

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO  
CURSO DE ENGENHARIA

THIAGO MONTECHIARI

**Um protótipo para aplicação de levitação quântica (Quantum Locking)**

Macaé

2023

THIAGO MONTECHIARI

Um protótipo para aplicação de levitação quântica (Quantum Locking)

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação submetida à Universidade Federal do Rio de Janeiro – Campus Macaé como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de bacharel em Engenharia.

Orientadora:

Prof. Máira Regina Rodrigues Magini

Macaé

2023

## CIP - Catalogação na Publicação

M772

Montechiari, Thiago Kirazian

Um protótipo para aplicação de levitação quântica (Quantum Locking)

/ Thiago kirazian Montechiari - Macaé, 2023.

64 f.

Orientador(a): Máira Regina Rodrigues Magini.

Trabalho de conclusão de curso (graduação) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto Politécnico, Bacharel em Engenharia Mecânica, 2023.

1. Supercondutores. 2. Supercondutividade. 3. Engenharia mecânica.

I. Magini, Máira regina Rodrigues, orient. II. Título.

CDD 624

## Levitação Magnética: Quantum Locking

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação submetida à Universidade Federal do Rio de Janeiro – Campus Macaé como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de bacharel em Engenharia.

Aprovado em Macaé, 07 de julho de 2023.

BANCA EXAMINADORA:

---

Prof. Necesio Gomes Costa, Phd em Materiais (UFRJ)

---

Prof. Marcio Magini, Doutor em Ciências (UFRJ)

---

Prof. Máira Regina Rodrigues Magini, Doutora em Físico-Química (UFRJ)

Dedico este trabalho a minha família que sempre esteve presente em todo meu percurso acadêmico e que sempre me apoiou em minhas escolhas.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos envolvidos no meu percurso até aqui. Foi um caminho diferente da maioria dos estudantes, o que me exigiu muita coragem e apoio de todos que estiveram sempre lá para mim. Agradeço em especial aos meus pais, André e Aline, por me darem toda liberdade do mundo para que eu faça minhas próprias escolhas e a de sempre apoiarem minha direção. Agradeço aos meus avós maternos, Krikor e Eda, pela presença em minha vida e por me dar sabedoria para sempre seguir em frente. A meus irmãos, Júlia, Maria, Heitor e Inácio, por serem os maiores amores de minha vida e por me dar a energia para sorrir e me divertir ao longo desse caminho. Ao meu tio, Pedro, pelo carinho e apoio nos momentos mais confusos. À minha avó paterna, Tania, pela coragem de ser meu próprio eu. À minha tia, Carolina, pelo incentivo em sempre acreditar em mim. À minha amada bisavó, Edina, por me dar amor incondicional e valores que levarei pra minha vida inteira.

Gostaria também de agradecer aos professores, Guto Garcia, Marcio Magini, Cleber Nascimento, Antonio Guimarães, Elisa Rocha, Marcelo Cardoso, Rudineli Demarque, Maurício Aguilar e Raquel Lobosco, que serão sempre lembrados por marcarem meu caminho. Agradeço também ao professor Necesio Costa, por acreditar em mim e me abrir as portas para o caminho que trilho na Europa. E, por fim, deixo um agradecimento especial a professora Máira Magini que além de me orientar durante esse trabalho, me ajudou e me incentivou a não desistir quando me deparei com obstáculos nos procedimentos acadêmicos para chegar até aqui.

## RESUMO

O presente trabalho abordará o fenômeno de levitação quântica (Quantum Locking) encontrado nos materiais supercondutores de tipo 2 quando arrefecidos abaixo da sua temperatura crítica de supercondutividade e expostos a uma gama crítica de campo magnético, bem como uma aplicação prática. Esta aplicação foi o resultado de um estágio de 6 meses no Centro de Ciência do Luxemburgo, e consiste na experiência de fazer um trem em miniatura levitar em torno de um trilho feito de ímãs permanentes, através da utilização de pastilhas supercondutoras de tipo 2 refrigeradas, durante mais de um minuto.

Ao longo do trabalho, será explicada a história da supercondutividade, o princípio do efeito Meissner (diamagnetismo perfeito), a ocorrência de resistência zero e correntes permanentes. A teoria BCS (John Bardeen, Leon Cooper, e John Robert Schrieffer), a diferença entre os tipos de supercondutores, e os novos supercondutores que podem revolucionar a indústria, também serão apresentados.

Finalmente, serão igualmente expostos os desafios práticos encontrados durante o desenvolvimento do projeto e os resultados alcançados.

**Palavras-chave:** Levitação Quântica. Bloqueio Quântico. Trem de Levitação. Mobüs. Supercondutores. Supercondutores do Tipo 2. Efeito Meissner. Resistência zero. Corrente persistente. Teoria BCS

## ABSTRACT

The present work will address the phenomenon of quantum levitation (Quantum Locking) found in type 2 superconducting materials when cooled below their critical superconductivity temperature and exposed to a critical range of magnetic field, as well as a practical application. This application was the result of a 6-month internship at the Luxembourg Science Center and consists of the experiment of making a miniature train levitate around a track made of permanent magnets, using superconducting type 2 cooled pellets, for more than one minute.

Throughout the paper the history of superconductivity, the principle of the Meissner effect (perfect diamagnetism), and the occurrence of zero resistance and permanent currents will be explained. The BCS theory (John Bardeen, Leon Cooper, e John Robert Schrieffer), the difference between the types of superconductors, and the new superconductors that may revolutionize the industry will also be presented.

Finally, the practical challenges encountered during the development of the project and the results achieved will also be exposed.

**Key words:** Quantum Locking. Quantum levitation. Levitation train. Mobüs. Supercondutores. Supercondutores do tipo 2. Meissner Effect. Zero Resistance. Permanent current. BCS Theory



## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - GGM 11 .....	15
<b>Figura 2</b> - Usina a gás de Differdange.....	16
<b>Figura 3</b> - Projeto do arquiteto Louis Didier .....	16
<b>Figura 4</b> - Projeto do arquiteto Louis Didier .....	17
<b>Figura 5</b> – Renderização de um MagLev. ....	19
<b>Figura 6</b> – Ímã em levitação quântica sobre um supercondutor em formato de anel....	20
<b>Figura 7</b> - Supercondutor revestido em papel alumínio e papel higiênico em levitação	21
<b>Figura 8</b> - Supercondutores sob um campo magnético H em diferentes temperaturas.	26
<b>Figura 9</b> - Supercondutores Tp.2 sob diferentes c. magnéticos H e temperaturas T;....	27
<b>Figura 10</b> - Visualização 2D dos pares de Cooper .....	30
<b>Figura 11</b> - Pó de YCBO .....	31
<b>Figura 12</b> - Efeito Meissner em um ímã em formato de anel.....	33
<b>Figura 13</b> - Representação da estrutura cristalina dos supercondutores.....	37
<b>Figura 14</b> - Linhas de campo magnético em um condutor não ferromagnético.....	38
<b>Figura 15</b> - Representação das linhas de campos magnético no Efeito Meissner .....	38
<b>Figura 16</b> - Representação de correntes persistentes.....	40
<b>Figura 17</b> - Adaptação da estrutura cristalina às linhas de vortice .....	41
<b>Figura 18</b> - Oxidos de Mercúrio .....	42
<b>Figura 19</b> - BSCCO .....	42
<b>Figura 20</b> - YCBO .....	42
<b>Figura 21</b> - Renderização da combinação de ímãs .....	45
<b>Figura 22</b> - Ímãs de Neodímio N52 utilizado e seus polos .....	45
<b>Figura 23</b> - Amostra da pista .....	46
<b>Figura 24</b> - Explicação de Mobüs.....	47
<b>Figura 25</b> - Mobüs percorrida por formigas .....	47
<b>Figura 26</b> - Renderização do modelo da pista .....	48
<b>Figura 27</b> - Aproximação simples do campo magnético .....	48
<b>Figura 28</b> - Pista finalizada.....	48
<b>Figura 29</b> - Foto dos dois métodos de obtenção da levitação quântica .....	51
<b>Figura 30</b> - Protótipos rápidos para teste.....	53
<b>Figura 31</b> - Comportamento do azoto dentro dos protótipos.....	53
<b>Figura 32</b> – Protótipo oficial 1.....	54
<b>Figura 33</b> - Protótipo oficial 2 .....	55
<b>Figura 34</b> – Modelos impressos.....	55
<b>Figura 35</b> - Modelo final 1 .....	57
<b>Figura 36</b> - Modelo final 2 .....	58
<b>Figura 37</b> - Representação do centro de gravidade .....	58
<b>Figura 38</b> - Modelo final 3 .....	59
<b>Figura 39</b> - Recipiente de arrefecimento do sistema .....	60
<b>Figura 40</b> - Vista de corte lateral do sistema de arrefecimento .....	61
<b>Figura 41</b> - Mecanismo de remoção do veículo .....	61

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Intensidade dos campos magnéticos a cada distância .....	46
<b>Tabela 2</b> - Numeração das pastilhas .....	51
<b>Tabela 3</b> - Tempos de levitação em diferentes alturas de 3 pastilhas de espessuras diferentes .....	51
<b>Tabela 4</b> - Pesos e tempo de resistência de cada pastilha .....	52
<b>Tabela 5</b> - Medidas de tempo e peso suportado pelos protótipos oficiais. ....	55
<b>Tabela 6</b> - Resultados de diferentes esponjas no protótipo 2.....	56

## LISTA DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1</b> - Gráfico da resistência elétrica em Condutores, Supercondutores e Semicondutores .....	37
<b>Gráfico 2</b> - Gráfico de comportamento dos supercondutores de tipo 1 .....	39
<b>Gráfico 3</b> - Gráfico de comportamento dos supercondutores de tipo 2.....	40
<b>Gráfico 4</b> - Gráfico de comportamento do YBCO.....	43
<b>Gráfico 5</b> - Gráfico de comportamento do YBCO com zora atingível pelo resfriamento com azoto líquido representado em amarelo .....	44
<b>Gráfico 6</b> - Região do gráfico onde encontra se o efeito Meissner, representada em amarelo .....	49
<b>Gráfico 7</b> - Região no gráfico para se comportar como um condutor metálico, representada em amarelo .....	50
<b>Gráfico 8</b> - Região no gráfico para obter a levitação quântica, representada em amarelo .....	50

## LISTA DE SIGLAS

**T** : Temperatura

**Tc**: Temperatura crítica

**Tc1**: Temperatura crítica inferior

**Tc2**: Temperatura crítica superior

**H**: Intensidade do campo magnético

**Hc**: Campo magnético crítico

**Hc1**: Campo magnético crítico inferior

**Hc2**: Campo magnético crítico superior

**K**: Kelvin

**° C**: Celsius

**G**: Gauss

**A**: Ampere

**cm**: centímetro

**CNC**: Máquina de usinagem por comando numérico

**Sn**: Samário

**Pb**: Chumbo

**He**: Hélio

**Lhe**: Hélio líquido

**La**: Lantânio

**Hg**: Mercúrio

**In**: Índium

**Y**: Ítrio

**Nb**: Nióbio

**Ga**: Gálio

**Cu**: Cobre

**Tl**: Tálho

**V**: Vanádio

**Ba**: Bário

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>Introdução .....</b>	<b>13</b>
1.1	Contextualização.....	14
1.2	Justificativa .....	18
1.3	Motivação .....	18
1.4	Objetivos.....	19
1.4.1	Objetivo Geral .....	20
1.4.2	Objetivos específicos .....	21
1.5	Estrutura do trabalho .....	22
<b>2</b>	<b>Revisão Bibliográfica.....</b>	<b>22</b>
2.1	História da supercondutividade .....	22
2.2	Resistência Zero .....	23
2.3	Corrente Persistente .....	23
2.4	Influência do Campo Magnético .....	24
2.5	Efeito Meissner: Diamagnetismo Perfeito.....	25
2.6	Supercondutores de Tipo 1 .....	26
2.7	Supercondutores Tipo 2 .....	26
2.8	Teoria BCS.....	29
2.9	Supercondutores de alta temperatura .....	31
2.10	High-Tc e Low-Tc.....	32
<b>3</b>	<b>Metodologia.....</b>	<b>34</b>
<b>4</b>	<b>Resultados e Discussões.....</b>	<b>36</b>
4.1	Compreensão e Aplicação .....	36
4.2	Escolha do supercondutor .....	41
4.3	Desenvolvimento do trilho magnético.....	45
4.4	Protótipos, testes e medições.....	49
4.5	Concepção de veículos .....	57
<b>5</b>	<b>Conclusões .....</b>	<b>62</b>
	<b>Referências Bibliográficas.....</b>	<b>63</b>

## 1 INTRODUÇÃO

“À medida que as sociedades ao redor do mundo estão evoluindo, e que as cidades estão se tornando mais congestionadas, nossos meios de transporte atuais não serão mais capazes de sustentar áreas tão cheias. Além do limite quantitativo, nossos sistemas de transportes estão ficando obsoletos devido as baixas eficiências energéticas. A presença de atrito nesses sistemas faz com que parte da energia seja desperdiçada em energia térmica em vez de energia cinética. Se a energia térmica desperdiçada fosse redirecionada para a energia cinética, os futuros sistemas de transporte seriam muito mais eficientes, permitindo mais velocidade e menos energia consumida.”

(ABABOU,2020, p.3)

A crítica de Ababou ao nosso atual sistema de transporte é pertinente e excita a busca de uma solução futura para os meios de locomoção. Como diminuir o atrito dos veículos? A levitação magnética é sempre uma das primeiras respostas para a questão. No entanto, a levitação magnética comum não é a única resposta e tão pouco a mais eficiente e é isso que será explorado ao decorrer deste trabalho.

Nos últimos anos, o mundo tem tomado mais consciência dos impactos ambientais e os efeitos que estamos gerando no planeta. O aquecimento global é o mais falado, mas é, na verdade, apenas um deles. Existem muitos outros impactos que preocupam a sociedade científica.

Baseado nisso, muitos países adotaram uma série de medidas que deram início a buscas de soluções para nosso futuro. Dentre as medidas estão modificações de leis e impostos que impactam diretamente a economia, possuindo um grande peso financeiro, e que servem de incentivo para que o nosso mundo capitalista se lance em corridas por novas tecnologias.

Um grande exemplo está no ramo de energias. Empresas nunca procuraram tanto desenvolver formas sustentáveis de obter sua energia e de evitar impactos ambientais. Apesar de ser um interesse econômico nas entrelinhas, isso é uma ótima notícia para o planeta. E não são só as empresas que vêm mudando. Em muitos países a qualificação energética de residências e dos equipamentos elétricos pessoais têm impacto direto nas contribuições fiscais do cidadão. Diversos exemplos podem ser citados, mas o fato é que a corrida energética está mais viva do que nunca.

É possível dividir essa corrida em pelo menos 4 grupos. Um é o de produção de energia limpa, onde buscam formas limpas e eficientes de gerar energia. Outro é o de estocagem, que busca uma solução para estocar a energia produzida que não é utilizada em um determinado momento para ser utilizada em outro. O terceiro é o de transmissão, onde é explorada a melhor forma de distribuição de energia. E o último grupo, que influencia todos os outros indiretamente é o de eficiência energética, que busca meios de melhorar eficiência energética de todos os equipamentos utilizados nos grupos anteriores e em residências, indústrias, veículos etc.

Dentro desse último grupo, a supercondutividade vem sendo estudada como uma chave para uma revolução da eficiência energética dos aparelhos elétricos do futuro. O fenômeno foi descoberto no início do século passado, mas obteve suas maiores aplicações e avanços nos últimos 30 anos. A supercondutividade, como o nome diz, possibilita que materiais conduzam eletricidade com resistência muito pequena ou até mesmo nula por um período. Apesar dessa propriedade incrível, os materiais precisam estar resfriados à temperaturas extremamente baixas, impossibilitando então sua aplicação na maioria das vezes.

Desde então, cientistas seguem em uma grande busca por materiais que apresentem supercondutividade em temperaturas mais altas, próximas da temperatura ambiente. Isso por si só já seria um marco para a humanidade, mas a propriedade supercondutora promete ainda mais. Além da supercondutividade, esses mesmos materiais podem nos levar a levitação quântica.

## **1.1 Contextualização**

Como parte da conclusão do curso de Engenharia Mecânica da École Nationale d'Ingénieurs de Metz, França, um estágio foi realizado no Centro de Ciências de Luxemburgo, Luxembourg Science Center (LSC).

Situado no país com maior PIB per capita do mundo, o centro tem o apoio do governo de Luxemburgo e de inúmeras empresas multinacionais no seu objetivo de desenvolver e disseminar a ciência e as novas tecnologias. Ele é aberto ao público e recebe todo tipo de visitante e/ou parceiros, como grupos de estudantes (ensino fundamental, médio, graduação, pós-graduação, turistas, curiosos e membros do governo. Através de aulas, workshops, shows e livre exploração, a ciência entra na vida de milhares de visitantes todos os meses.

O centro, hoje, possui aproximadamente 4000 metros quadrados, com um grande hall de exposição, laboratórios de diversas áreas, um planetário, 15 salas temáticas (acústica, mecânica, ótica, fluidos, matemática, biologia, propagação de ondas, mecatrônica, informática, reciclagem, materiais, gastronômica, química, astronomia, tecnologia 5G) e, também, um complexo astronômico com diversos telescópios, radiotelescópios e equipamentos de última geração.

Dentre as 15 salas, a sala de astronomia faz parte do programa de incentivo a novos astronautas e é patrocinada e direcionada pela ESA (European Space Agency). No ano de 2022 tivemos o privilégio de fazer uma videochamada de 30 minutos com a astronauta Samantha Cristoforetti diretamente da ISS (International Space Station), onde pedimos para que realizassem alguns experimentos simples que tínhamos curiosidades dos resultados no espaço.

A importância do Luxembourg Science Center pro país não é uma dúvida, no entanto, sua origem é completamente diferente do que muitos imaginam. O fundador Nicolas Didier, ex-cônsul de Luxemburgo em Nova Iorque, iniciou todo o projeto quando um dos maiores motores a combustão do mundo, localizado em Luxemburgo e usado para gerar energia elétrica na época, foi declarado patrimônio Nacional (**Figura 1**).



**Figura 1** - GGM 11

Fonte: Luxembourg Science Center

Nesse momento, ele teve a ideia de criar um museu da energia no local onde o motor estava instalado, a antiga usina a gás de Differdange (**Figura 2**).





