

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**MARIA ROSELI SALU DOS SANTOS HEPPNER**

**O ENSINO DA SUPERCONDUTIVIDADE NA EDUCAÇÃO BÁSICA:  
ASPECTOS TEÓRICOS E PRÁTICOS**

**CAMPO MOURÃO  
2022**

**MARIA ROSELI SALU DOS SANTOS HEPPNER**

**O ENSINO DA SUPERCONDUTIVIDADE NA EDUCAÇÃO BÁSICA:  
ASPECTOS TEÓRICOS E PRÁTICOS**

**The teaching of superconductivity in basic education: theoretical and practical  
aspects**

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do título de Mestre em Ensino de Física da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador(a): Professor Dr. Cesar Vanderlei Deimling.

**CAMPO MOURÃO**

**2022**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao (s) autor (es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



Ministério da Educação  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Campus Campo Mourão



**MARIA ROSELI SALU DOS SANTOS HEPPNER**

**O ENSINO DA SUPERCONDUTIVIDADE NA EDUCAÇÃO BÁSICA:  
ASPECTOS TEÓRICOS E PRÁTICOS**

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre em Ensino De Física da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Física Na Educação Básica.

Data de aprovação: 02/junho/2022

Prof. Dr. Cesar Vanderlei Deimling, Doutorado – Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Prof. Dr. Michel Corci Batista, Doutorado – Universidade Estadual de Maringá

---

Prof. Dr. Rafael Zadorosny, Doutorado – Universidade Estadual Paulista

---

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 02/06/2022.

[https://sistemas2.utfpr.edu.br/dpls/sistema/aluno03/mpCADEDocsAssinar.pcTelaAssinaturaDoc?p\\_pesscodnr=227426&p\\_cade\\_docpescodnr=30692&p\\_cadedoccodnr=31533&p\\_cargo=&p\\_tipo=3&p\\_retorno=](https://sistemas2.utfpr.edu.br/dpls/sistema/aluno03/mpCADEDocsAssinar.pcTelaAssinaturaDoc?p_pesscodnr=227426&p_cade_docpescodnr=30692&p_cadedoccodnr=31533&p_cargo=&p_tipo=3&p_retorno=)

Dedico este trabalho a Deus que, por sua infinita bondade, me conduziu e me abençoou para um melhor discernimento, em todas as decisões que precisam ser tomadas. Obrigada meu Deus.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, pela companhia nas horas de aflição e, por seu infinito amor, sempre mostrando os caminhos de minha vida. Meu mais profundo obrigada.

À minha mãe e ao meu pai pelo incentivo constante aos estudos. Eternamente grata.

Ao marido e aos filhos amados, pela compreensão nos momentos de ausência, muito obrigada.

Ao Orientador Prof. Dr. Cesar Vanderlei Deimling, pelos ensinamentos e contribuições, apoio, incentivo e motivação.

Aos amigos de curso que se fizeram presentes nos momentos de alegrias e tristezas, sempre com uma palavra de incentivo.

A (o) s professor (a) s, diretor (a) s, pedagogo (a) s e secretário (a) s do Colégio onde realizei a pesquisa, pela disposição contínua em contribuir com este trabalho. Obrigada.

Aos membros da banca, pela leitura e apreciação deste trabalho, muito obrigada.

Aos professores deste curso (MNPEF) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Campo Mourão, pela postura acolhedora.

Aos docentes e colegas do programa Mestrado Nacional em Ensino de Física pelas vitórias compartilhadas.

Especialmente à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, pelo apoio na realização deste estudo.

“A percepção do desconhecido é a mais fascinante das experiências. O homem que não tem os olhos abertos para o misterioso passará pela vida sem ver nada.”

Albert Einstein.

