observados na amostra #2 da seção transversal da bobina protótipo. Fonte: Grupo de Supercondutividade do CNPEM.

As possíveis causas das irregularidades na bobina do primeiro protótipo serão levantadas e discutidas entre o Grupo de Supercondutividade do CNPEM para que melhorias sejam estudadas para o segundo protótipo.

6 Conclusões

Este Trabalho Final de Curso auxiliou no desenvolvimento do projeto preliminar do Superconducting Wavelength Shifter de 6,32 T, que será construído e instalado no acelerador síncrotron Sirius. Esse projeto envolveu um esforço conjunto de uma equipe multidisciplinar da Divisão de Engenharia e Tecnologia do CNPEM para desenvolver os modelos desse dispositivo de inserção.

Os modelos eletromagnético, mecânico, criogênico e outros definiram as características do dispositivo, suas dimensões, geometrias, materiais, etc. A definição dos parâmetros do fio e geometria das bobinas do conjunto foram definidos pelo modelo eletromagnético, de modo que o dispositivo atingisse campo de pico acima de 6 T, perfil de campo estreito na região do polo central ($\text{FWHM} \approx 30$), campo integrado nulo fornecido pelos polos laterais, *gap* magnético mínimo de 7 mm e margem de operação acima de 20%. A geometria das bobinas previu a utilização de um fio com 0,85 mm de diâmetro, razão Cu/Nb-Ti de 0,97 e uma camada de isolamento de 0,025 mm, em que as bobinas centrais possuem 18 camadas com 60 espiras cada e as laterais possuem 10 camadas com 18 espiras cada no formato *racetrack*.

Dessa forma, foi proposta uma rota de fabricação para essas bobinas, que definiu que os fios seriam acomodados “fio sobre fio” e enrolados camada por camada, com isolamento de fibra de vidro entre camadas e isolamento dupla nas bordas do mandril. A bobina então seria impregnada à vácuo com resina para evitar rachaduras e movimentação dos fios.

Uma bobina de cobre com as mesmas características da bobina lateral do SWLS foi fabricada seguindo a rota de fabricação proposta, a fim de entender o processo de bobinagem e impregnação e de levantar melhorias para os próximos protótipos. A primeira bobina protótipo foi enrolada e impregnada, validando a rota de fabricação. Porém, algumas irregularidades foram observadas, como vãos sem resina, desalinhamento dos fios nas bordas, e excesso de resina na camada mais externa, cujas causas serão estudadas e otimizadas para os próximos protótipos.

Por fim, este trabalho, além de contribuir para o desenvolvimento das atividades do Grupo de Supercondutividade do CNPEM, contribuiu para a minha formação como Engenheira Física. A possibilidade de trabalhar em um ambiente científico de alto nível em um tema atual da física aplicada, Supercondutividade, foi um desafio motivante que me rendeu experiências para a minha atuação futura na área.

Referências

- [1] SIRIUS: ACELERANDO O FUTURO DA CIÊNCIA BRASILEIRA. Laboratório Nacional de Luz Síncrotron. Disponível em: <<https://www.lnls.cnpem.br/sirius/>>. Acesso em 08 de Junho de 2021.
- [2] LUZ PARA O CONHECIMENTO. Laboratório Nacional de Luz Síncrotron. Disponível em: <<https://www.lnls.cnpem.br/sirius/luz-para-o-conhecimento/>>. Acesso em 08 de Junho de 2021.
- [3] ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO. Toda Matéria. Disponível em: <<https://www.todamateria.com.br/espectro-eletromagnetico/>>. Acesso em 08 de Junho de 2021.
- [4] COMO FUNCIONA O SÍRIUS?. Laboratório Nacional de Luz Síncrotron. Disponível em: <<https://www.lnls.cnpem.br/sirius/como-funciona-o-sirius/>>. Acesso em 08 de Junho de 2021.
- [5] ROSA, F. M. Supercondutores. Disponível em: <<http://www.if.ufrgs.br/tex/fis01043/20032/Fabiano/supercondutores.htm>>. Acesso em 04 de Fevereiro de 2021.
- [6] BRANÍCIO, P. S. Introdução à supercondutividade, suas aplicações e a mini-revolução provocada pela redescoberta do MGB2: uma abordagem didática. Revista Brasileira de Ensino de Física, 23 (4), Dezembro, 2001.
- [7] EFEITO MEISSNER. Disponível em: <<http://www.if.ufrgs.br/tex/fis01043/20012/Carolina/meissner.html>>. Acesso em 05 de Fevereiro de 2021.
- [8] EFEITO MEISSNER. Wikipedia. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Efeito_Meissner>. Acesso em 05 de Fevereiro de 2021.
- [9] Mess, K. H. et al. Superconducting Accelerator Magnets. Singapura: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 1996.
- [10] Ostermann, F.; Pureur, P. Temas Atuais da Física: Supercondutividade. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2005.
- [11] TYPE 1 SUPERCONDUCTORS. Superconductors.org. Disponível em: <<http://www.superconductors.org/Type1.htm>>. Acesso em 05 de Fevereiro de 2021
- [12] TYPE 2 SUPERCONDUCTORS. Superconductors.org. Disponível em: <<http://www.superconductors.org/Type2.htm>>. Acesso em 05 de Fevereiro de 2021
- [13] NAVE, R. Superconducting Magnets. Disponível em: <<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Solids/scmag.html#c2>>. Acesso em 10 de Fevereiro de 2021.

-
- [14] PETOILHO, José Carlos. Obtenção e caracterização da liga Nb-Ti e cabos multifilamentares supercondutores. 1977. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1977.
- [15] OTUBO, Jorge. Desenvolvimento de fios supercondutores multifilamentares de Nb-Ti. 1986. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Instituto de Física da USP, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1986.
- [16] Willering, G. P. et al. Cern and University of Twente. Stability of Superconducting Rutherford Cables: For accelerator magnets. 2009.
- [17] FERRACIN, P. Design of Superconducting magnets for particle accelerators and detectors. EUCAS 2017 Short Course, 2017. 221 slides.
- [18] FERRACIN, P; TODESCO, E. Unit 4 - Practical superconductors for accelerator magnets. 46 slides.
- [19] Vianna, Al. et al. Sirius – Superconducting Wavelength Shifter Conceptual Design Report. Campinas: Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais, 2022.
- [20] Simcenter MagNet [Online].Disponível em: < <https://www.plm.automation.siemens.com/global/pt/products/simcenter/magnet.html>>. Acesso em 12 de Abril de 2022.
- [21] Superconductors. Luvata. Disponível em: <<https://www.luvata.com/products/superconductors>>. Acesso em 15 de Janeiro de 2022.
- [22] Tintas, Vernizes e Revestimento. Max Epoxi. Disponível em: <<http://www.maxepoxi.com.br/tintas-vernizes-revestimento>>. Acesso em 10 de Abril de 2022.