**Figura 2** - Usina a gás de Differdange - Luxembourg  
Fonte: Luxembourg Science Center

Ainda vivendo nos Estados Unidos, começou a visitar museus e perceber que eles não eram muito interessantes. Ele visitou alguns centros de ciência, e como amante da ciência, pensou: “Porque não um Centro de Ciências?”. A partir dessa ideia, ele visitou inúmeros centros no mundo a fim de desenvolver a melhor ideia para Luxemburgo.

Hoje, o Luxembourg Science Center ([www.science-center.lu](http://www.science-center.lu)) recebe visitantes do mundo inteiro e foi considerado um projeto de muito sucesso e um plano de expansão foi aprovado pelo governo local que começou em janeiro de 2024 e tem finalização prevista para maio de 2027. O futuro centro, representado nas figuras a seguir, terá aproximadamente 33.000 metros quadrados, mais de 90 salas, o maior planetário da Europa e muito mais.



**Figura 3** - Projeto do arquiteto Louis Didier  
Fonte: Luxembourg Science Center



**Figura 4** - Projeto do arquiteto Louis Didier  
Fonte: Luxembourg Science Center



**Figura 5** - Projeto do arquiteto Louis Didier  
Fonte: Luxembourg Science Center

Didier é ainda o diretor e conta com doutores para cada área da ciência. Meu estágio seria focado no desenvolvimento de projetos de novas tecnologias, cada um criado e conduzido pelo responsável de cada área. As opções eram diversas, visto que existiam mais de 30 projetos a serem desenvolvidos. O “Trem à levitação quântica” chamou-me a atenção pela sua complexidade e a curiosidade que me gerou. Além de ser uma área pouco explorada atualmente. A escolha foi aprovada pelo responsável, Guillaume Trap, doutor em Física, que me apresentou os desafios e os objetivos do projeto.

## 1.2 Justificativa

A levitação quântica por si só assusta as pessoas e parece uma tecnologia muito distante de nosso mundo. No entanto, isso não é verdade. Os materiais supercondutores que permitem essa levitação, já são vastamente utilizados no nosso cotidiano, em diversos equipamentos médicos, motores elétricos, usinas hidrelétricas, termoelétricas, nucleares, entre outros. Esses materiais possuem uma grande eficiência de condutividade quando resfriados a uma certa temperatura, o que evita perdas de energia em inúmeros equipamentos elétricos.

Até agora, grande parte da energia que geramos é perdida devido à resistência elétrica, que é dissipada na forma de calor. Portanto, materiais que possuem propriedades supercondutoras em temperatura mais alta podem revolucionar a indústria elétrica. E, é por esse motivo que as buscas por eles aumentaram nos últimos anos.

Apesar desse motivo ser bem satisfatório, é preciso alertar o mundo para um outro resultado positivo dessa busca que não é explorado como deveria, mas que pode significar uma revolução ainda mais importante para a humanidade.

Além da supercondutividade, os resultados dessas pesquisas, permitirão também nos servir da levitação quântica nessas temperaturas mais altas. Sim, imagine a levitação ser utilizada no dia a dia como qualquer outro mecanismo. É... seria incrível!

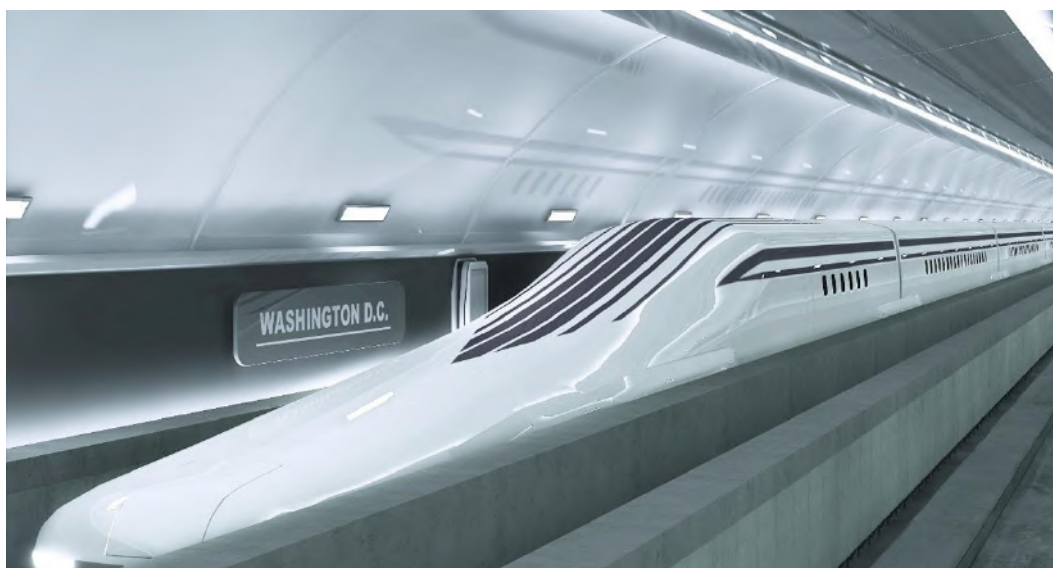
A fim de desmistificar essa levitação e entender como ela pode ser usada em aplicações reais, este trabalho teve como intuito estudar os supercondutores e seus fenômenos, assim como desenvolver uma demonstração prática para incentivar o desenvolvimento dessa tecnologia no país de Luxemburgo e no mundo.

## 1.3 Motivação

O principal fundamento do projeto era de desenvolver um experimento replicável para demonstrar em escala real a levitação quântica e uma de suas aplicações. Esse experimento seria utilizado para apresentar a tecnologia durante os workshops e shows de eletromagnetismo e suas tecnologias. Através disso, poderíamos incentivar o desenvolvimento da tecnologia no país e no mundo, ressaltar sua importância e mostrar as aplicações num futuro próximo.

Ao introduzir o assunto de levitação, é comum pensar no trem MagLev (**Figura 6**), inicialmente construído no Japão. No entanto, apesar do trem utilizar levitação

magnética, ele não utiliza a levitação quântica (Quantum locking). As tecnologias são completamente diferentes. A levitação magnética é obtida através da combinação de ímãs permanentes e eletroímãs que utilizam eletricidade para gerar a levitação. Nessa combinação supercondutores também são utilizados, mas com intuito de aumentar a eficiência do sistema com a supercondutividade do material. O presente trabalho demonstra uma tecnologia completamente diferente, onde obtemos a levitação “gratuita”. Na verdade, seria gratuita se não fosse o resfriamento do sistema, cujo custo ainda é alto, mas que provavelmente não o será no futuro, considerando a bela caminhada pelo desenvolvimento de supercondutores de temperaturas mais altas.



**Figura 6** – Renderização de um MagLev.

Fonte: Shutterstock

Os supercondutores sempre foram materiais caros, principalmente os de tipo 2 que são criados em laboratório. No entanto, novos supercondutores do tipo dois utilizam substâncias abundantes e que se produzidos em grande escala, se tornariam baratos. Quando encontrarmos um material com supercondutividade em temperatura próxima da temperatura ambiente, poderemos, por exemplo, construir um trem muito mais eficaz e barato que o MagLev.

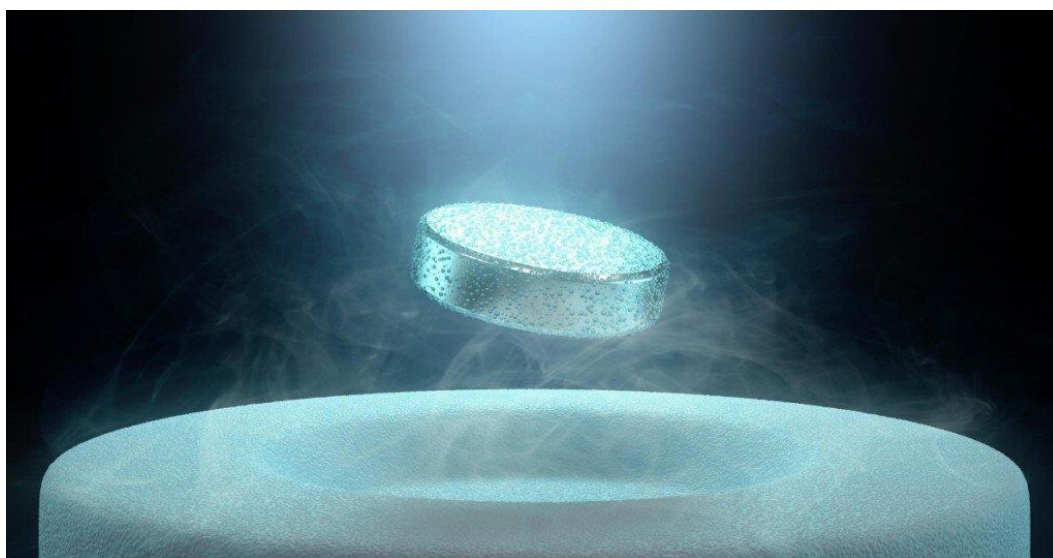
#### **1.4 Objetivos**

Apesar da levitação quântica ter milhares de aplicações no nosso futuro, a aplicação em trens foi ressaltada no item anterior, justamente porque o projeto foca em mostrar a tecnologia aplicada em uma miniatura de trem.

### 1.4.1 Objetivo Geral

Como experimento para demonstrar em escala real a levitação quântica, foi proposto uma miniatura de trem, que através de pastilhas de materiais supercondutoras resfriadas, levitaria em torno de uma pista magnética por um determinado tempo. Esse experimento deveria ser replicável e simples a fim de que as pessoas, que não participassem do seu desenvolvimento, pudessem utilizá-lo nas apresentações.

A levitação quântica (Quantum Locking) é um fenômeno onde um supercondutor de tipo 2 abaixo da sua temperatura supercondutora (por exemplo  $-181^{\circ}\text{C}$ ), sob uma faixa de campo magnético entre dois pontos críticos, levitará e será bloqueado a uma certa distância da fonte magnética (Figura 7).



**Figura 7** – Ímã em levitação quântica sobre um supercondutor em formato de anel

Fonte: Shutterstock

Embora possa parecer incompreensível no início, esse princípio será explicado ao decorrer desse trabalho. Existem muitas maneiras de utilizar o princípio para criar uma demonstração interessante, mas a proposta de levitar um veículo semelhante a um trem foi de longe a mais acolhida pela equipe, visto que é uma real aplicação da tecnologia.

A ideia é fisicamente possível, mas pode ser muito mais complicada do que o esperado. Uma universidade israelense teria feito um projeto parecido em 2020 onde resfriariam as pastilhas supercondutoras, revestidas em papel higiênico e papel alumínio (Figura 8), em nitrogênio líquido, mas, infelizmente, não ultrapassaram 30 segundos de levitação.



**Figura 8** - Supercondutor revestido em papel alumínio e papel higiênico em levitação

Fonte: Tel Aviv University, Israel

Além do desenvolvimento do veículo, também seria necessário desenvolver uma pista magnética na qual o trem pudesse percorrer enquanto levitasse a partir de um pequeno impulso inicial.

#### 1.4.2 Objetivos específicos

Considerando que o experimento seria apresentado ao público, ele deveria respeitar os seguintes requisitos listados pelo centro de ciência:

- ⇒ **Design:** ser esteticamente bonito para atrair a atenção do público; ter um design futurista, visto que é uma tecnologia a ser aplicada no futuro; deve -se utilizar cores neutras.
- ⇒ **Segurança:** ser totalmente segura aos que manuseiam o experimento e aos que assistem; desenvolver um manual de utilização para evitar o manuseio incorreto.
- ⇒ **Experiência:** ser de fácil manuseio para os utilizadores; ser espetacular para quem assiste; ter o máximo de interação possível; ser contraintuitivo se possível
- ⇒ **Movível:** o experimento deveria ser movível para ser exposto em exposições de ciência e eventos específicos; não ultrapassar 200 quilogramas.
- ⇒ **Estável:** a estrutura deveria ser sólida para evitar acidentes ocasionados por movimentos inesperados
- ⇒ **Manutenção:** O experimento deveria ser de fácil e rápida manutenção.
- ⇒ **Dimensões:** O experimento não deveria ocupar mais  $4m^2$  e o trem deveria ser facilmente segurado com uma mão.
- ⇒ **Tempo do experimento:** O experimento completo deveria ter durar no máximo 10 minutos; o trem deveria levitar ao menos 1 minuto.

## **1.5 Estrutura do trabalho**

O presente trabalho será apresentado em uma ordem lógica para facilitar a compreensão do assunto e das tomadas de decisão no desenvolvimento do projeto. A ordem cronológica não foi escolhida pois grande parte do desenvolvimento teórico foi realizado após o fim do estágio com o intuito de desenvolver um trabalho completo e fundamentado.

Inicialmente, será apresentada a revisão bibliográfica, onde serão abordado os princípios e fundamentos do projeto. Nela serão abordados a origem e o princípio da supercondutividade. Em seguida serão expostos os fenômenos de resistência zero, corrente persistente, a influência dos campos magnéticos no interior do supercondutor, assim como o Efeito Meissner (Diamagnetismo perfeito). Posteriormente, os tipos de supercondutores, a Teoria BCS e os pares de Cooper, serão apresentados. Para finalizar, será explicado a importância dos novos supercondutores de alta temperatura crítica.

No item metodologia, partindo da ideia de que os princípios físicos foram bem compreendidos, o desenrolar do projeto será explicado e, os requisitos e as etapas realizadas, para alcançar o objetivo final do projeto, serão expostos.

Após a Metodologia, em Resultados e Discussões, a aplicação da tecnologia no projeto será compreendida. Seguida da explicação da escolha do supercondutor de tipo 2, dos ímãs a serem utilizados e de teste realizados para tais. Posteriormente o desenvolvimento da pista será abordado, o desenvolvimento dos protótipos para teste assim como o desafio na busca de uma isolamento térmica ideal deles. Para finalizar, será abordado o desenvolvimento do veículo final e do mecanismo de resfriamento desenvolvido para o mesmo.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 História da supercondutividade**

O fenômeno da supercondutividade, em que a eletricidade flui sem resistência, foi descoberto pela primeira vez por Kamerlingh Onnes (físico e cientista holandês, 1853-1926) da Universidade de Leiden. Onnes desafiou a liquefação do gás hélio (He) e conseguiu liquidificá-lo em 10 de julho de 1908. Como resultado da liquefação de He, foi registrado como o primeiro cientista a atingir a temperatura mais baixa (4,2 K, -269,1 °C) (ONNES, 1911, 120b:124c). Depois disso, a sua equipe de investigação mediu a

condutividade eléctrica de metais puros a baixas temperaturas. Em 8 de Abril de 1911, descobriu que a 4,2 K, a resistência num fio sólido de mercúrio imerso em Hélio líquido (LHe) desapareceu subitamente (MEISSNER, 1933, p21:787). Onnes foi galardoado com o Prémio Nobel da Física em 1913 pelas realizações de atingir a temperatura mais baixa através da liquefação de He e pelo trabalho de investigação sobre as propriedades eléctricas dos metais a baixas temperaturas.

## **2.2 Resistência Zero**

Após a liquefação bem-sucedida do gás He, Onnes estudou a resistência eléctrica do metal a baixa temperatura. A sua equipe de investigação escolheu o mercúrio (Hg) como tema de investigação, uma vez que o mercúrio é um líquido à temperatura ambiente e como era fácil fazer Hg puro sem impurezas.

O objetivo de tal estudo era minimizar a influência das impurezas sobre a resistência do Hg. A sua equipe de investigação baixou a temperatura durante a medição da resistência eléctrica de Hg. Surpreendentemente, a resistência de Hg desapareceu a uma temperatura específica e ele descobriu o fenómeno superconductor de resistência zero (MEISSNER, 1933, p21:787). Ele chamou o fenómeno de "supercondutividade".

A equipe de investigação confirmou então a supercondutividade de outros metais como o chumbo (Pb) e a lata (Sn) (SHLYK, KRABBES, FUCHS, NENKOV, SCHÜPP, 2005, p18:10).

## **2.3 Corrente Persistente**

Onnes esperava que a resistência zero dos supercondutores mudasse a indústria energética de forma inovadora. Como a resistência dos supercondutores é zero, os supercondutores não têm perda de energia. A eletricidade pode fluir infinitamente no circuito feito de superconductor. É também possível fabricar um íman superconductor que gera um grande campo magnético. Quando a transmissão infinita de energia e o grande campo magnético são postos em prática, o fenómeno da supercondutividade traz inovação à indústria energética.

Onnes fez experiências para confirmar a perda eléctrica nula do superconductor. A equipe de investigação fez um circuito fechado superconductor utilizando fios Pb (KIM, KUK, HONG, SUNG, HAN, 1998, p334:392). O circuito foi arrefecido utilizando LHe, e um campo magnético foi aplicado ao circuito a partir do exterior. Esta experiência foi



levada a diante em 1914. Quando um campo magnético externo é aplicado ao condutor, uma corrente é induzida no condutor de acordo com a lei de Faraday (KIM, QADIR, MAHMOOD , 2007, p463:465). Uma bússola foi colocada fora do circuito para medir o campo magnético induzido pela super corrente. Quando aplicavam o campo magnético ao circuito fechado supercondutor, a bússola movia-se devido ao campo magnético induzido. Além disso, descobriram que a corrente induzida no circuito fechado supercondutor não desapareceu em 24 h. Isto era comparável à corrente induzida de um condutor normal que desapareceu pouco tempo depois. Ele ficou encantado por encontrar a corrente persistente do supercondutor.

## **2.4 Influência do Campo Magnético**

Onnes pensou que os dispositivos sem perda de energia podem ser feitos a partir do resultado da experiência de corrente persistente. A eficiência energética de motores eléctricos, cabos, geradores e ímãs podem ser significativamente melhorados utilizando supercondutores. Além disso, devido à grande capacidade de corrente do supercondutor, os dispositivos eléctricos podem ser reduzidos.

Ele previu que a bobina supercondutora poderia gerar um grande campo magnético de 10 Tesla (1 Tesla = 100.000 Gauss). Contudo, não foi capaz de produzir um grande campo magnético a partir da experiência de corrente persistente. Quando a corrente excedeu um valor crítico, foi gerada resistência nos fios supercondutores. Os supercondutores metálicos não conseguiram resistir aos pequenos campos magnéticos de várias centenas de G. Para utilizar o supercondutor para aplicações práticas, o supercondutor deveria resistir a um grande campo magnético de vários T. Infelizmente, a supercondutividade dos supercondutores metálicos descobertos em estudos anteriores foi destruída no pequeno campo magnético 600 G (REN, WEINSTEIN, LIU, 1995, p251). Mais tarde, foi entendido que o campo magnético interfere com o fluxo da corrente supercondutora.