## RESUMO

Este trabalho objetiva apresentar, desenvolver e discutir uma proposta para o ensino do conteúdo supercondutividade na disciplina de Física, aplicado na educação básica. Para seu desenvolvimento, foram utilizadas diferentes estratégias de ensino como meio de facilitar o processo de ensino e aprendizagem, relacionando o conteúdo com aplicações mais próximas do cotidiano do educando. Esta é uma pesquisa de Mestrado Profissional, conduzida no Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campo Mourão (UTFPR-CM), em parceria com a Sociedade Brasileira de Física (SBF). O referencial teórico-metodológico adotado nesta pesquisa teve por base a Pedagogia Histórico – Crítica, proposta por Dermeval Saviani, que objetiva contribuir para apropriação dos conhecimentos historicamente produzidos pela humanidade. Com a apresentação do tema, desenvolveu-se pesquisa-intervenção de abordagem qualitativa em uma turma do 3º ano do ensino médio do Colégio Estadual Presidente Castelo Branco - Ensino Médio, Normal e Profissional, pertencente ao Núcleo Regional de Educação de Toledo – PR. Diante das atividades aplicadas, pode-se afirmar que os resultados alcançados foram satisfatórios, uma vez que houve envolvimento dos alunos e assimilação dos conceitos, relacionado-os com as principais aplicações do cotidiano.

**Palavras-chave:** Supercondutividade; Pedagogia Histórico-Crítica; Ensino De Física; Educação Básica.

## ABSTRACT

This work aims to present, develop, and discuss a proposal for teaching superconductivity content in Physics, applied in basic education. For its development, different teaching strategies were used to facilitate the teaching and learning process, relating the content with applications closer to the student's daily life. The present work is a Professional Master's research conducted in the Graduate Program in Physics Teaching at the Federal Technological University of Paraná – Campo Mourão (UTFPR-CM), in partnership with the Brazilian Society of Physics (SBF). The theoretical-methodological framework adopted in this research was based on the Historical-Critical Pedagogy, proposed by Dermeval Saviani, which aims to contribute to the appropriation of knowledge historically produced by humanity. With the presentation of the theme, one developed intervention research with a qualitative approach in a class in the 3rd year of high school at Colégio Estadual Presidente Castelo Branco - High School, Normal and Professional, belonging to the Regional Center for Education of Toledo - PR. In view of the activities applied, the achieved results were satisfactory since the students' involvement and assimilation of the concepts related them to the main applications of everyday life.

**Key-words:** Superconductivity; Historical Critical Pedagogy; Physics Teaching; Basic Education.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Imagem de Kammerlingh Onnes.....	16
Figura 2: Medida da resistência em função da temperatura para a amostra de mercúrio.....	17
Figura 3: (a) O comportamento de um supercondutor, revelando o efeito Meissner abaixo de $T_c$ , e em (b) de condutor perfeito que obedece à lei da indução de Faraday.....	18
Figura 4: Comportamento da magnetização $M$ em função da indução magnética aplicada em supercondutores (a) do tipo I e (b) do tipo II. Indução magnética aplicada $B = \mu_0(H+M)$ em supercondutores (a) do I e (b) do tipo II.....	22
Figura 5: Evolução do descobrimento dos materiais supercondutores.....	24
Figura 6: Dependência dos campos críticos em função da temperatura para supercondutores do tipo I (a) e do tipo II (b) .....	25
Figura 7: Ilustração da rede de Abrokosov, e da dependência espacial do comprimento de coerência.....	26
Figura 8: Íons positivos atraídos pelo elétron que passa pela rede cristalina do material supercondutor, fazendo interação elétron-fónon e finalmente formando par de Cooper.....	28
Figura 9: Esquema do trem de Maglev de funcionamento operacional desenvolvido no Japão.....	31
Figura 10: Ilustração de imã levitando sobre um supercondutor.....	32
Figura 11: Ilustração de um supercondutor tipo II, no estado misto, na presença de um campo magnético.....	32
Figura 12: Esquema básico de uma junção Josephson.....	33
Figura 13: Representação de um sensor SQUID.....	34
Figura 14: Alunos respondendo ao questionário inicial no Quizizz.....	43
Figura 15: Alunos em sala de aula no momento inicial do desenvolvimento do conteúdo de supercondutividade.....	47
Figura 16: Pista de imãs levitando o supercondutor.....	48
Figura 17: Fenômeno da levitação.....	50
Figura 18: Medição de resistência antes e depois do uso do nitrogênio.....	51

<b>Figura 19: Livros de história em quadrinhos montados pelos alunos participantes da pesquisa.....</b>	<b>52</b>
<b>Figura 20: Fragmentos de páginas internas dos gibis.....</b>	<b>53</b>
<b>Figura 21: Momento da aplicação do questionário final.....</b>	<b>54</b>
<b>Figura 22: Apresentação dos “gibis” – história em quadrinhos.....</b>	<b>60</b>