Ele passou muito tempo tentando compreender a influência do campo magnético na supercondutividade até à Primeira Guerra Mundial. O seu principal objetivo de investigação era fazer um poderoso ímã supercondutor. Contudo, não conseguiu realizar este sonho durante a sua vida. Foram necessárias mais algumas décadas para que este sonho se tornasse realidade. Quarenta anos após a descoberta da supercondutividade, o seu sonho foi parcialmente realizado por outros investigadores com a descoberta de

supercondutores de Tipo 2 que mostram elevadas capacidades de corrente em campos magnéticos elevados (TOMITA, MURAKAMI, 2003, p421).

## **2.5 Efeito Meissner: Diamagnetismo Perfeito**

Vinte anos após a descoberta de resistência zero por Onnes, em 1933, o físico alemão Meissner (F.W. Meissner, 1882-1974) e o seu estudante Ochsenfeld descobriram outro fenômeno supercondutor, o diamagnetismo perfeito (GRUSS, FUCHS, 2001, p79). Este fenômeno, em que o supercondutor expulsa o campo magnético, é chamado "o efeito Meissner".

Ainda em 1933, Meissner e Ochsenfeld tentaram medir a distribuição do campo magnético num estado supercondutor para monocristais de alta pureza de estanho (Sn) e Chumbo (Pb). Encheram o recipiente de arrefecimento com Hélio líquido (Lhe) e colocaram-lhe uma placa de Pb. Depois, colocaram um pequeno íman de ferrite no topo da placa de Pb. O ímã de ferrite levitou acima da placa de Pb sem tocar na base do prato.

Quando a placa de Pb é colocada em LHe, a temperatura do chumbo diminui e a placa torna-se supercondutora. Uma vez que a placa Pb no estado supercondutor repele a força magnética do íman de ferrite, o íman de ferrite levita-se acima da placa Pb. Quando a placa Pb está no estado normal de condução, o íman de ferrite cai para a placa Pb. O diamagnetismo perfeito não é um fenômeno causado por resistência zero, mas outra característica de supercondutividade.

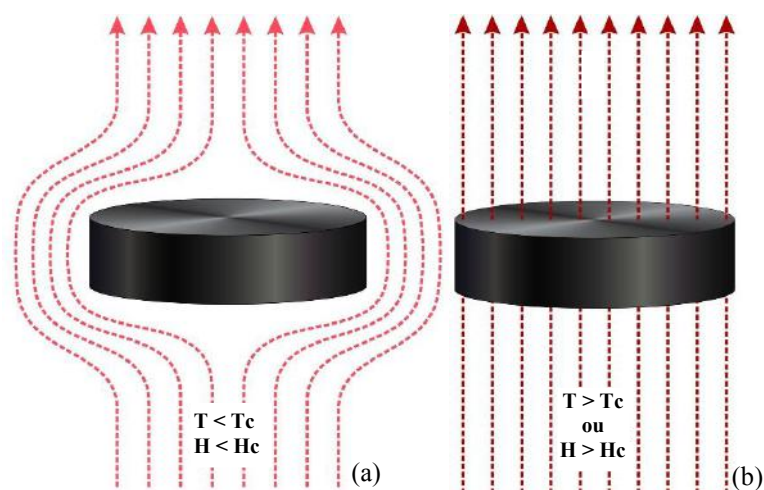
Foi difícil conduzir as experiências de efeito Meissner em laboratórios científicos, pois a temperatura crítica ( $T_c$ ) dos supercondutores descobertos até então era bastante baixa. Apenas alguns institutos de investigação equipados com um liquefador de He foram capazes de realizar a experiência do efeito Meissner.

No entanto, após a descoberta do supercondutor La-Ba-Cu-O por Bednorz e Müller em 1986, muitos supercondutores de óxido com uma  $T_c$  superior à temperatura do azoto líquido (LN<sub>2</sub>) (77 K) foram descobertos (VASILIU, 1998, p303). Agora, podemos facilmente observar o efeito Meissner em laboratórios científicos utilizando nitrogênio líquido. Inclusive, este experimento é apresentado nos shows de magnetismo realizados no Luxembourg Science Center.

## 2.6 Supercondutores de Tipo 1

Os supercondutores são classificados em supercondutores de Tipo 1 e supercondutores de Tipo 2, dependendo de como reagem ao campo magnético externo (H).

A **Figura 9** mostra linhas de fluxo magnético em estado supercondutor e estado normal do supercondutor de Tipo 1.



**Figura 9** - Supercondutores sob um campo magnético H em diferentes temperaturas.

Fonte: Shutterstock, modificada pelo autor

Os supercondutores de Tipo 1 são formados principalmente pelos metais e algumas ligas metálicas e, em geral, são condutores de eletricidade à temperatura ambiente. Nos supercondutores de Tipo 1, o estado supercondutor é subitamente destruído quando o campo magnético externo excede o valor crítico ( $H_c$ ) ou a temperatura (T) do supercondutor é superior a  $T_c$ . Se  $T < T_c$  e  $H < H_c$ , o campo magnético é empurrado para fora do supercondutor (**Figura 9.a**), e se  $T > T_c$  ou  $H > H_c$ , o campo magnético passa através do supercondutor (**Figura 9.b**).

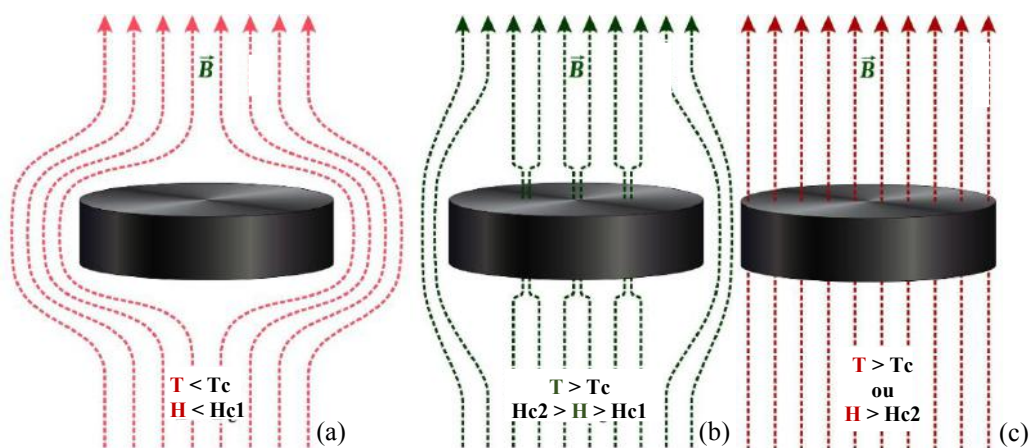
## 2.7 Supercondutores Tipo 2

Os supercondutores de Tipo 2 são formados por ligas metálicas e outros compostos. Em geral, as temperaturas críticas ( $T_c$ ) associadas a eles são muito mais altas que as dos supercondutores do Tipo 1, como é o caso das cerâmicas baseadas em óxidos de cobre.

O cientista que relatou os resultados mais notáveis na super condução da teoria depois de Onnes foi o físico soviético Lev Davidovich Landau (1908-1968). Ele lançou uma ideia para explicar a relação entre a supercondutividade e o campo magnético

juntamente com o físico teórico soviético Vitaly Ginzburg (1916- 2009). Desenvolveram então a teoria de Ginzburg-Landau (GL) para explicar as propriedades fundamentais dos supercondutores em 1950 (NOUGEM, 2004, p31). A abordagem foi baseada na teoria geral da transição de fase de segunda ordem proposta por Landau em 1937.

O  $H_c$  da maioria dos supercondutores de Tipo 1 não era elevado. Devido ao baixo valor  $H$ , é difícil utilizar supercondutores de Tipo 1 em aplicações práticas. Um novo material que mostrou supercondutividade em campos magnéticos elevados foi relatado por Shubnikov da Universidade de Kharkov da Ucrânia em 1935 (DIAS, SOTELO, 2015 p28). O material fabricado por Shubnikov era cristais de liga de chumbo-indium (Pb-In). Shubnikov salientou que existiam dois limites de campos magnéticos no supercondutor da liga. O seu trabalho continha novos resultados excitantes sobre as propriedades magnéticas dos supercondutores, mas ninguém prestou atenção ao seu papel. Em 1952, uma década após a publicação do seu trabalho, o físico russo Abrikosov teve interesse no trabalho de Shubnikov, que mostrou a presença de dois limites magnéticos no supercondutor de liga. Nos trabalhos publicados até agora, os fenômenos supercondutores foram descritos como os dois estados de um estado supercondutor e um estado normal. Contudo, de acordo com os resultados de Shubnikov, a relação campo magnético supercondutor nos supercondutores de liga não foi tão simples. As ligas Pb-In apresentavam dois limites de campo magnético. O supercondutor feito de liga é chamado "supercondutor de tipo 2".



**Figura 10** - Supercondutores Tp.2 sob diferentes c. magnéticos  $H$  e temperaturas  $T$ ;

Fonte: Shutterstock modificada pelo autor

A **Figura 10** mostra as linhas de fluxo magnético do supercondutor de Tipo 2. O supercondutor de Tipo 2 tem dois campos magnéticos críticos:  $H_{c1}$  e  $H_{c2}$ . Quando  $H < H_{c1}$ , o campo magnético não pode entrar no supercondutor (um estado supercondutor, **Figura 10a**). Quando  $H_{c1} < H < H_{c2}$ , o campo magnético penetra no supercondutor, e o

estado de supercondutor é destruído localmente em redor de um vórtice. Portanto, o estado supercondutor e o estado normal coexistem (um estado misto). O vórtice é frequentemente capturado por defeitos presentes na matriz supercondutora ( **Figura 10b**). Este fenómeno é chamado de "pino de fluxo magnético". Quando  $H > H_{c2}$ , o estado supercondutor é inteiramente destruído (um estado normal, **Figura 10c**).

Em 1957, um artigo intitulado "Sobre as propriedades magnéticas dos supercondutores do segundo grupo" foi publicado no JETP de Física Soviética (Zhou, Scruggs, Salama, 2006, p556). Este artigo explicava o movimento das linhas de fluxo em supercondutores de ligas. Depois disso, muitos materiais supercondutores de Tipo 2 foram descobertos (KIM, PARK, 2012, p255), e os trabalhos experimentais que se seguiram continuaram para provar a teoria.

Em 1961, os Laboratórios AT & T Bell nos Estados Unidos relataram resultados incríveis para o supercondutor de Tipo 2 como resultado dos estudos sobre as propriedades dos supercondutores do composto metálico realizados pelos investigadores durante um longo período. Um dos objetos de investigação foi o Nb<sub>3</sub>Sn cuja temperatura supercondutora é de 18 K (YOKOYAMA, 2003, p221). Eles mediram as propriedades atuais do Nb<sub>3</sub>Sn em função da temperatura e de um campo magnético externo. Surpreendentemente, o Nb<sub>3</sub>Sn mostrou densidades de corrente superiores a 100.000 A/cm<sup>2</sup> em campos magnéticos elevados de até 88 kG (8,8 T) (TOMITA, MURAKAMI, 2003, p421). Mais tarde, a existência de supercondutores de tipo 2 foi confirmada em muitos supercondutores de tipo liga. Os supercondutores de liga mostraram o fenómeno supercondutor mesmo em campos magnéticos elevados de várias dezenas de T. Nb<sub>3</sub>Sn é atualmente utilizado como fios supercondutores para gerar campos magnéticos elevados (CHIBA, OKADA, 2002, p80).

Abrikosov recebeu o Prémio Nobel da Física em 2003, 45 anos após a publicação do seu artigo. Shubnikov, que descobriu experimentalmente o supercondutor Tipo 2, infelizmente não teve a honra de ser um descobridor.

As substâncias de elemento único como Hg, Pb e Sn são supercondutores de Tipo 1 e os supercondutores de liga e óxido são supercondutores de Tipo 2. Aparelhos providos de supercondutores, tais como motores, geradores, ímanes e ressonância magnética médica, operam em ambientes de campo magnético. Os supercondutores de tipo 2 com características de corrente elevada em campos magnéticos elevados podem ser utilizados para estas aplicações. Compostos de liga como NbTi, Nb<sub>3</sub>Sn, MgB<sub>2</sub>, supercondutores de óxido tem T<sub>c</sub> elevada pertencem aos supercondutores de Tipo 2.

## 2.8 Teoria BCS

Após Onnes ter descoberto a supercondutividade, muita pesquisa foi feita para revelar o mecanismo da supercondutividade. A supercondutividade não pôde ser explicada teoricamente até 1950. No início da década de 1950, o Prof. John Bardeen, investigador pós-doutorado Leon Cooper e John Robert Schrieffer, estudante de pós-graduação, estudaram a teoria da supercondutividade na Universidade de Illinois, EUA. Bardeen estava interessado na transferência de electrões num estado supercondutor sem resistência. Ele pensava que a interação entre os elétrons e as vibrações da malha atômica (fonões) seria essencial na supercondutividade.

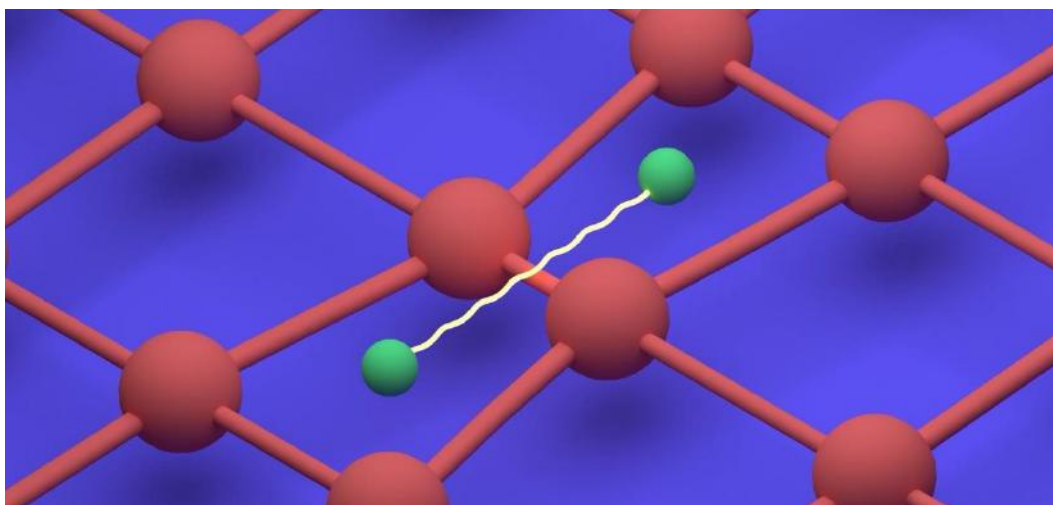
Herbert Fröhlich (1905-1991), um físico teórico, publicou um artigo descrevendo o estado em que os electrões se podem atrair uns aos outros (COOMBS, CAMPBELL, 1998, p225). Ele pensava que a supercondutividade era o resultado da interação entre os electrões e as oscilações do fonão. Sugeriu fortemente que a maioria dos supercondutores encontrados até agora têm uma resistência muito elevada à temperatura ambiente e que existe uma relação estreita entre a oscilação do fonão e a supercondutividade. A sua sugestão foi a seguinte:

Antes de examinarmos a interação entre a oscilação do fonão e os elétrons, assumimos que uma força atrativa atua entre os elétrons, e um elétron atrai íons com carga positiva, forma-se uma região de carga positiva (+). Os elétrons com o mesmo sinal de carga elétrica não se podem atrair diretamente um ao outro, mas se os íons com carga positiva circundarem os electrões, estes podem mover-se juntos para a região com carga positiva, que pode dizer-se ser a força atrativa que atua entre os dois elétrons. É um pensamento invulgar, mas esta suposição pode teoricamente servir como uma pista para explicar a supercondutividade.

Nos anos 50, verificou-se que a resistência era alterada quando os isótopos são adicionados ao supercondutor (HULL, 2000, p120). Os isótopos são variantes de elementos químicos específicos com números diferentes de nêutrons. Bardeen estava interessado nos resultados dos estudos isotópicos. Os isótopos são o mesmo elemento, e têm apenas uma massa diferente. O fato de o isótopo influenciar a supercondutividade implica que a massa do elemento afeta o movimento do elétron. Bardeen pensou que o conhecimento da física das partículas é necessário para clarificar a supercondutividade e convidou Cooper para a Universidade de Illinois.

Devia existir uma força atrativa entre os elétrons para explicar a supercondutividade. A lei clássica de Coulomb não permite a atração de elétrons porque os electrões repelir-se uns aos outros (WERFEL, 1998, p215). Assume-se que dois elétrons com giros diferentes se movem na direção oposta à mesma velocidade. Devido à interação entre eles e a matriz iónica carregada positivamente, a força atrativa entre elétrons pode tornar-se maior do que a força repulsiva.

Cooper sugeriu que se os elétrons com a mesma carga se atraíssem uns aos outros, eles se movimentariam em pares sem resistência. O par de elétrons que ele propôs para explicar a supercondutividade de resistência zero é chamado de "par Cooper" (**Figura 11**).



**Figura 11** - Visualização 2D dos pares de Cooper

Fonte: Shutterstock

Como mostrado na figura anterior, a atração dos elétrons pela deformação da malha de prótons se aluna com a força de repulsão entre eles. É como se houvesse uma corda imaginária entre eles.

Foi acrescentada uma interpretação matemática ao modelo de pares de elétrons de Cooper para completar o modelo de interação entre o elétron e a malha, que descreve a supercondutividade. Esta teoria é chamada a teoria BCS, nomeada em homenagem aos seus proponentes Bardeen, Cooper e Schrieffer. A teoria BCS apresentada em Physical Review (MORITA, 2006, p112) foi aceite como uma teoria que pode explicar completamente o fenómeno da supercondutividade. Bardeen, Cooper e Schrieffer receberam o Prémio Nobel da Física em 1972 pelas suas explicações teóricas dos fenómenos supercondutores. O Professor Bardeen é o único físico a ter recebido duas vezes o Prémio Nobel da Física.

## 2.9 Supercondutores de alta temperatura

Onnes descobriu o fenômeno supercondutor em 1911 (MEISSNER, 1933, p21:787). Em 1986, após mais de 70 anos, a  $T_c$  aumentou apenas 19 °C. A teoria BCS, que explicava o fenômeno supercondutor, dizia que o  $T_c$  não é tão elevado. Desde a descoberta do gálio nióbio ( $Nb_3Ge$ ,  $T_c = 23,3$  K) (KIM, PARK, 2012, p245) em 1973, que é um supercondutor do tipo liga metálica, não houve progresso na investigação sobre a síntese de novos materiais supercondutores. A  $T_c$  de todos os supercondutores encontrados até agora era inferior a 30 K, que é o limite de  $T_c$  proposto pela teoria BCS.

Karl Alexander Müller (nascido em 1927, um físico suíço) e Johannes Georg Bednorz (nascido em 1950, um físico alemão) do Laboratório de Física do Estado Sólido da IBM Zurique sintetizaram um novo material supercondutor na Primavera de 1986. Este foi o início dos supercondutores de alta tecnologia.

Bednorz e Müller sintetizam materiais supercondutores de óxido. Óxido de bário ( $BaO$ ), óxido de cobre ( $CuO$ ), e óxido de lantânio ( $La_2O_3$ ) foram utilizados como materiais em bruto para formar um novo óxido com uma estrutura perovskite. Sintetizaram muitos compostos à base de Lantânio (La) com várias composições químicas e condições de tratamento térmico, utilizando o método de reação em pó. Prepararam amostras em diferentes rácios de bário/lantânio (Ba/La). A  $T_c$  aumentou rapidamente em relação específica de Ba/La. Encontraram uma queda de resistência de cerca de 35 K na curva de resistência à temperatura do composto de óxido. A  $T_c$  do material foi superior aos supercondutores anteriormente relatados. Apresentaram um trabalho sobre a descoberta de novos materiais supercondutores a *Z. Physic B* (BUNESCU, 1998, p215).

Bednorz e Müller sintetizaram os compostos à base de La, misturando e aquecendo os pós crus. Teriam compactado os pós sintetizados numa forma semelhante ao grânulo apresentado na **Figura 12** e depois tratado termicamente sob várias condições.



**Figura 12** - Pó de YCBO  
Fonte: Shutterstock



Os materiais de óxido sintetizados por Bednorz e Müller eram rochosos e quebradiços, e têm baixa condutividade eléctrica à temperatura ambiente. A descoberta de novas substâncias requer entusiasmo e esforço. Eles tentaram sintetizar cerca de 300 óxidos ao longo de 3 anos. Como resultado destes esforços, sintetizaram com sucesso os óxidos à base de Lantânio com uma  $T_c$  de 35 K. A descoberta do novo óxido supercondutor de  $T_c$  elevado influenciou grandemente a comunidade científica mundial durante os finais dos anos 80.

Os resultados do trabalho de Bednorz e Müller são importantes em Física. A teoria BCS foi reconhecida como uma teoria que explica plenamente a supercondutividade. Os cientistas acreditavam que a teoria BCS resolvia todos os segredos da supercondutividade. O limite da  $T_c$  definido pela teoria BCS situava-se entre 30 e 40 K. Isto significa que nenhum material no universo exhibe fenómenos supercondutores acima dos 30-40 K.

No entanto, mais tarde, muitos supercondutores com um  $T_c$  superior ao limite de BCS foram encontrados em materiais de óxido (HÉBERT, SIMON, PROVOST, 1998, p299). Por exemplo,  $T_c$  de  $YBa_2Cu_3O_{7-y}$  (YBCO ou Y123) supercondutor em que o local La de óxido de La-Ba-Cu-O substituído por Y é de 93 K (HÉBERT, SIMON, PROVOST, 1998, p302). Os cientistas pensavam que havia um novo segredo por trás da supercondutividade que não tinham percebido, ou que a teoria BCS poderia ter sido modificada. Após a descoberta do novo supercondutor, muitos estudos começaram a descobrir novos materiais com uma  $T_c$  superior. Bednorz e Müller receberam o Prémio Nobel da Física em 1987, apenas um ano após a publicação do artigo.

## **2.10 High- $T_c$ e Low- $T_c$**

Os supercondutores são substâncias que exibem fenómenos supercondutores. No estudo inicial, "supercondutividade" significava que a resistência a uma determinada temperatura era zero. No entanto, o físico alemão Meissner descobriu que os supercondutores têm um fenómeno diamagnético perfeito que expulsa o campo magnético. Foi demonstrado que o diamagnetismo perfeito é outra característica da supercondutividade que é diferente da resistência zero. Portanto, quando se diz: "Este material é um supercondutor", o material deve ter resistência zero a uma determinada temperatura e, ao mesmo tempo, ser completamente diamagnético.

Os supercondutores de óxido encontrados depois do La-Ba-Cu-O são chamados "supercondutores de alta Tc". YBCO tem uma Tc de 93 K (-180 °C) e 14 K superior à temperatura do nitrogênio líquido (77 K, -196 °C). No entanto, esta temperatura é ainda bastante baixa. As pessoas chamam este supercondutor de óxido de um supercondutor "High Tc" porque o termo supercondutor "high-Tc" significa que a Tc do supercondutor é superior a 30K. Na verdade, existem outros materiais chamados supercondutores "Low Tc", com Tc inferior a 30 K. Por exemplo, o Tc de V<sub>3</sub>Ga e Nb<sub>3</sub>Sn, supercondutores "Low Tc", é 16,5 K e 18 K (OKA, 2008, p167) respectivamente. Em comparação com os supercondutores de baixa Tc, a Tc dos supercondutores de óxido é relativamente alta.

A teoria BCS, que se baseia na interação entre oscilação atômica e elétrons, ilustra claramente a supercondutividade dos supercondutores de baixa Tc. De acordo com a ela, a Tc deve ser inferior a 30-40 K, mas como já mencionado, após o supercondutor de óxido La-Ba-Cu-O, foram encontrados muitos outros supercondutores de alta Tc. A Tc dos supercondutores de óxido excedeu 100 K. Por exemplo, a Tc do Bi-Sr-Ca-Ca-Cu-O, Tl-Ba-Ca-Cu-O, e Hg-Ba-Ca-Cu-O são 110 K, 120 K, e 133 K, respectivamente. Isso sugere que a teoria BCS precisa de ser.

A descoberta de supercondutores de alto Tc permite que as experiências de efeito Meissner sejam realizadas em qualquer laboratório de ciência geral. A **Figura 13** mostra um simples experimento que demonstra o efeito Meissner do supercondutor de óxido de Tc elevado. O supercondutor de óxido, YBCO, está a levitar acima de um ímã de Nd-B-Fe em forma de anel. O supercondutor de óxido foi arrefecido utilizando Nitrogênio líquido. O diamagnetismo perfeito do supercondutor que expulsa a força magnética faz com que o supercondutor se equilibre acima do ímã em forma de anéis, devido a forma de seu campo magnético. Essa levitação ainda não é a levitação quântica que buscada nesse trabalho, pois o supercondutor se encontra no estado representado na **Figura 10a** e não no da **Figura 10b**.



**Figura 13** - Efeito Meissner em um ímã em formato de anel  
Fonte: Shutterstock

### 3 METODOLOGIA

O objetivo do projeto é desenvolver uma miniatura de trem de levitação que percorrerá uma pista e será usado no centro de ciências de Luxemburgo para workshops com o intuito de incentivar o desenvolvimento e a aplicação da tecnologia no país. O público alvo varia em termos de conhecimento e de expertise no assunto. Portanto é necessário desenvolver um experimento de simples utilização, mas que mostra toda a tecnologia envolvida.

O projeto foi iniciado em abril de 2021 e, para o desenvolver, foram considerados os seguintes pontos:

➤ Segurança: O experimento será replicado múltiplas vezes por representantes do Centro Científico do Luxemburgo com a participação dos visitantes. Então a segurança deve ser uma das prioridades. Os supercondutores utilizados necessitam ser resfriados a temperaturas próximas de  $-180^{\circ}\text{C}$  com auxílio de um líquido super refrigerado. Esse processo envolve riscos relacionados ao derramamento de líquidos, reações químicas, queimaduras devido à grande diferença de temperatura e energia de arrefecimento, entre outros. Para assegurar os visitantes deve se evitar qualquer risco de explosão, assim como qualquer forma de contato com os componentes do processo, assim como prever a utilização de EPI.

➤ Recursos: O centro de ciência possui uma estrutura de laboratórios que podem facilitar a realização do projeto, como um laboratório de fluidos, um laboratório de química, um laboratório de eletromagnetismo, e igualmente máquinas, como impressoras 3D em metal, impressoras 3D de resina estereográfica, impressoras 3D de filamento, CNC madeira, CNC metal, máquinas de corte laser, máquinas de corte à jato d'água, scanner 3D, máquina de Azoto líquido, câmeras de alta velocidade, câmeras térmicas, entre outros. Toda essa estrutura deve ser priorizada no desenvolvimento do projeto e um orçamento de cem mil euros não deve ser ultrapassado.

➤ Manutenção & Mobilidade: O projeto deve ser apresentado múltiplas vezes durante a semana e deve levar em conta aspectos de manutenção com a substituição de peças, a facilidade e velocidade de reparação, e sem necessidade de um expert. Além disso, toda a estrutura deve ser móvel para que o experimento possa ser utilizado em outros lugares.

➤ Histórico: Apesar do projeto estar ainda no estado inicial, a ideia foi proposta por um antigo estagiário que ao longo de 1 mês realizou testes para verificar a viabilidade do projeto. Após seus testes, a maior tempo de levitação alcançado foi 30 segundo. Sua conclusão foi que a margem de temperatura entre a temperatura crítica e a temperatura do azoto líquido era pequena e que portanto, o supercondutor não manteria suas características supercondutoras por muito tempo.

➤ Tempo de realização: Como padrão, os estagiários do centro de ciência possuem 6 meses para realização do projeto. Esses são acompanhados por doutores das áreas específicas que definem as etapas a serem seguidas. O projeto teve início em abril e tinha como data limite o dia 10 de setembro.

➤ Tempo do experimento: Apesar do trem de levitação envolver muita tecnologia, os workshops possuem uma duração de 1 hora. Esse tempo é dividido entre explicações e a experimento em si. Portanto, foi definido que o tempo de experimento não ultrapasse os 10 minutos.

➤ Supercondutor: Existem muitos supercondutores de alta Temperatura crítica, no entanto apenas 3 são facilmente encontrados no mercado. Apesar da estrutura interna permitir o desenvolvimento de supercondutores, esse não era o objetivo do trabalho e por tanto foi desconsiderado. A fim de definir o melhor material supercondutor, diferentes testes devem ser conduzidos.

➤ Imãs: O objetivo é obter a maior altura de levitação do sistema para que essa seja visível e interessante ao público. Essa altura é diretamente relacionada fonte de campo magnético que o supercondutor é submetido. Logo, quanto mais forte o imã, melhor o resultado. Considerando que o fenômeno buscado necessita de um fluxo magnético entre  $H_{c1}$  e  $H_{c2}$ , se o campo magnético é demasiado, pode se afastar o supercondutor do imã, ganhando altura de levitação e diminuindo o fluxo magnético no supercondutor.

➤ Pista: Para demonstração, uma pista para a miniatura de trem deveria também ser desenvolvida, essa, por sua vez, deve idealmente possuir a mesma intensidade de campo magnético ao longo do percurso. No entanto, isso aumentaria muito a complexidade do sistema. Logo, foi decidido proceder com uma combinação de pequenos imãs e buscar uma aproximação da solução ideal. Apesar de não ser uma prioridade do projeto, uma pista mobüs, como na imagem abaixo pode tornar o experimento mais

interessante pelo lado lúdico. Além disso o experimento não deveria ocupar mais de 4 metros quadrados.

➤ Veículo: A miniatura de trem deveria ser facilmente segurada com uma mão, para facilitar o manuseio, ser facilmente replicada, caso quebre, e em cores chamativas.

Partindo desses requisitos, foi feito um estudo aprofundado para compreender o fenômeno quântico e suas variáveis. Uma vez que o princípio foi compreendido, foi necessário entender como utilizá-lo em nossa aplicação. Depois foi o momento de definir os supercondutores e os ímãs permanentes a serem utilizados. Para isso uma série de teste e medidas foram feitas a fim de atingirmos nosso objetivo final.

Em seguida, uma pequena amostra da pista foi construída para testes e validações do modelo final. Posteriormente, com a assistência de modelizações 3D, o conceito da pista foi finalizada, aprovada e a construção iniciada. Logo, foram feitos testes com as pastilhas supercondutoras e ímãs em protótipos e o desenvolvimento de um bom sistema de isolamento térmica foi realizado a fim de encontrar a melhor solução para manter as pastilhas resfriadas pelo maior tempo possível. Testes foram realizados com os protótipos até que o objetivo de manter a pastilha 1 minuto resfriada, com suas propriedades supercondutoras, fosse alcançado.

Assim que a isolamento ideal foi obtida, deu se início ao desenvolvimento do veículo final, através de modelizações 3D. Uma vez que o primeiro veículo foi desenvolvido, ele foi construído e colocado para testes. Desse primeiro veículo, possíveis otimizações foram encontradas o que levou a uma remodelação de um novo veículo. Esse loop se repetiu 3 vezes até que a solução final fosse obtida. Agora, que a metodologia geral foi rapidamente apresentada, o próximo item apresentará o desenvolvimento do projeto e seus resultados.

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

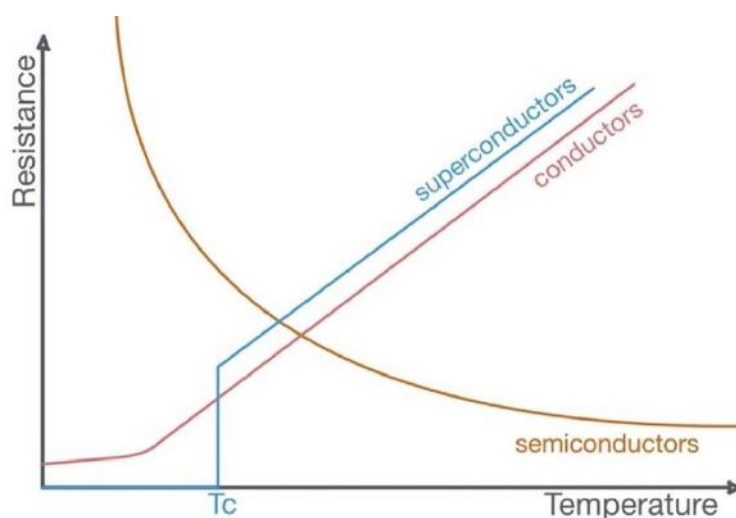
Após considerar os pontos relevantes para o desenvolvimento do projeto, a seguintes etapas foram seguidas.

### **4.1 Compreensão e Aplicação**

O primeiro passo foi compreender o fenômeno na aplicação desejada.

A levitação quântica, ou bloqueio quântico (Quantum Locking), consiste na levitação de um supercondutor de tipo 2 sob um campo magnético e sob o estado ilustrado anteriormente na **Figura 10b**.

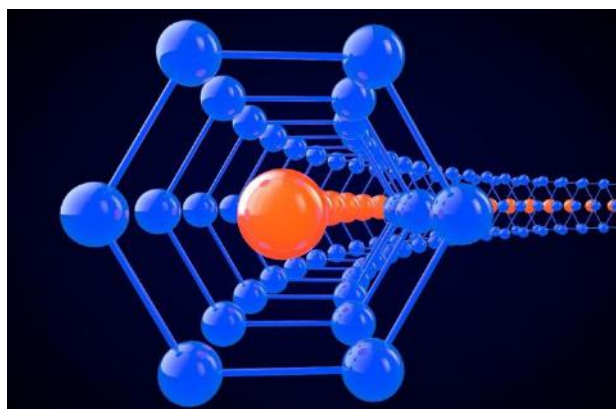
Isto acontece quando estes tipos de supercondutores são arrefecidos a uma gama específica de temperaturas e sujeitos a uma gama específica de resistência do campo magnético. Para melhor explicar este fenómeno, é importante olhar para o gráfico abaixo (**Gráfico 1**) que mostra como a resistência elétrica dos condutores, semicondutores e supercondutores funciona a diferentes temperaturas.



**Gráfico 1** – Gráfico da resistência elétrica em Condutores, Supercondutores e Semicondutores

Fonte: Desenvolvida pelo autor

Como mostrado acima, os semicondutores têm uma resistência inferior a temperaturas elevadas, enquanto os condutores metálicos têm uma resistência inferior a temperaturas baixas. Os supercondutores funcionam geralmente da mesma forma que os condutores, mas quando a sua temperatura atinge um ponto crítico, não têm resistência (não baixa resistência, mas zero resistência). Isto se deve à sua estrutura cristalina interna e às suas condições quânticas (**Figura 14**).

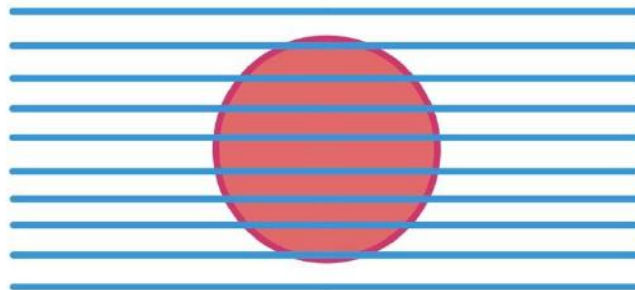


**Figura 14** - Representação da estrutura cristalina dos supercondutores

Fonte: Shutterstock

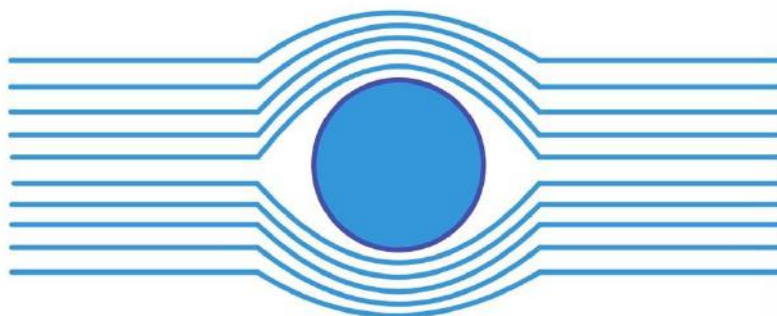
À escala atômica, a física quântica diz-nos que os elétrons se comportam como uma pequena onda. Quando há uma fenda ou quando um dos átomos do padrão de cristal vibra, a onda é perturbada. A temperaturas muito baixas, os elétrons emparelham-se (pares Cooper) e fundem-se numa única onda quântica que preenche todo o material. Esta onda única torna-se insensível a defeitos no material, que são extremamente pequenos para abrandar toda a onda. A resistência eléctrica, portanto, desaparece.