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 1: Laureados com o prêmio Nobel de Física por pesquisas realizadas no campo da supercondutividade.....</b>	<b>23</b>
<b>Quadro 2: Respostas para a questão 3 – questionário final.....</b>	<b>55</b>
<b>Quadro 3: Nomes de pesquisadores que contribuíram para a compreensão da supercondutividade elencados pelos alunos.....</b>	<b>58</b>

## **LISTA DE TABELAS**

<b>Tabela 1: Parâmetros característicos de diversos supercondutores.....</b>	<b>20</b>
--	-----------

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>16</b>
<b>2.1</b>	<b>A supercondutividade</b> .....	<b>16</b>
2.1.1	Efeito meissner.....	21
2.1.2	Resistência nula.....	22
2.1.3	Materiais supercondutores.....	23
2.1.4	Supercondutores do tipo II: o estado misto.....	25
2.1.5	A teoria BCS.....	27
2.1.6	Aplicações da supercondutividade.....	28
2.1.7	Levitação magnética.....	30
2.1.8	Junções Josephson e SQUIDS.....	33
<b>2.2</b>	<b>O Ensino de Física na perspectiva histórico crítica</b> .....	<b>34</b>
<b>3</b>	<b>MÉTODOS E PROCEDIMENTOS</b> .....	<b>38</b>
<b>3.1</b>	<b>Procedimento de construção dos dados</b> .....	<b>39</b>
<b>3.2</b>	<b>Perfis das escolas e das turmas envolvidas</b> .....	<b>40</b>
<b>3.3</b>	<b>Procedimentos de análise dos dados</b> .....	<b>41</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>42</b>
<b>4.1</b>	<b>Partindo da prática social inicial</b> .....	<b>44</b>
<b>4.2</b>	<b>Problematizando a prática social e instrumentalizando os alunos</b> .....	<b>46</b>
<b>4.3</b>	<b>Retornando à prática social final</b> .....	<b>53</b>
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>62</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>64</b>
	<b>APÊNDICE A – Questionário inicial/final</b> .....	<b>68</b>
	<b>APÊNDICE B – Gabarito do questionário inicial</b> .....	<b>72</b>
	<b>APÊNDICE C – Gibis produzidos pelos alunos</b> .....	<b>74</b>
	<b>APÊNDICE D – Produto Educacional</b> .....	<b>117</b>

## INTRODUÇÃO

A Pedagogia Histórico-Crítica, proposta por Saviani (2011), sugere uma prática pedagógica baseada na interação entre conteúdo e realidade, visando a transformação da sociedade por meio da ação-compreensão-ação do educando e enfoca nos conteúdos como produção histórica e social de todos os homens.

Gasparin (2003) afirma que o uso das técnicas e das ferramentas convencionais de mediação em sala de aula auxilia no processo ensino aprendizagem dos conteúdos escolares. Este trabalho apresenta uma proposta embasada no referencial teórico da Pedagogia Histórico-Crítica e faz uma abordagem conceitual e qualitativa sobre a supercondutividade para o ensino médio.

Nesse sentido, recursos educacionais integrados às TDICs (Tecnologias Digitais de Informação e Comunicação), como os Quizizz, e o uso de ferramentas digitais, foram utilizados com o objetivo de facilitar e favorecer a aprendizagem dos conteúdos de supercondutividade abordados ao longo da pesquisa, tornando a aula mais interativa e motivadora para os estudantes.

O uso das TDICs proporciona a abordagem dos conteúdos de maneira mais dinâmica e interativa, como por exemplo, no uso de vídeos que abordam a descoberta da supercondutividade e seu contexto histórico que, de maneira comentada, podem facilitar a compreensão dos tópicos da supercondutividade, dos materiais supercondutores, da teoria BCS (Bardeen-Cooper-Schrieffer), do efeito Meissner e da levitação magnética. Neste sentido, outra ferramenta utilizada ao longo do produto educacional para consolidar o aprendizado sobre o tema da supercondutividade, tornando-o mais efetivo e sistematizado, foi a elaboração de textos na forma de histórias em quadrinhos, que foram conduzidas pelos alunos com muito empenho e dedicação.