Agora que o princípio da resistência zero dentro dos supercondutores é compreendido, é importante compreender o seu comportamento num campo magnético. É bem conhecido que os condutores não ferromagnéticos simplesmente permitem que o campo magnético passe através da sua estrutura (**Figura 15**):



**Figura 15** - Linhas de campo magnético em um condutor não ferromagnético  
Fonte: Desenvolvida pelo autor

Os supercondutores acima da sua temperatura crítica e sujeitos a um campo magnético muito forte comportariam-se da mesma forma. No entanto, se estiverem abaixo da sua temperatura crítica e sujeitos a um campo magnético crítico, não o deixarão passar, pelo que terá de contornar o supercondutor, o chamado efeito Meissner (**Figura 16**):



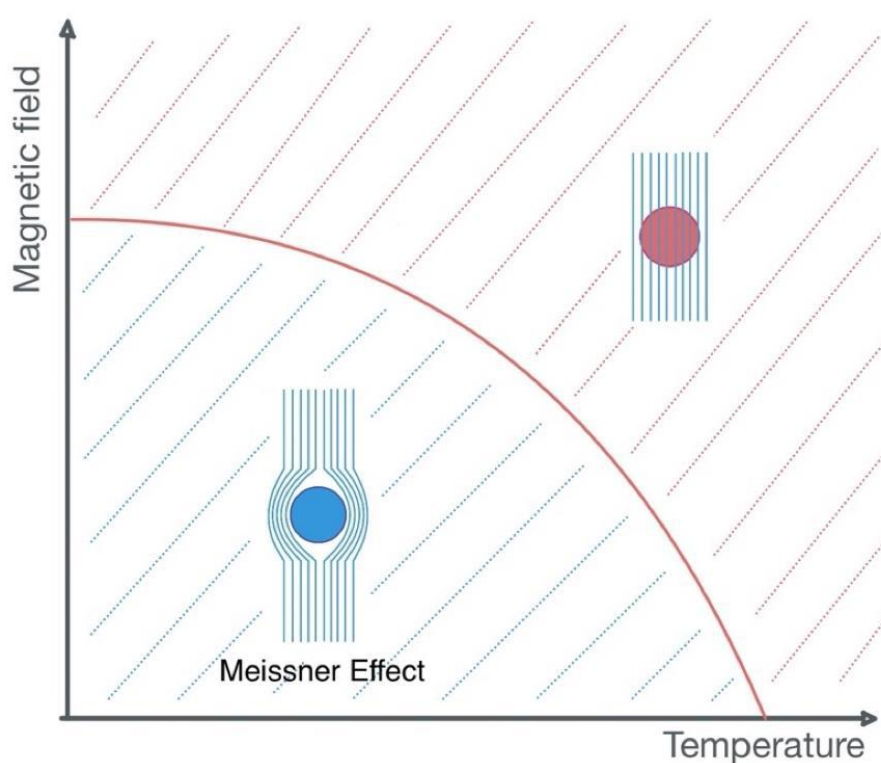
**Figura 16** - Representação das linhas de campos magnético no Efeito Meissner  
Fonte: Desenvolvida pelo autor

Isto acontece porque no interior dos supercondutores super-resfriados, a onda de elétrons explicada anteriormente entre os padrões de cristal dos supercondutores irá, no primeiro momento, criar uma corrente induzida pelo campo magnético externo. Como

esta corrente está sob a condição de resistência zero, começará a fluir continuamente dentro do supercondutor após a primeira interação com o campo magnético externo.

Uma vez que esta corrente seja induzida, não parará até que a temperatura deixe a zona supercondutora, e gerará os seus próprios pequenos campos magnéticos dentro da pastilha.

Os campos internos do supercondutor irão repelir o campo magnético externo fazendo-o contornar o supercondutor (efeito Meissner). No entanto, se o campo magnético externo for suficientemente forte, os campos internos não serão capazes de o repelir e esse atravessará o material, como mostra o **Gráfico 2** abaixo.



**Gráfico 2** - Gráfico de comportamento dos supercondutores de tipo 1

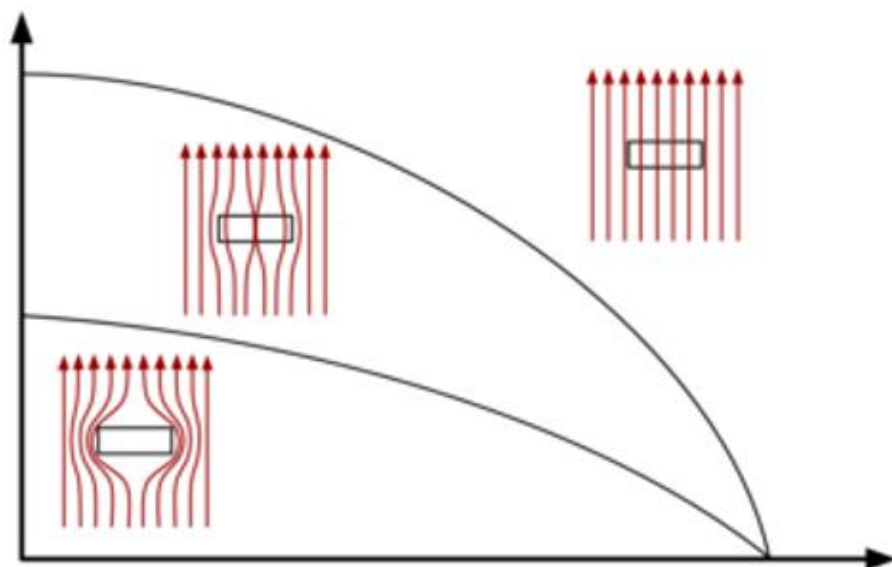
Fonte: Desenvolvida pelo autor

O fenômeno foi utilizado para criar algumas experiências de levitação, mas este ainda não era o método óptimo de levitação (os supercondutores não ficavam presos no campo magnético).

O comportamento descrito pelo gráfico, diz respeito aos supercondutores do tipo 1. Porém, mais tarde, foi descoberto um outro tipo de supercondutor, os de tipo 2. Esses, compostos de liga metálicas ou cerâmicas, embora tenham demonstrado os dois comportamentos, exibiram também um terceiro.

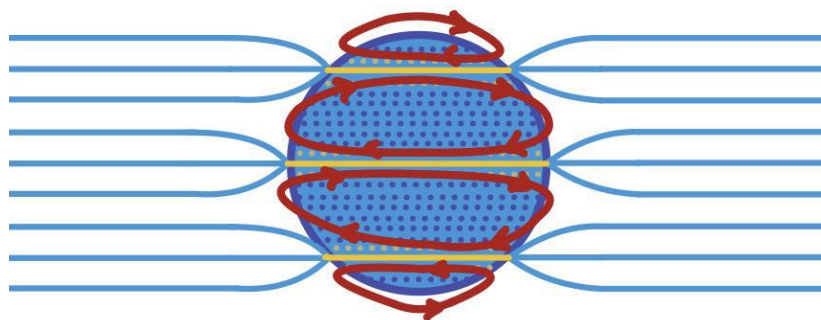


Abaixo de suas respectivas temperaturas crítica e numa gama específica de campo magnéticos (entre  $H_{c1}$  e  $H_{c2}$ ), como no **Gráfico 3**, exibem o fenómeno do bloqueio quântico.



**Gráfico 3** - Gráfico de comportamento dos supercondutores de tipo 2  
 Fonte: Wikipedia; modificada pelo autor

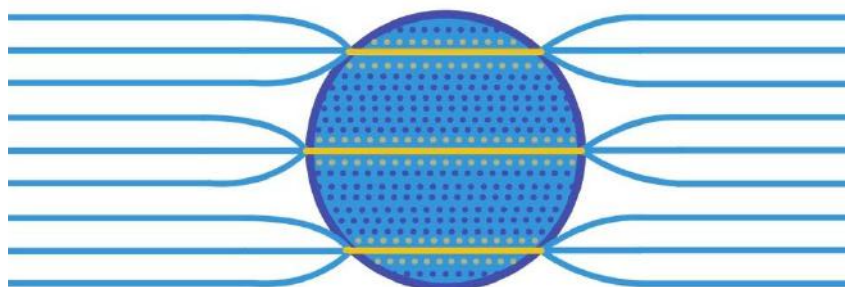
Este terceiro comportamento que buscamos e podemos lhe obter quando os supercondutores estão na sua condição de resistência zero, mas o campo magnético externo não é suficientemente forte para passar por todo o supercondutor ( $H < H_{c2}$ ) nem suficientemente fraco para ser repellido e contornado ( $H > H_{c1}$ ). Nesse momento, o campo magnético encontrará lugares específicos no supercondutor por onde pode passar, como na seguinte representação (**Figura 17**).



**Figura 17** - Representação de correntes persistentes  
 Fonte: Desenvolvida pelo autor

Como mostra a imagem acima, as linhas do campo magnético concentram-se em pontos específicos chamados vórtices, para passar pelo supercondutor de tipo 2. Onde não puder passar, as correntes internas serão capazes de gerar os seus próprios pequenos campos magnéticos que irão repellar todas as outras linhas de campo, obrigando-os a passar pelos locais por onde o campo magnético já passou (vórtice).

Após algum tempo, os pequenos campos magnéticos no interior do supercondutor e a sua própria estrutura cristalina se adaptarão ao campo magnético externo e eventualmente se equilibrarão entre eles. (**Figura 18**).



**Figura 18** - Adaptação da estrutura cristalina às linhas de vortice

Fonte: Desenvolvida pelo autor

Para tal, o supercondutor deve ser forçado sob um campo magnético específico (entre  $H_{c1}$  e  $H_{c2}$ ) durante um determinado período (se já tiver sido arrefecido sob  $T_c$ ), ou deve ser mantido no seu lugar durante o seu processo de arrefecimento.

Assim que o supercondutor estiver em equilíbrio com o campo magnético externo, permanecerá nessa posição. Se for ligeiramente movido, procurará regressar ao seu ponto de equilíbrio onde o fluxo magnético é o mesmo. Assim, se todas as condições permanecerem as mesmas, a única maneira de o tirar da fechadura quântica é aplicar uma força maior do que a proporcionada pelo campo magnético.

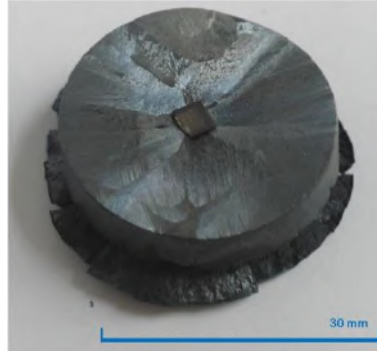
Também é possível mover o supercondutor sem o forçar a sair da sua fechadura quântica. Se o campo magnético for o mesmo em toda a volta, ele será livre de se mover enquanto estiver em levitação. E é exatamente o que será buscamos. Logo, construindo uma pista com o mesmo campo magnético, seremos então capazes de fixar o supercondutor numa trajetória específica.

## 4.2 Escolha do supercondutor

O segundo passo do projeto é encontrar os supercondutores de tipo 2 certos. Como mencionado na etapa anterior, são feitas de ligas metálicas ou materiais cerâmicos complexos de óxido. Como o nosso projeto será realizado diariamente no centro científico do Luxemburgo, a escolha dos supercondutores deve ter em conta um meio simples de arrefecimento e os recursos de azoto líquido disponíveis. O azoto líquido está normalmente a  $-196^{\circ}\text{C}$ . Portanto, qualquer supercondutor com uma temperatura crítica de supercondutividade inferior a  $-196^{\circ}\text{C}$  foi descartado. Além disso, como estamos à procura de uma experiência simples e segura, todos os supercondutores com uma

temperatura crítica de supercondutividade acima de  $-196^{\circ}\text{C}$ , mas que requerem pressões muito elevadas, tais como o hidreto de enxofre e o deca-hidreto de lantânio, também foram descartados. Depois destas considerações, as nossas 3 principais escolhas seriam:

- a  $-135^{\circ}\text{C}$ : cristais de óxido de cobre com compostos de mercúrio



**Figura 19 - Oxidos de Mercúrio**  
Fonte: Journal of Superconductivity

- a  $-163^{\circ}\text{C}$ : cristais BSCCO (Bismuth strontium calcium copper oxide)



**Figura 20 - BSCCO**  
Fonte: 2dsemiconductors.com

- a  $-181^{\circ}\text{C}$ : cristais YBCO (estrutura especial formada por duas camadas finas de óxido de cobre alternadas com camadas intermediárias mais espessas com bário, cobre e oxigênio – Fórmula do Composto  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ )

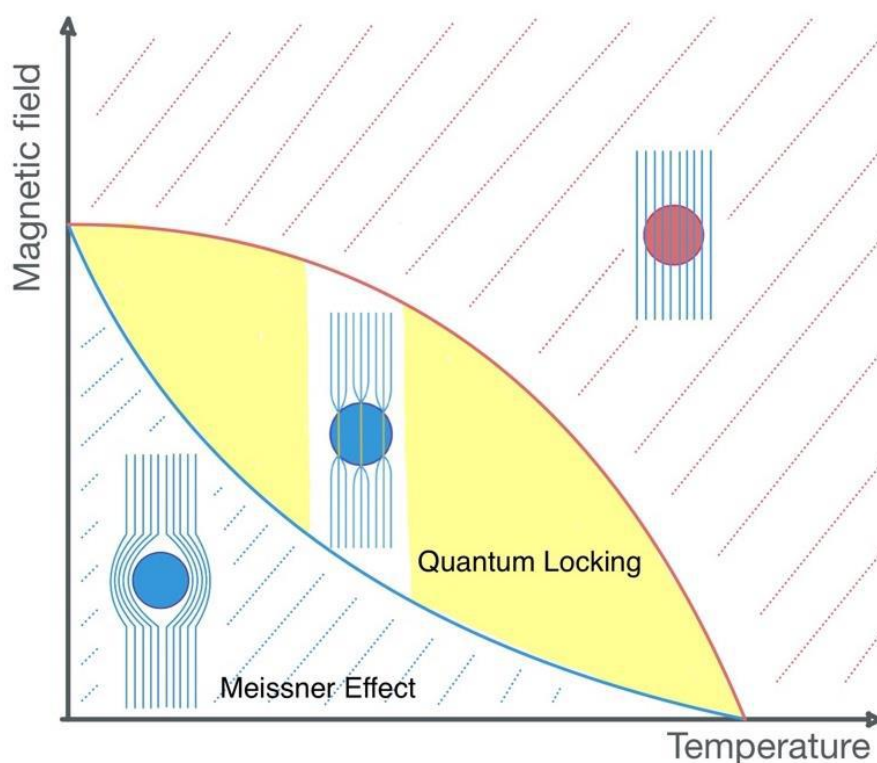


**Figura 21 - YBCO**  
Fonte: 2dsemiconductors.com

A primeira opção (**Figura 19**), cristais de óxido de cobre com mercúrio, só é utilizada por laboratórios certificados devido à sua instabilidade e compostos perigosos. A segunda opção, os cristais BSCCO (**Figura 20**), parece interessante, no entanto são difíceis de encontrar e muito caros. Uma única peça de 4g deste cristal custa mais de 1000 euros. O montante necessário para a nossa experiência custaria pelo menos 28.000 euros. Além disso, estes cristais são super prejudiciais à pele humana, o que tornaria o projeto ainda mais complexo.

A terceira opção foi escolhida. Os cristais YBCO (**Figura 21**) estão prontamente disponíveis no mercado, são materiais super estáveis e custam menos de 3% dos cristais BSCCO. Com uma temperatura crítica para uma supercondutividade de  $-181^{\circ}\text{C}$ , isto deixar-nos-ia uma margem de  $15^{\circ}\text{C}$  para atingirmos a nossa supercondutividade, se utilizarmos o azoto líquido.

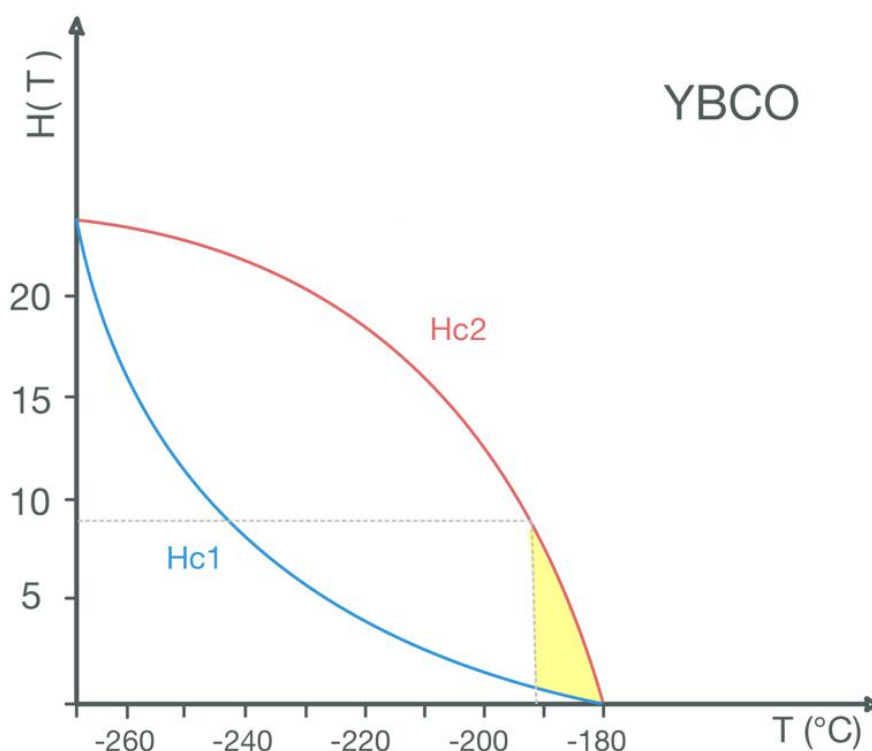
O gráfico do YBCO (**Gráfico 4**), gerado por medidas feitas pelo departamento de física da universidade canadense British Columbia, mostra abaixo que, apesar de diferente do padrão de supercondutores de tipo 2, esse material nos permitindo alcançar o bloqueio quântico mais facilmente.