Concordamos com Ostermann (2000) quando afirma que os conteúdos curriculares presentes geralmente se limitam a contemplar a Física Clássica, descrevendo os conceitos e as teorias elaboradas até o final do século XIX. É importante citar que as críticas se referem à predominância quase que exclusiva de temas clássicos e não à presença destes no currículo, pois eles fornecem suportes para a compreensão de diversos fenômenos físicos presentes na prática social, bem

como as aplicações tecnológicas relacionadas à, como é o caso da supercondutividade.

Dentre os trabalhos que abordam a introdução ao Ensino da Física Moderna e Contemporânea (FMC) – do qual a supercondutividade se enquadra -, Carvalho e Zanetic (2004) defendem que a aprendizagem desses conteúdos colabora para que os estudantes desenvolvam um entusiasmo maior e duradouro pela ciência, com o intento por parte dos estudantes.

Entende-se que a inserção de temas da Física Moderna e Contemporânea no ensino médio se torna necessária para que os educandos compreendam a sua função no desenvolvimento científico e tecnológico, bem como da relação entre os diferentes campos do conhecimento, como o econômico, o conceitual, o cultural e o social.

Analisando a escassez de trabalhos sobre o tema de supercondutividade no Ensino de Física e, tendo em vista que a discussão para a inserção do tema já vem ocorrendo desde a década de noventa, com os Parâmetros Curriculares Nacionais – PCN, a proposta pretende, então, preencher esta lacuna existente.

Nesse contexto, o produto educacional desenvolvido a partir desta pesquisa de mestrado tem como tema a supercondutividade na educação básica e é caracterizada por uma ação necessária para levar o aluno a compreender, de uma forma contextualizada, uma pequena parte da Física Moderna e Contemporânea. Usando-se de aplicações tecnológicas relacionadas a este tema, e de atividades teórico-práticas, buscamos a compressão aprofundada e articulada com a realidade cotidiana do estudante.

Na implementação do produto educacional para a abordagem dos conteúdos em sala de aula deve-se utilizar muitas ações didático-pedagógicas e dentre elas destacam-se: um questionário (utilizado nos momentos inicial e final), vídeos sobre o fenômeno, experimento sobre a levitação magnética (de autoria própria), textos sobre o tema, exposição oral dialogada em diferentes momentos e a elaboração de uma história em quadrinho pelos estudantes (gibi) sobre o tema.

Esta pesquisa teve como objetivo maior apresentar, desenvolver e discutir uma proposta para o ensino do conteúdo supercondutividade na disciplina de Física, aplicado na educação básica. Através de aulas teórico-práticas, utilizamos recursos tecnológicos que permitiram contribuir com o ensino da supercondutividade,

caracterizado por ser um tema da Física que contribui para o desenvolvimento e compreensão do aluno nas aplicações dos avanços tecnológicos.

Para tanto, este trabalho foi organizado da seguinte maneira: o primeiro capítulo, composto pela introdução, apresenta os motivos da escolha do tema; o segundo capítulo, composto pela fundamentação teórica, faz, na primeira parte, uma revisão bibliográfica sobre o conteúdo supercondutividade e, na segunda parte aborda a questão do Ensino de Física na perspectiva “histórico-crítica”; no terceiro capítulo, denominado método e procedimentos, são apresentados os procedimentos de construção dos dados, o perfil da escola e das turmas envolvidas na implementação desta pesquisa, bem como os procedimentos de análise dos dados coletados. No quarto capítulo são realizadas discussões sobre os resultados alcançados, apresentando-se a prática social inicial; problematizando a prática social e instrumentalizando os alunos e fazendo o retorno à prática social final. Por fim, são traçadas as considerações finais, seguidas das referências utilizadas para a construção desta pesquisa e dos apêndices.