**Gráfico 4** - Gráfico de comportamento do YBCO

Fonte: Desenvolvida pelo autor

Como representado na figura, o quantum locking é alcançado em toda região amarela e em campos magnéticos mais baixos. Podemos obter a levitação campos magnéticos próximo de 0,5 a 5T representados abaixo pela região amarela do **Gráfico 5**.



**Gráfico 5** - Gráfico de comportamento do YBCO com zona atingível pelo resfriamento com azoto líquido representado em amarelo

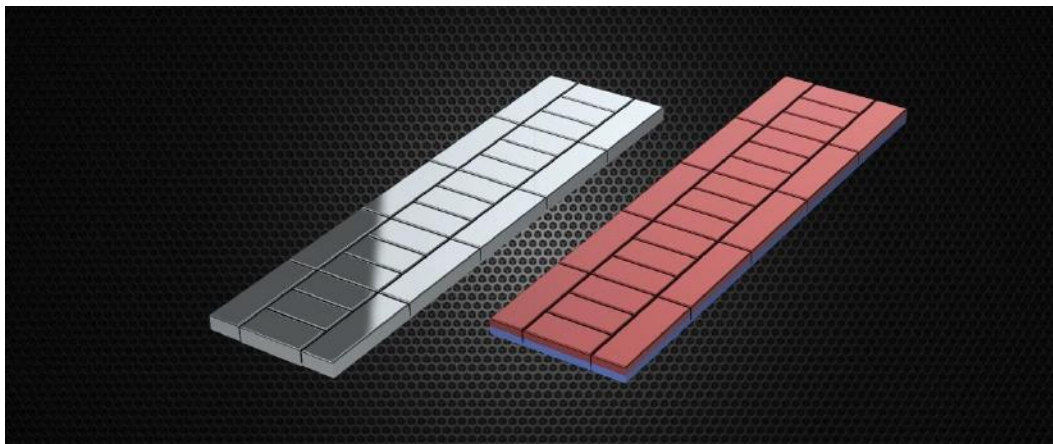
Fonte: Desenvolvida pelo autor

Quanto a forma e tamanho, precisamos de considerar alguns pontos. Os supercondutores YBCO não são amplamente comercializados e existem apenas algumas poucas empresas no mundo que os vendem em pequena escala. Essas normalmente os fabricam em forma cilíndrica com diferentes diâmetros e espessuras.

Quanto maior o diâmetro, maior a estabilidade, no entanto a largura da miniatura não deveria ultrapassar os 5cm. Quanto à espessura, também obtém se mais estabilidade com almofadas mais espessas, mas deve se ter a certeza de que todo o supercondutor está num fluxo magnético entre Hc1 e Hc2. No entanto, após a realização de algumas medidas, com auxílio de um equipamento para medir campo magnético, descobrimos que na verdade o campo magnético variava muito com a distância. Essa variação será mostrada no próximo item durante a escolha dos ímãs e, a partir dela, poderemos definir a espessura.

### 4.3 Desenvolvimento do trilho magnético

A terceira etapa do projeto foi encontrar o melhor ímã. A ideia era combinar vários mini-ímãs lado a lado (**Figura 22**) para criar uma pista com uma linha central interna que tivesse o mesmo fluxo magnético em toda longo.



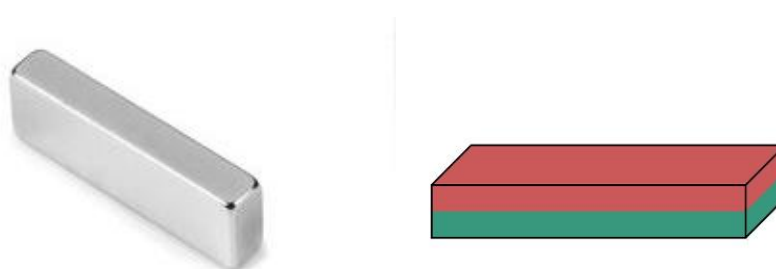
**Figura 22** - Renderização da combinação de ímãs

Fonte: Desenvolvida pelo autor

Como mostrado na figura acima, a esquerda temos a combinação de ímãs e a direita representados em vermelho os polos N e em azul os polos S dos ímãs.

Existem quatro tipos principais de ímanes no mercado: NdFeB (Neodymium), Ferrite, SmCo e Alnico. O seu fluxo magnético depende da sua forma e tamanho; contudo, o Neodímio é o mais forte, e das suas variantes, a N52 possui o campo mais forte.

Como mostrado no **Gráfico 5**, a cerca de  $-190^{\circ}\text{C}$ , os materiais YBCO atingem um bloqueio quântico entre  $+0.5\text{T}$  e  $+9\text{T}$ . A maioria dos mini ímãs disponíveis comercialmente têm normalmente campos de 0,5 a 2 tesla. Neodímio N52 sobe para 8 tesla. Uma vez que o nosso  $H_{c1}$  é cerca de  $0.5\text{T}$  e o nosso  $H_{c2}$  cerca de  $10\text{T}$ , o N52 seria a melhor solução.



**Figura 23** - Ímãs de Neodímio N52 utilizado e seus polos

Fonte: supermagnete.fr

Quanto ao tamanho, como mostra a figura abaixo, a largura não é o mais importante, pois de qualquer forma combinaremos vários ímanes lado a lado. O

comprimento estaria diretamente relacionado com o diâmetro do supercondutor. Sendo a espessura é o fator mais importante a escolher. Sabendo que quanto mais grosso o ímã, mais forte o fluxo magnético, a melhor solução encontrada no mercado de mini ímãs, nas dimensões que buscamos foi a solução de 10 mm de espessura. Embora estes pressupostos adotados, visto que uma amostra da pista deveria ser construída para testes, foram encomendados ímãs de n52 30mm x 10mm com espessura de 10mm e 5mm.

Durante a construção da amostra de pista, um enorme desafio veio à tona. A dificuldade em colocar os ímãs lado a lado na posição desejada e fixá-los era extremamente maior que imaginada. Alicates em alumínio foram encomendados, mas, mesmo assim, a tarefa era fisicamente difícil. Quanto maior a espessura, maior a dificuldade. Depois de grande esforço, as 2 amostras, cada uma com ímãs de uma das 2 espessuras encomendadas, ficaram prontas como o modelo abaixo:



**Figura 24** - Amostra da pista  
Fonte: Desenvolvida pelo autor

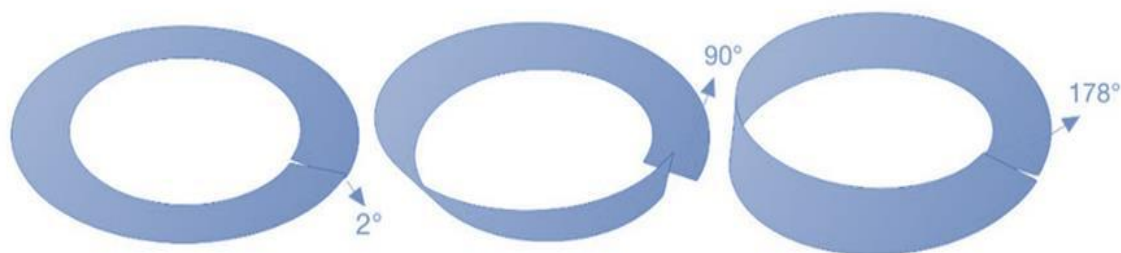
Em seguida, através de um Gauss metro, foram realizadas medidas dos campos magnéticos obtidos ao centro da amostra de pista em diferentes alturas e os seguintes dados foram obtidos:

**Tabela 1** - Intensidade dos campos magnéticos a cada distância

Altura de medição	Amostra 10mm de espessura	Amostra 5mm de espessura
0mm	6,8 kg	8,1kg
4mm	5,3kg	6,1 kg
8mm	4,1 kg	4,6kg
12mm	3,1 kg	3,5 kg
16mm	2,2 kg	2,4 kg
20mm	1,1kg	1,2 kg

Como demonstrado na tabela, a diferença dos campos magnéticos acima de 10mm não foram discrepantes. Baseado nisso, e considerando a dificuldade da combinação de ímãs de 10mm de espessura, foi decidido pela equipe, continuar com os ímãs de 5mm.

No que diz respeito ao desenho da pista, a ideia era criar uma faixa Möbus, que é um laço que é cortado, torcido  $180^\circ$  e reconectado (**Figura 25** - Explicação de Möbus):



**Figura 25** - Explicação de Möbus  
Fonte: Desenvolvida pelo autor

A ideia além de trazer um aspecto futurístico para o projeto, também dobra o tamanho de cada volta completa e nos permite movimentos mais interessantes para o experimento final.

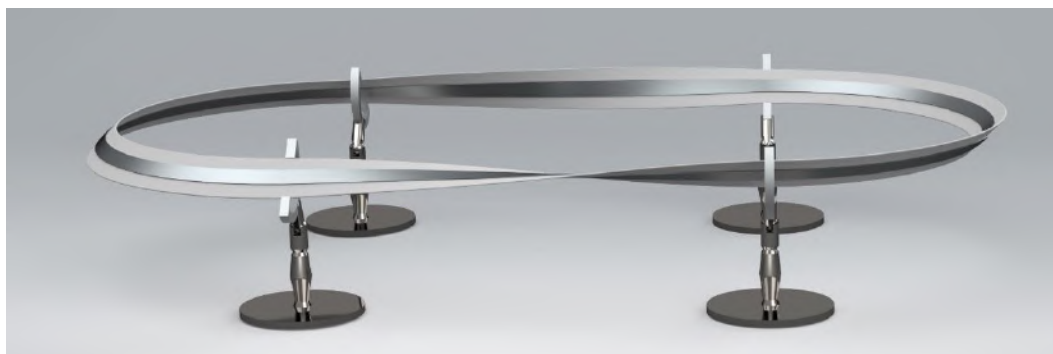
Como mostra a figura abaixo (**Figura 26** - Möbus percorrida por formigas), as formigas têm que percorrer a parte superior e inferior da pista para retornarem ao ponto inicial. Se uma linha do percurso for imaginada, observara-se que as formigas estão caminhando uma atrás da outra e todas passarão pelo mesmo ponto.



**Figura 26** - Möbus percorrida por formigas  
Fonte: Desenvolvida pelo autor através de modelo 3D do GrabCad.com



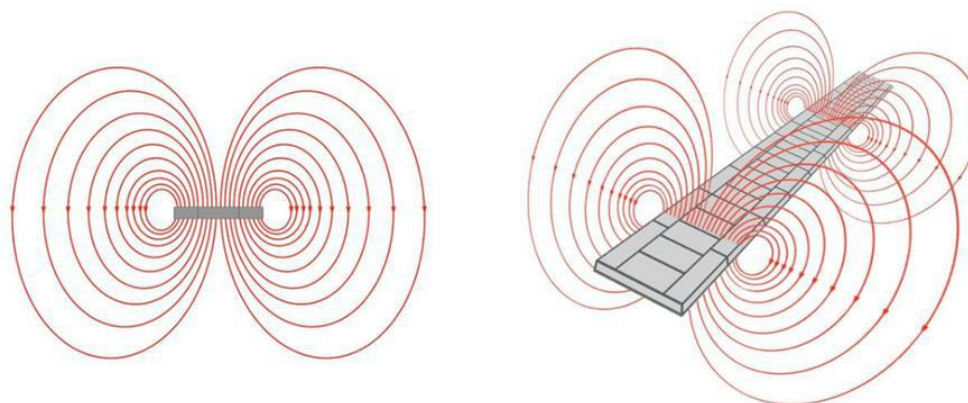
Baseado na ideia do Mobüs e a combinação de ímãs necessária, um modelo 3D da pista foi criado (**Figura 27** **Error! Reference source not found.**).



**Figura 27** - Renderização do modelo da pista

Fonte: Desenvolvida pelo autor

O campo magnético obtido, em aproximação grosseira, é algo como as figuras abaixo e será, praticamente, o mesmo em toda a volta da pista:



**Figura 28** - Aproximação simples do campo magnético

Fonte: Desenvolvida pelo autor

Após a concepção, a pista foi aprovada e os planos de fabricação foram gerados. Um mês mais tarde, a pista foi concluída, como mostra a **Figura 29**.

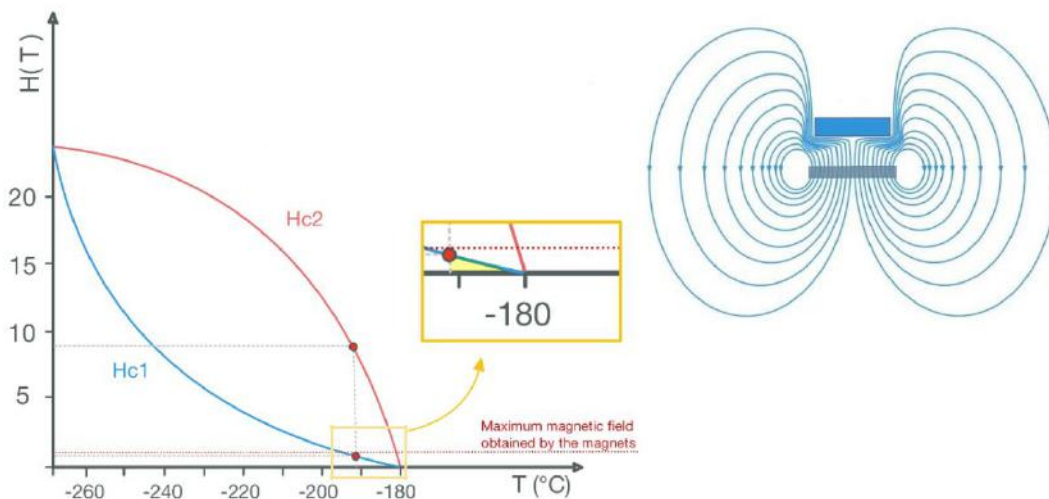


**Figura 29** - Pista finalizada

#### 4.4 Protótipos, testes e medições

A quarta fase do projeto consistia em realizar múltiplos testes, visto que os supercondutores e ímãs foram definidos, para nos familiarizarmos com todos os aspectos práticos a fim de alcançarmos os melhores resultados.

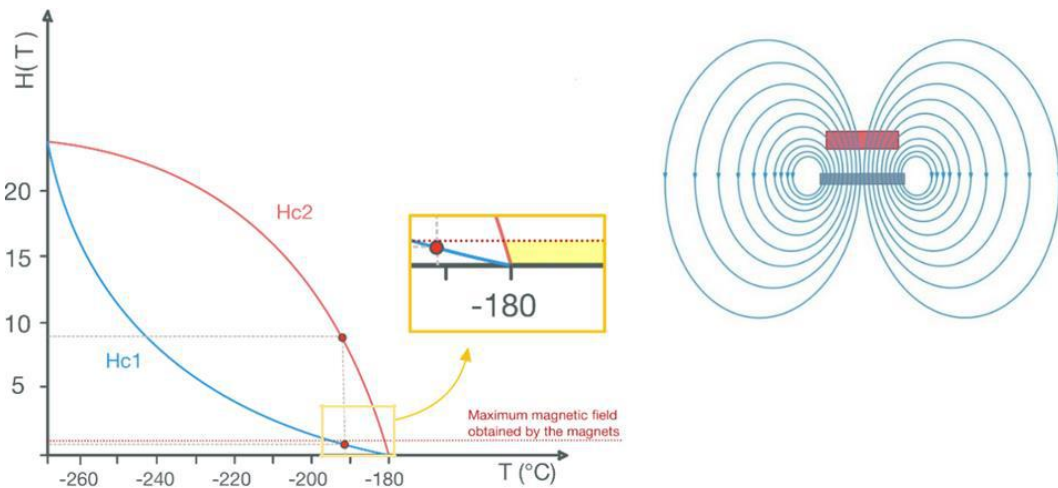
Antes de mais, é importante compreender os 3 cenários possíveis ao durante os testes. Se o campo magnético não for suficientemente forte e a temperatura não for crítica, as pastilhas irão experimentar o efeito Meissner, como na região amarela do gráfico abaixo (**Gráfico 6** - Região do gráfico onde encontra se o efeito Meissner, representada em amarelo).



**Gráfico 6** - Região do gráfico onde encontra se o efeito Meissner, representada em amarelo

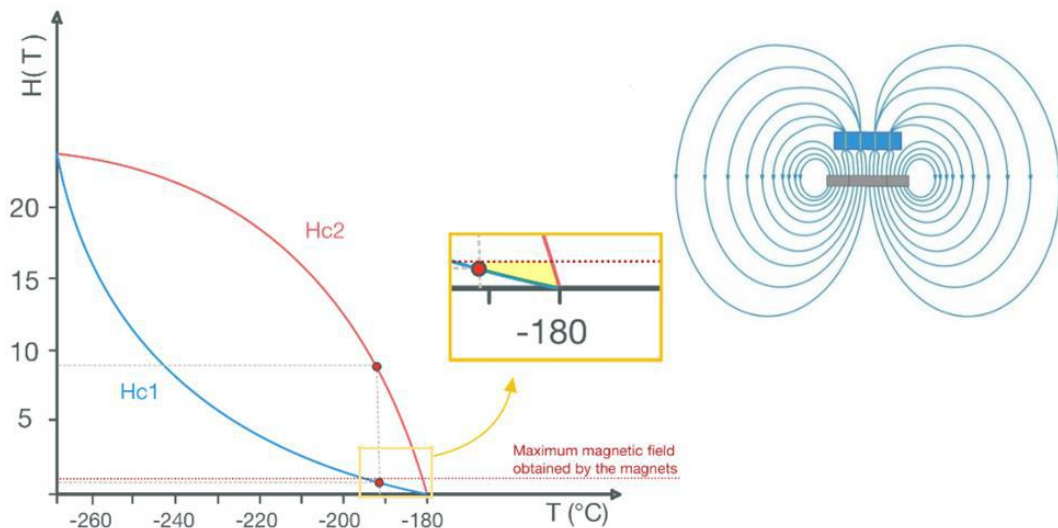
Fonte: Desenvolvida pelo autor

Um segundo cenário seria que a temperatura da pastilha não atinja a temperatura crítica para a supercondutividade. Neste caso, representado pela zona amarela da figura abaixo (**Gráfico 7** - Região no gráfico para se comportar como um condutor metálico, representada em amarelo), os supercondutores reagiriam como um condutor não ferromagnético:



**Gráfico 7** - Região no gráfico para se comportar como um condutor metálico, representada em amarelo  
 Fonte: Desenvolvida pelo autor

E o melhor cenário seria que se a temperatura estiver abaixo do limiar crítico e o campo magnético for suficientemente forte, então o supercondutor será submetido a um bloqueio quântico (**Gráfico 8**).



**Gráfico 8** - Região no gráfico para obter a levitação quântica, representada em amarelo  
 Fonte: Desenvolvida pelo autor

O processo de conseguir a levitação quântica pode ser conseguido de duas formas diferentes. Ou os pellets são arrefecidos num recipiente de azoto líquido e depois mantidos no lugar acima da pista à altura desejada até estarem em equilíbrio (**Figura 30a**), ou são arrefecidos no mesmo recipiente posicionado acima da pista com os pellets colocados à altura desejada (**Figura 30b**).



**Figura 30** - Foto dos dois métodos de obtenção da levitação quântica  
 Fonte: Desenvolvida pelo autor

A segunda experiência é mais interessante porque não perdemos tempo a manter as pastilhas no lugar e não causamos calor dentro do supercondutor enquanto as suas moléculas se adaptam ao campo magnético.

Nas primeiras experiências, supercondutores YBCO de diferentes tamanhos foram testados em diferentes alturas de levitação utilizando a amostra de pista anteriormente construída.

Todos as pastilhas foram nomeadas (**Tabela 2**), e os seus tempos de levitação antes da perda das suas propriedades supercondutoras foram notados (**Tabela 3**).

**Tabela 2** - Numeração das pastilhas

Nome	Título 2
Pastilha 1	Ø35mm x 10mm
Pastilha 2	Ø35mm x 13mm
Pastilha 3	Ø35mm x 16mm

**Tabela 3** - Tempos de levitação em diferentes alturas de 3 pastilhas de espessuras diferentes

Altura de levitação	Pastilha 1	Pastilha 2	Pastilha 3
3mm	29s	38s	45s
4mm	29s	38s	38s
5mm	19s	31s	25s
6mm	0s	20s	10s

Como esperado, a pastilha 2 de 35mm de diâmetro por 13mm de espessura deu os melhores resultados. Embora tenha tido o melhor desempenho, foi ainda uma pequena quantidade de tempo tendo em conta o objetivo de um minuto de levitação. Ficou assim

claro que, ao conceber o veículo, seria importante criar um sistema para manter a sua energia de arrefecimento de modo a obter tempos de bloqueio quântico mais longos.

O segundo conjunto de experiências consistiu em medir o peso suportado pelas pastilhas colocadas à altura de 5mm, durante os seus primeiros 10 segundos. Foram obtidos os seguintes dados (**Tabela 4**):

**Tabela 4** - Pesos e tempo de resistência de cada pastilha

Altura de levitação	Pastilha 1	Pastilha 2	Pastilha 3
200g	18s	30s	26s
400g	10s	28s	23s
600g	0s	24s	20s
800g	0s	0s	0s

Como demonstrado acima, não carregam muito peso, o que é realmente importante para a concepção do veículo e para o sistema que o mantém frio. Além disso, como a diferença de temperatura entre os supercondutores e o ambiente é enorme, mantê-los frios será certamente um desafio.

A ideia era encontrar uma forma de armazenar azoto líquido num recipiente contendo os supercondutores e que esse tivesse uma boa isolamento térmica. Contudo, foram identificados alguns constrangimentos:

- ⇒ O azoto líquido, por sua natureza, não pode estar num recipiente fechado, caso contrário transformar-se-á numa bomba.
- ⇒ O protótipo funcionará metade do circuito de cabeça para baixo.
- ⇒ O recipiente deve ser capaz de resistir a enormes mudanças de temperatura.
- ⇒ O recipiente não pode ser grosso debaixo do supercondutor, uma vez que a altura máxima de levitação é de apenas 5mm.
- ⇒ O azoto no interior não pode ser expelido do recipiente.

Alguns protótipos com suporte para duas pastilhas no interior foram rapidamente desenvolvidos para testes, mas nenhum deles funcionou bem (**Figura 31**):

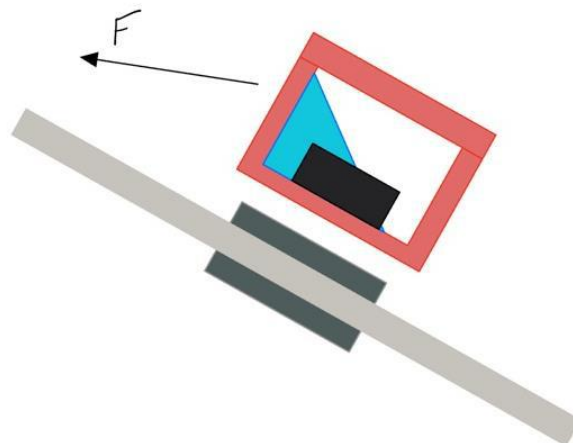


**Figura 31** - Protótipos rápidos para teste  
 Fonte: Desenvolvida pelo autor

Cada um dos protótipos apresentados acima tem pelo menos um dos quatro maiores inconvenientes:

- ⇒ Perde o nitrogénio no seu interior quando está de cabeça para baixo.
- ⇒ É mais pesado do que os pellets podem aguentar.
- ⇒ O nitrogénio líquido move-se para dentro e cria um momento de inércia que o expulsa da pista.
- ⇒ A estanqueidade não está assegurada.

Depois de analisar e testar os protótipos, observou-se que sempre que estes protótipos eram preenchidos com azoto líquido e colocados em teste na pista, o momento de inércia do líquido no interior era os repulsavam para fora pista dependendo da velocidade, como representado na **Figura 32** abaixo.



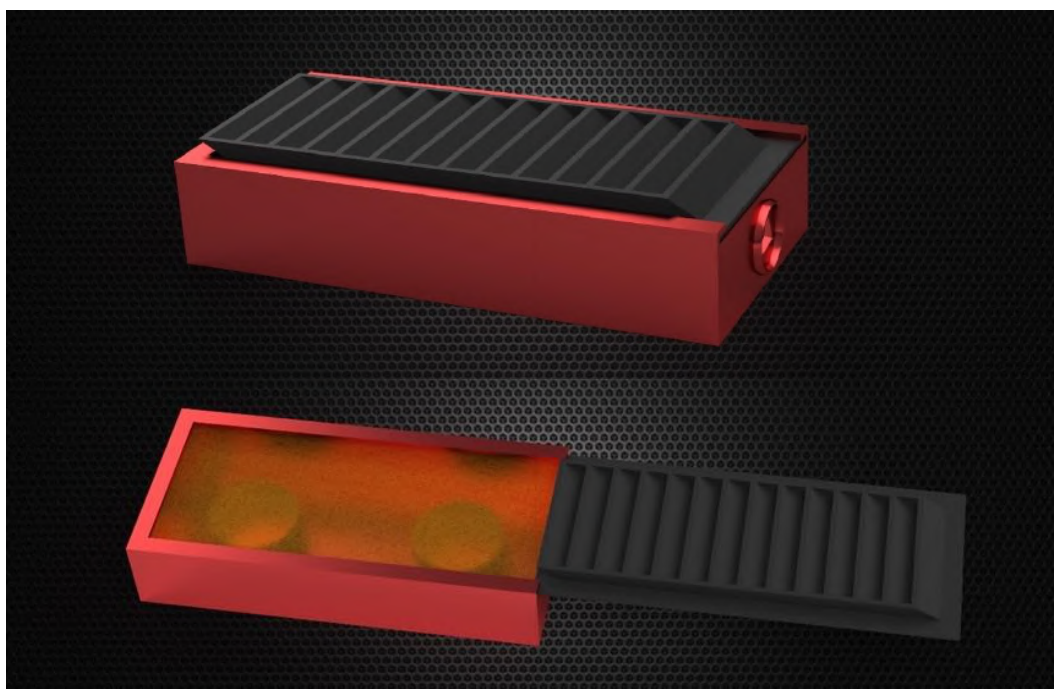
**Figura 32** - Comportamento do azoto dentro dos protótipos  
 Fonte: Desenvolvida pelo autor

Para solucionar esse problema, ideia inicial era fazer um recipiente fechado com sifões no interior (para evitar o momentâneo) e uma válvula de tanque de motocicleta no topo, que não deixa o líquido sair quando é virado ao contrário, mas deixa o líquido evaporar quando é virado de cabeça pra baixo.

No entanto, esta solução não foi considerada porque as válvulas não são concebidas para a temperatura necessária e, uma vez que o recipiente não se pode partir quando virado de cabeça para baixo, pode explodir.

Finalmente, depois de muito brainstorming, durante o desenvolvimento do primeiro protótipo oficial, surgiu a ideia de usar uma esponja para encher o interior do recipiente. As esponjas retêm líquidos no interior, o que impede os líquidos de criar um momento dentro do protótipo e lhe permite respirar quando está de cabeça para baixo.

Além disso, a fim de reduzir a troca de calor, foi escolhido o poliestireno para isolar as paredes do recipiente e uma tampa aberta para permitir a evaporação do azoto, como mostra a **Figura 33**. O modelo foi então impresso em 3D em PolyMide PA6-CF Nylon Carbon Fiber, material específico para grandes variações de temperatura, e construído.



**Figura 33** – Protótipo oficial 1

Fonte: Desenvolvida pelo autor

A primeira observação após os testes foi que os protótipos permaneceram muito mais tempo (5min) em levitação quântica do que o esperado. A segunda era que suportava muito mais peso (800gr). A explicação é que a combinação de azoto líquido e esponja

manteve o supercondutor sempre frio, mesmo quando o peso externo estava a tentar movê-lo. Embora este primeiro protótipo já tenha excedido todas as expectativas, a sua concepção não foi bem-sucedida.

Após os testes na pista, devido ao seu comprimento, o seu fundo a toda tocava a pista durante as curvas, o que limitou os nossos testes a ir mais longe.

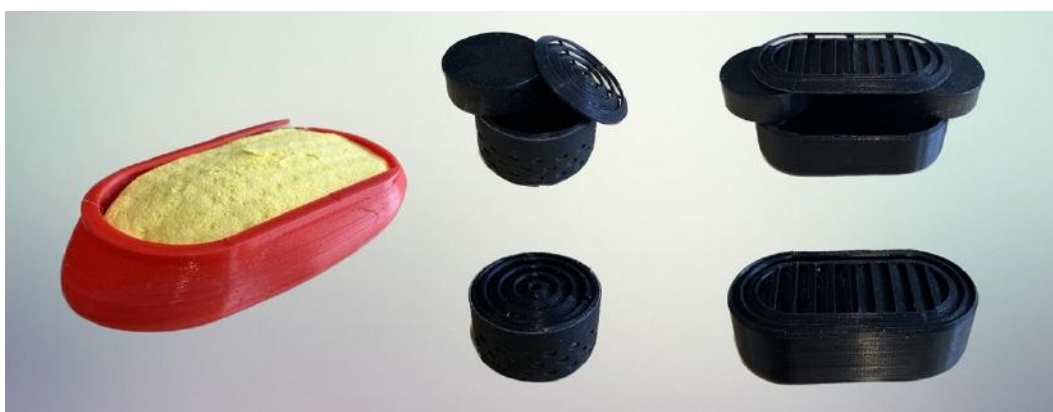
Baseado nesses aprendizados, foi desenvolvido um segundo protótipo oficial, mais arredondado, mais curto, como mostra a figura abaixo.



**Figura 34** - Protótipo oficial 2

Fonte: Desenvolvida pelo autor

Em seguida, também foram desenvolvidas duas mini versões a fim de encontrar o tamanho mínimo ideal. Essas e o protótipo 2 foram impressos em 3D, como mostra a **Figura 35** abaixo, para serem submetidos a novos testes de tempo e peso suportado.



**Figura 35** – Modelos impressos

Fonte: Desenvolvida pelo autor

Esses testes foram efetuados sobre a amostra da pista e foram obtidos os seguintes dados (**Tabela 5**).

**Tabela 5** - Medidas de tempo e peso suportado pelos protótipos oficiais.

Medida efetuada	Protótipo 1	Protótipo 2	Mini 1 pastilha	Mini 2 pastilhas
-----------------	-------------	-------------	-----------------	------------------



Tempo em levitação	305s	192s	70s	75s
Peso suportado	800g	1000g	600g	600g

Como mostra o quadro, o Protótipo 2 tinha um tempo de bloqueio quântico inferior ao do Protótipo 1, e os menores ainda mais baixos. Isto mostra-nos que o tamanho do recipiente desempenha um papel realmente importante na experiência. O Protótipo 2 também suportou 200gr mais do que o Protótipo 1, mas isto é compreensível uma vez que o Protótipo 1 era mais pesado, o peso total (protótipo + peso suportado) no supercondutor era mais ou menos o mesmo.

Embora o protótipo 2 tenha mostrado excelentes resultados sobre a amostra de pista, quando foi testado na pista não, os resultados foram insuficientes. Durante as curvas em alta velocidade ele seria ejetado para fora da pista. Isto aconteceu devido ao momento de inercia do líquido criado dentro do recipiente. A esponja ajudou, mas não resolveu o problema. O azoto líquido ainda se movia um pouco dentro do recipiente.

A solução possível era experimentar outras esponjas. Apesar de saber que fatores como absorção e condutividade térmica seriam essenciais para o experimento, essas informações não são facilmente encontradas e não cabia ao projeto realizar essas medições por questões de tempo. Além disso, esponjas quando submetidas a temperatura do azoto líquido, viram completamente sólidas.

Partindo do princípio de sifão e de diminuição dos movimentos no interior, imaginamos que quanto menor os poros da esponja, melhor seriam os resultados. Em seguida, 10 tipos de esponjas foram encomendados para testes. Esses testes consistiram em substituir a esponja do protótipo oficial 2 pela esponja em questão, colocá-lo na pista e medir quanto tempo até a falha. Os resultados estão expostos na **Tabela 6** abaixo:

**Tabela 6** - Resultados de diferentes esponjas no protótipo 2

Número da esponja	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tempo até a falha	175s	140s	0s	220s	192s	155s	305s	264s	0s	282s

Como mostrado acima, apesar de algumas esponjas nem sequer permitirem o bloqueio quântico, a esponja número 7 mostrou os melhores resultados. Com ela o protótipo 2 permaneceu em bloqueio quântico durante 6 minutos na pista, mesmo quando em velocidades mais elevadas.

Pode se observar que o tempo de levitação foi mesmo o dobro do que obtivemos com o protótipo parado sobre a amostra de pista. Isso pode ser explicado pelo fato da nova esponja permitir uma melhor interação entre o azoto e o supercondutor, bem como um melhor isolamento do ambiente. A combinação funcionou tão bem que foram realizados testes sem as camadas de poliestireno em volta e obteve-se o mesmo desempenho.

#### 4.5 Concepção de veículos

Após o sucesso do último protótipo testado, era tempo de iniciar a quinta etapa do projeto, que consistia em conceber o veículo de levitação final. Para tal, foram feitas algumas especificações:

- ⇒ O veículo deve ser reparável, se necessário (substituição de supercondutores e esponjas),
- ⇒ Deve assemelhar-se a um trem moderno,
- ⇒ Deve ser equilibrado (o centro de gravidade deve estar no meio),
- ⇒ Deve permanecer na pista durante pelo menos um minuto, o que já foi conseguido com os protótipos,

Com base nestas especificações, foi feito o seguinte modelo:



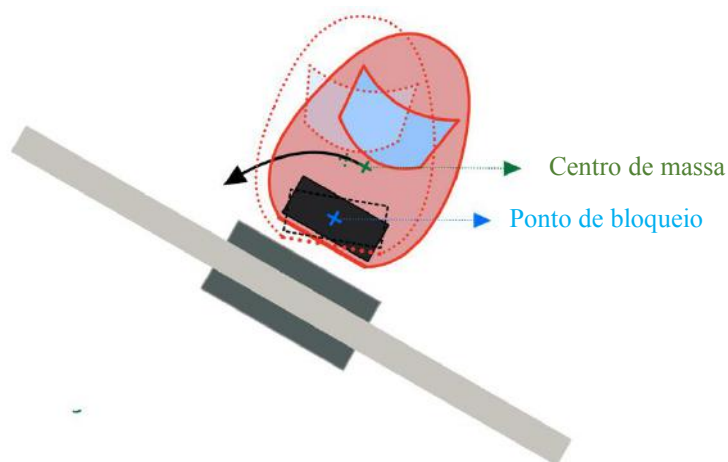
**Figura 36** - Modelo final 1  
Fonte: Desenvolvida pelo autor

O modelo foi aprovado pela equipe, mas quando construído e resfriado a temperatura do experimento, o encaixe da parte superior e inferior não apresentou um bom funcionamento. Por isso, o novo modelo final 2 mostrado abaixo foi desenvolvido.



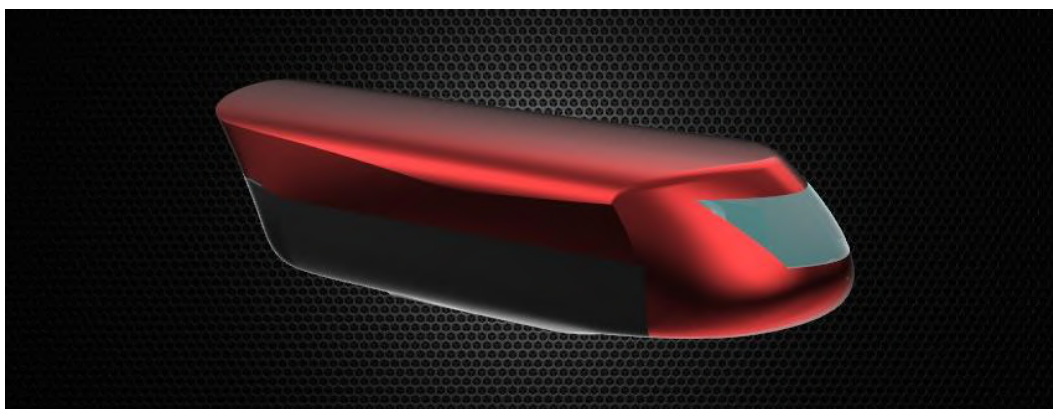
**Figura 37** - Modelo final 2  
Fonte: Desenvolvida pelo autor

Nesse, o recipiente inferior possuiria sua grelha de fechamento por pressão e em seguida era deslizados em guias da parte superior e fixados por um pequeno parafuso M2, como mostrado na figura. O modelo foi construído e todos os componentes se encaixavam bem quando resfriados. No entanto, devido ao seu alto centro de gravidade, em velocidades elevadas, o trem realizava movimentos laterais demonstrados na **Figura 38**.