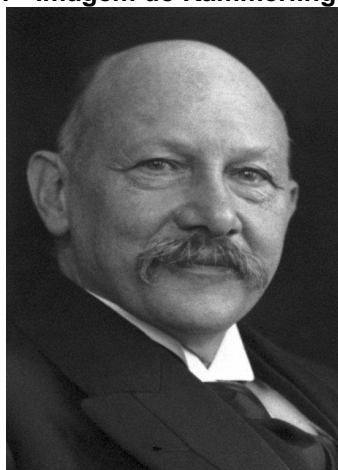
## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 A supercondutividade

Mediante a apresentação da temática para o desenvolvimento deste produto educacional - o ensino da supercondutividade na educação básica - é fundamental conhecer os conceitos básicos sobre o conteúdo embasado em uma abordagem histórica, conceitual e qualitativa.

A supercondutividade é um fenômeno descoberto pelo físico holandês Heike Kamerling Onnes, em 08 de abril de 1911, na Holanda, que realizou medidas de resistência elétrica em uma amostra de mercúrio em função da temperatura. Onnes estava pesquisando as propriedades de diferentes metais em temperaturas extremamente baixas, submetendo os materiais em um banho de hélio líquido. A descoberta da supercondutividade aconteceu na verificação de que a resistência elétrica caía inesperadamente a zero em 4,2 K (-268,95°C) no mercúrio. Essa temperatura. Essa descoberta possibilitou o desenvolvimento de uma nova classe de materiais: os materiais supercondutores. O interesse por esses materiais despertou um aumento nos estudos voltados à compreensão deste fenômeno, que se constituiu num dos estudos mais fascinantes e desafiadores do século XX. Por esse motivo, Heike Kammerlingh Onnes, cuja imagem é mostrada na Figura 1, foi laureado com o Prêmio Nobel de Física em 1913 (BRANÍCIO, 2001).

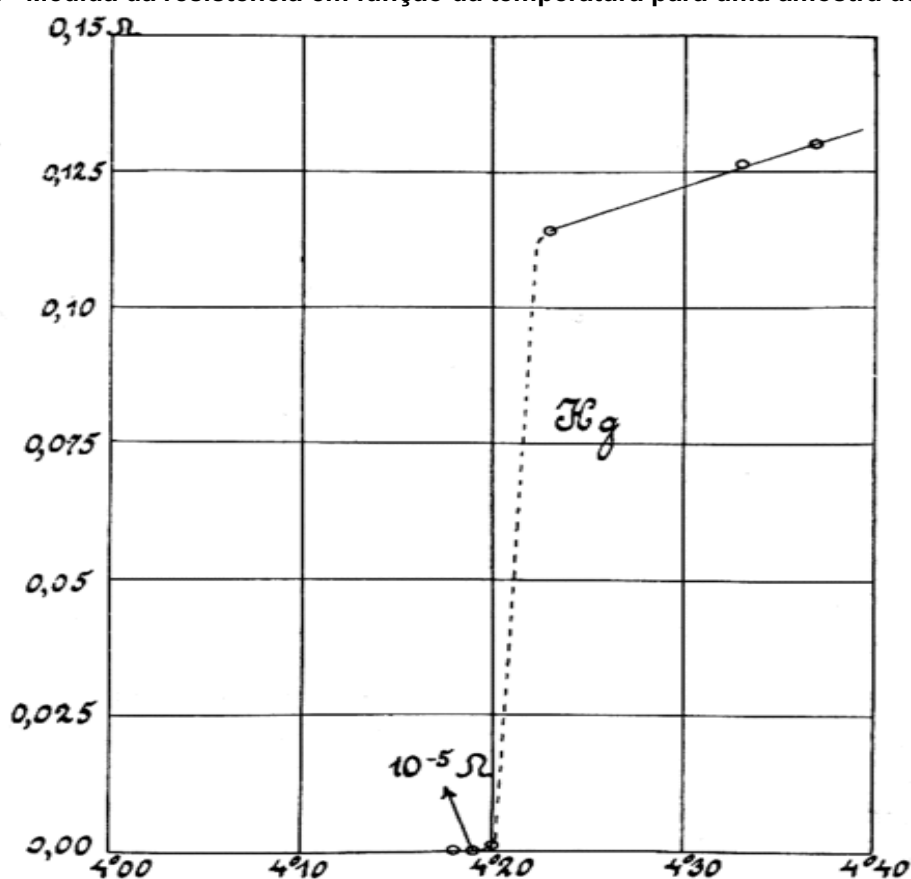
**Figura 1 - Imagem de Kammerlingh Onnes**



**Fonte: MLA style (2022)**

Nascido em Groningen, na Holanda, Heike Kamerlingh Onnes ganhou o prêmio Nobel de Física em 1913 pelos trabalhos realizados sobre propriedade da matéria e seus esforços para atingir temperaturas extremamente baixas, resultado da liquefação do hélio em 1908. Este feito deu a ele muita fama no que diz respeito aos trabalhos em criogenia e futuramente nos estudos sobre os supercondutores.

Figura 2 - Medida da resistência em função da temperatura para uma amostra de mercúrio.



Fonte: MAROUCHKINE, 2004, p. 310

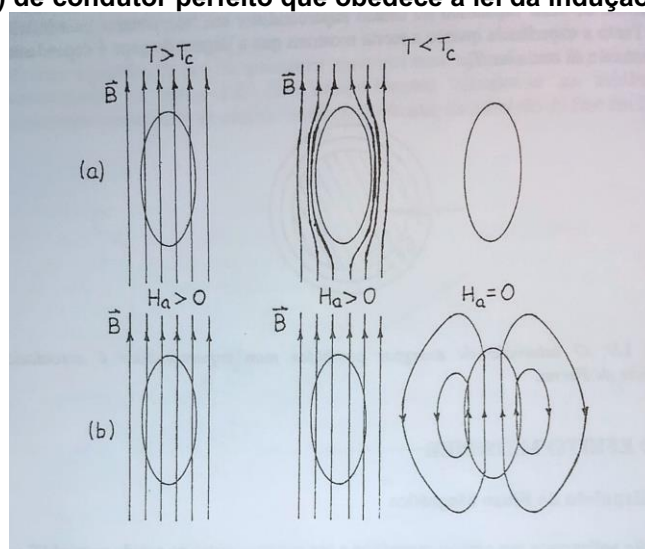
Analisando a Figura 2, podemos notar a transição entre as fases normal e supercondutora para uma amostra de mercúrio, em medição originalmente realizada por Onnes. Nela podemos observar um comportamento linear entre a resistência e a temperatura acima de  $T_c$  – tipicamente esperado para metais –, seguido da transição supercondutora, que ocorre quando resfriamos a amostra para temperaturas menores que a temperatura crítica, denominada  $T_c$ , abaixo da qual a resistência elétrica passa a ser nula. Cabe destacar que para aferir a temperatura crítica nesta técnica de medida, a corrente elétrica aplicada na medida de resistência em função da temperatura não pode ser elevada, pois neste caso, a transição de

fase pode ser antecipada, tendo em vista a energia transferida para a amostra neste processo.

Mais tarde, no ano de 1933, Walther Meissner e Robert Ochsenfeld completaram a definição dos supercondutores com a descoberta do efeito Meissner, ou seja, a expulsão do campo magnético do seu interior, que é característico de um diamagnetismo perfeito. Portanto, para que um material seja caracterizado como supercondutor, é necessária a apresentação de duas propriedades físicas simultâneas: a resistência elétrica nula e o efeito Meissner abaixo de  $T_c$  (COSTA; PAVÃO, 2012).

Visando diferenciar o comportamento entre um condutor perfeito (com resistência nula) e um supercondutor, apresentamos na Figura 3, um procedimento chamado de resfriamento na presença de um campo magnético (*Field Cooling – FC*). Se aplicarmos um campo magnético fraco a um sistema supercondutor quando esse se encontra no estado normal ( $T > T_c$ ) e realizarmos o procedimento *FC*, observaremos uma expulsão abrupta do campo magnético quando o estado supercondutor for obtido, em temperaturas menores ou iguais a  $T_c$ , caracterizando o fenômeno efeito Meissner, conforme Figura 3a.

**Figura 3: (a) O comportamento de um supercondutor, revelando o efeito Meissner abaixo de  $T_c$ , e em (b) de condutor perfeito que obedece à lei da indução de Faraday.**



Fonte: Pureur, 2004, p 10.

No procedimento *ZFC (Zero Field Cooling)* quando a amostra foi resfriada sem nenhum campo magnético aplicado, sua magnetização ou suscetibilidade estática apresenta um pico na temperatura de transição.