**Figura 38** - Representação do centro de gravidade  
Fonte: Desenvolvida pelo autor

Baseado nisso, o modelo final 3 foi alcançado guardando as mesmas dimensões da parte inferior e os mesmos mecanismos de encaixe, mas com centro de gravidade mais baixo através da redução da altura da parte superior, como mostrado abaixo:

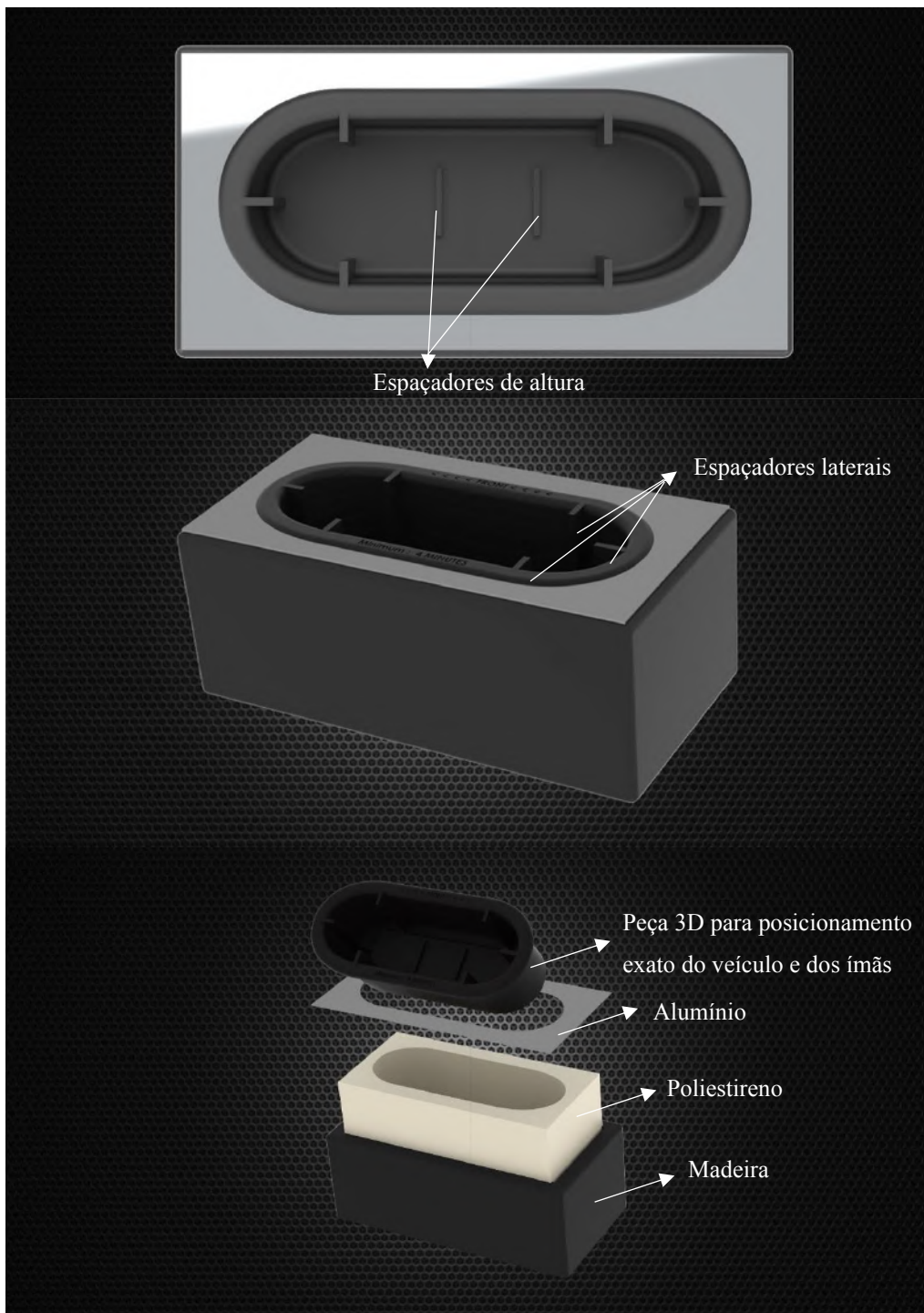


**Figura 39** - Modelo final 3  
Fonte: Desenvolvida pelo autor

O veículo final possui o mesmo peso que o protótipo 2 e o volume do recipiente inferior era ligeiramente inferior ao do protótipo 2, uma vez que os seus resultados tinham excedido claramente os objetivos. Após o desenho final ter sido aprovado, o modelo foi impresso pela equipe, fabricado e testado. O modelo superou as expectativas, não apresentou algum problema em altas velocidades e ficou em levitação quântica por 305 segundos até começar a apresentar sinais de fraqueza em seu bloqueio quântico.

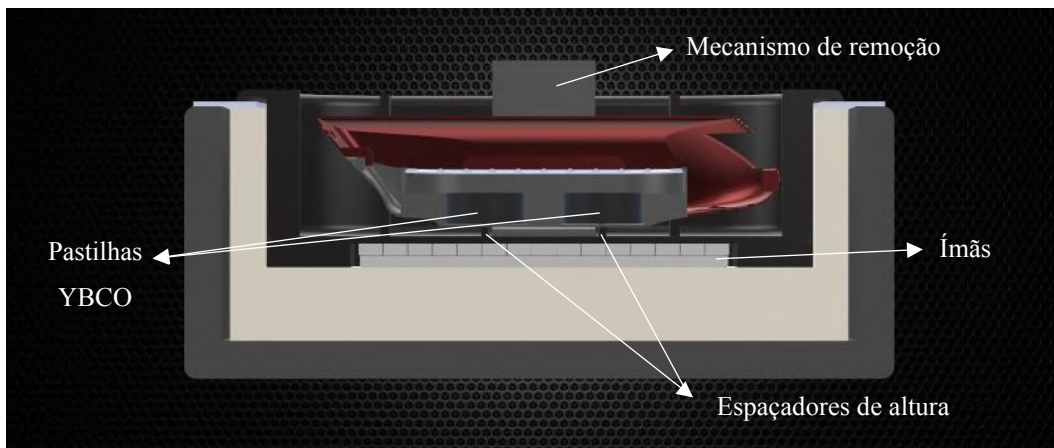
#### 3.2.6. Processo de arrefecimento

A sexta etapa do projeto foi criar um processo de arrefecimento para que os mediadores do Luxembourg Science Center não tivessem quaisquer problemas na execução da experiência. Como a posição de arrefecimento, a distância aos ímãs e o tempo são passos essenciais na experiência, foi desenvolvida a seguinte plataforma de arrefecimento (**Figura 40**):



**Figura 40** - Recipiente de arrefecimento do sistema  
Fonte: Desenvolvida pelo autor

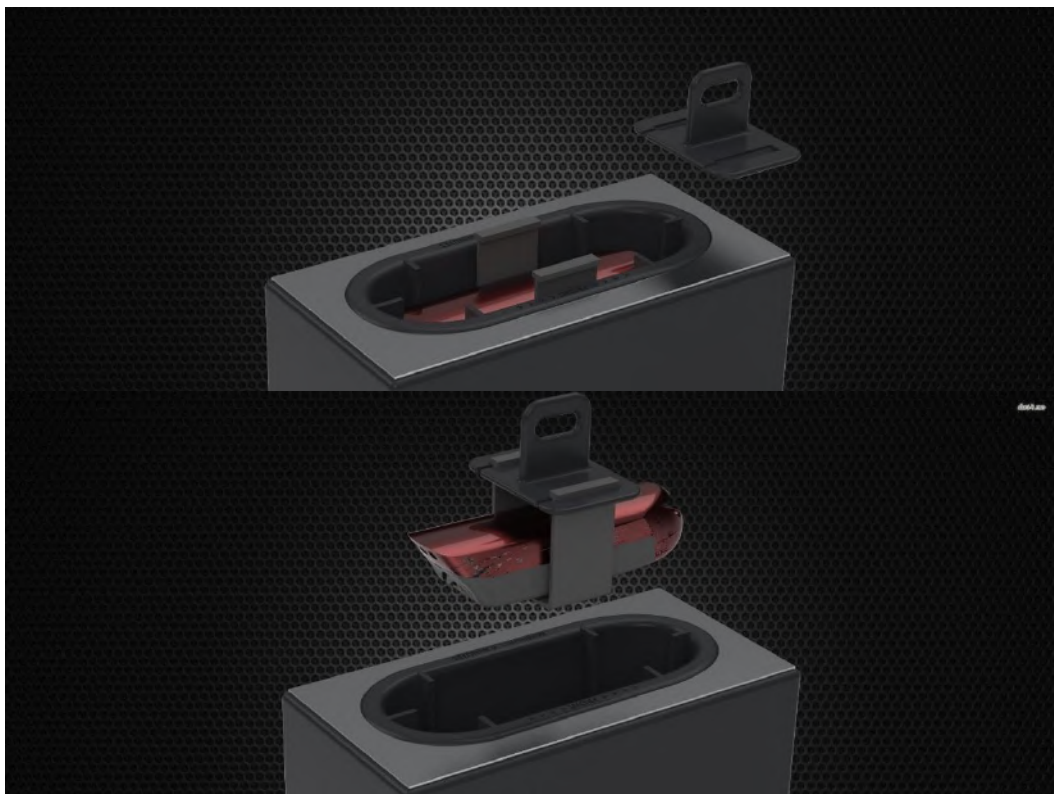
Essa plataforma era composta de um recipiente em poliestireno dentro de um recipiente em madeira, que receberiam ao seu interior uma peça de impressão 3D responsável por manter o trem e a amostra da pista na posição correta durante o resfriamento do veículo, como demonstrado a seguir:



**Figura 41** - Vista de corte lateral do sistema de arrefecimento

Fonte: Desenvolvida pelo autor

Além disso, como também representado na figura anterior, porém mais explicado nas próximas figuras, um mecanismo para facilitar a remoção do veículo submerso no azoto da plataforma pelos apresentadores do experimento foi desenvolvido.



**Figura 42** - Mecanismo de remoção do veículo

Fonte: Desenvolvida pelo autor

Finalmente, após todas as etapas anteriores, o foi concluído, ultrapassou todos os objetivos e o veículo final percorre a pista em levitação quântica durante mais de 6 minutos. O tempo de resfriamento ideal do trem é de 4 minutos. Totalizando uma experiência de 10 minutos como desejado. O experimento está pronto desde setembro de 2021 e é utilizado pelos apresentadores do LSC para demonstrar a levitação quântica.

## 5 CONCLUSÕES

O trabalho obteve ótimos resultados, serviu e ainda serve como objeto de demonstração para inúmeras apresentações e workshops. O objetivo inicial de fazer com que o veículo levitasse ao menos um minuto, foi amplamente ultrapassado e permitiu uma margem de segurança muito maior no experimento. O projeto foi selecionado para uma das maiores feiras de ciência da Europa e foi uma das principais atrações. Por se tratar de um fenômeno pouco visto e conhecido, o trem a levitação quântica cativou a atenção de crianças e adultos de todas as áreas. Todos se mostraram super interessados a entender o que acontecia e pensar em diversas aplicações.

O projeto foi considerado um grande sucesso para o Centro de Ciência que teve de replicar o stand para a companhia ferroviária luxemburguesa, CFL, que o mantém em sua sede principal. Além disso, ele é apresentado pelo menos 3 vezes por semana e já atingiu aproximadamente 80 mil pessoas.

Apesar dos desafios encontrados ao longo do desenvolvimento do trem, pode-se dizer que ele cumpriu as expectativas de causar curiosidade e interessar o público pela tecnologia.

Em termos pessoais, o projeto me permitiu conhecer e me aprofundar em uma nova tecnologia que será certamente muito utilizada no futuro. Como um amante da ciência foram meses em que pude, de verdade, explorar o meu amor pela física e suas aplicações. O sucesso do projeto me aportou credibilidade e reconhecimento dentro do Luxembourg Science Center, que mais tarde foi recompensado por uma oferta de trabalho e o início da minha carreira na Europa.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Onnes HK (1911) Further experiments with liquid helium: the resistance of pure mercury at helium temperatures. *Commun Phys Lab Univ Leiden* 120b:124c
2. Meissner W, Ochsenfeld R (1933) Ein neuer Effekt bei Eintritt der Supraleitfähigkeit. *Naturwissenschaften* 21(44):787
3. Morita M, Teshima H, Hirano H (2006) Development of oxide superconductor - high-T<sub>c</sub> bulk superconductor, QMG, and Its magnetic application. *Nippon Steel Tech Rep* 93:18
4. Ogun SE, Goktas H, Ozkan H, Gasanly NM (2005) Effect of low-energy electron irradiation on (Bi,Pb)-2212 superconductor. *Surf Coat Technol* 196:118
5. Vasiliu F, Sandu V, Nita P, Popa S, Cimpoiasu E, Bunescu MC (1998) The role of irradiation damage structure and fine scale precipitation in the pinning improvement of thermal neutron irradiated lithium flouride-doped YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub>. *Physica C* 303:209
6. Hébert S, Hardy V, Villard G, Hervieu M, Simon C, Provost J (1998) Pinning enhancement in Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>8</sub> by tilting columnar defects from the c axis. *Physica C* 299:259
7. Shlyk L, Krabbes G, Fuchs G, Stöver G, Gruss S, Nenkov K (2002) Pinning behavior and magnetic relaxation in melt-processed YBCO doped with Li, Ni and Pd. *Physica C* 377:437
8. Zhao Y, Cheng CH, Wang JS (2005) Flux pinning by NiO-induced nano-pinning centres in melt-textured YBCO superconductor. *Supercond Sci Technol* 18:S43. <https://doi.org/10.1088/0953-2048/18/2/010>
9. Zhou YX, Scruggs S, Salama K (2006) Effects of ionic doping on superconducting properties of melt textured YBa<sub>2</sub>(Cu<sub>1-x</sub>M<sub>x</sub>)<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> (M=Co, Ni, Zn or Ga) large grains. *Supercond Sci Technol* 19:S556. <https://doi.org/10.1088/0953-2048/19/7/S26>
10. Shlyk L, Krabbes G, Fuchs G, Nenkov K, Schüpp B (2005) Effects of annealing treatments on the superconducting melt-processed YBCO doped with Ni. *Supercond Sci Technol* 18:S10. <https://doi.org/10.1088/0953-2048/18/2/003>
11. Murakami M, Gotoh S, Kosizuka N, Tanaka S, Matsushita T, Kambe S, Kitazawa K (1990) Critical currents and flux creep in melt processed high T<sub>c</sub> oxide superconductors. *Cryogenics* 30:390
12. Kim C-J, Kuk I-H, Hong G-W, Sung T-H, Han S-C, Kim JJ (1998) CeO<sub>2</sub> as a growth inhibitor of Y<sub>2</sub>BaCuO<sub>5</sub> in a Ba<sub>3</sub>Cu<sub>5</sub>O<sub>x</sub> liquid phase. *Mater Lett* 34:392
13. Kim C-J, Qadir N, Mahmood A, Han Y-H, Sung T-H (2007) The effect of BaCeO<sub>3</sub> nano particles on the current density of a melt-processed YBCO superconductor. *Physica C* 463–465:344
14. Ren Y, Weinstein R, Liu J, Sawh RP, Foster C (1995) Damage caused by magnetic pressure at high trapped field in quasi-permanent magnets composed of melt-textured Y-Ba-Cu-O superconductor. *Physica C* 251:15



15. Tomita M, Murakami M (2003) High-temperature superconductor bulk magnets that can trap magnetic fields of over 17 tesla at 29 K. *Nature* 421:517
16. Gruss S, Fuchs G, Krabbes G, Verges P, Stöver G, Müller K-H, Fink J, Schultz L (2001) Superconducting bulk magnets: very high trapped fields and cracking. *Appl Phys Lett* 79(19):3131
17. Nougem JG, Meslin S, Harnois C, Chateigner D, Caud X (2004) Melt textured YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> bulk with artificially patterned holes: a new way of processing c-axis fault current limiter meanders. *Supercond Sci Technol* 17:931
18. Dias DH, Sotelo GG, Moysés LA, Telles LGT, Bernstein P, Kenfaui D, Aburas M, Chadm J G Noudem X (2015) Application of texture YBCO bulks with artificial holes for superconducting magnet bearing. *Supercond Sci Technol* 28:075005. <https://doi.org/10.1088/0953-2048/28/7/075005>
19. Kim K-M, Park S-D, Jun B-H, Ko TK, Kim C-J (2012) Simple die pressing for making artificial holes in single-grain Gd<sub>1.5</sub>Ba<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-y</sub> superconductors. *Supercond Sci Technol* 25:105016. <https://doi.org/10.1088/0953-2048/25/10/105016>
20. Oka T, Kanayama H, Fukui S, Ogawa J, Sato T, Ooizumi M, Terasawa T, Itoh Y, Yabuno R (2008) Application of HTS bulk magnet system to the magnetic separation techniques for water purification. *Physica C* 468:2128
21. Yokoyama K, Oka T, Okada H, Noto K (2003) High gradient magnetic separation using superconducting bulk magnets. *Physica C* 392–396:739
22. Chiba A, Okada H, Tada T, Nakazawa H, Mitsuhashi K, Ohara T, Wada H (2002) Removal of arsenic from geothermal water by high gradient magnetic separation. *IEEE Trans Appl Supercond* 12(1):952
23. Coombs TA, Campbell AM, Ganney I, Lo W, Twardowski T, Dawsonm Mater B (1998) Superconducting bearing in flywheels. *Sci Eng B* 53:225
24. Hull JR (2000) Superconductor bearing. *Supercond Sci Technol* 13:R1
25. Han YH, Hull JR, Han SC, Jeong NH, Sung TH, No K (2005) Design and characteristics of a superconductor bearing. *IEEE Trans Appl Phys* 15(2):2249
26. Werfel FN, F-Delor U, Rothfield R, Riedel T, Goebel B, Wippich D, Scirrmeister P (1998) Superconductor bearings, flywheels and transportation. *Supercond Sci Technol* 25:014007. <https://doi.org/10.1088/0953-2048/25/1/014007>
27. Ribeiro PF, Johnson BK, Crow ML, Arsoy A, Liu Y (2001) Energy storage systems for advanced power applications. *Proc IEEE* 89(12):1744
28. Shigenatsu K, Ohta H, Hoshino K, Takayama H, Yagishta O, Yamazaki S, Takahara H, Aono M (1989) Magnetic shield of high-T<sub>c</sub> oxide superconductors at 77 K. *Jpn J Appl Phys* 28(5):L813