O procedimento FC (onde resfria-se a amostra na presença de um campo magnético) com o qual verifica-se que o fluxo é excluído do interior do material. É por este procedimento que se demonstra que um SC não é um condutor perfeito e, sim, um diamagneto perfeito (OSTERMANN; PUREUR, 2005).

Porém o mesmo não ocorre com o condutor perfeito ( $R = 0$ ), que permanece com o campo magnético penetrado no seu interior em temperaturas baixas, conforme mostra a Figura 3 (b). Esta propriedade mostra que, se a transição de fase ocorrer na presença de um campo magnético, serão induzidas supercorrentes superficiais nas amostras supercondutoras que cancelam a indução magnética  $B$  no seu interior, caracterizando o efeito Meissner. Por fim, ainda na Figura 3b, quando o campo externo é anulado, em função da indução magnética e em conformidade com a Lei de Faraday, surge no condutor perfeito um campo oposto à variação de fluxo magnético, revelando ao final, uma amostra com campo aprisionado no seu interior.

A lei da indução eletromagnética, frequentemente referida como lei de Faraday é de suma importância para o desenvolvimento do eletromagnetismo, uma vez que revela a existência de uma relação direta entre fenômenos elétricos e magnéticos, que foram tratados como fenômenos distintos por muitos anos.

De acordo com Hessel, Frechi e Santos (2015) a lei de Faraday enuncia que quando houver variação do fluxo magnético através de um circuito, surgirá nele uma força eletromotriz induzida. Nota-se que o surgimento de correntes elétricas depende da mudança temporal de fluxo magnético. Segundo a Lei de Faraday, a variação temporal de fluxo magnético é equivalente ao negativo do potencial elétrico medido em volts (V), chamado de força eletromotriz induzida ( $\mathcal{E}$ ), conforme se observa na equação 1:

$$\mathcal{E} = - \frac{\Delta\phi}{\Delta t} \quad (1)$$

Onde se tem:  $\mathcal{E}$  - força eletromotriz induzida (V - volts),  $\Delta\Phi = \Phi_F - \Phi_i$  - variação do fluxo magnético (Wb) e  $\Delta t$  - intervalo de tempo (s).

Deve-se destacar que o sinal negativo na lei de Faraday, explicitado na Lei de Lenz, permite conhecer qual é o sentido da corrente elétrica induzida, uma vez que esta sempre será formada em um sentido tal que o fluxo magnético por ela produzido oponha-se ao fluxo magnético que a induziu.

Outro apontamento importante que devemos observar a partir da Figura 3, é de que a blindagem do campo magnético nos supercondutores não obedece a lei da indução de Faraday, pois no estágio final do procedimento FC, o supercondutor continua com campo nulo no seu interior (efeito Meissner, figura 3 (a)), enquanto que o condutor perfeito gera correntes induzidas que aprisionam campo no seu interior (Figura 3 (b)).

Cabe destacar que estas correntes superficiais circulam numa espessura do material em uma escala característica denominada profundidade de penetração de London,  $\lambda$ . Esta quantidade é uma das grandezas características do estado supercondutor, que depende de cada material, mas em geral varia de dezenas a centenas de nanômetros.

A seguir apresentamos a Tabela 1, com exemplos de grandezas características do estado supercondutor com as suas respectivas temperaturas críticas.

A partir da Tabela 1, podemos verificar a profundidade de penetração de London,  $\lambda$ , para diferentes materiais, que define o quanto o campo magnético pode penetrar na superfície do supercondutor (SILVA, 2016), além do comprimento de coerência  $\xi$ , e do parâmetro de Ginzburg-Landau, que serão discutidos nas seguintes seções.

**Tabela 1: Parâmetros característicos de diversos supercondutores.**

Material	$T_c$ (K)	$\xi$ (nm)	$\lambda$ (nm)	$\kappa$ ( $\lambda/\xi$ )	Source
Cd	0.56	760	110	0.14	Meservey and Schwartz (1969)
Al <sup>a</sup>	1.18	15.10	40	0.03	Table 9.2
In <sup>a</sup>	3.41	360	40	0.11	Table 9.2
Sn <sup>a</sup>	3.72	180	42	0.23	Table 9.2
Ta	4.4	93	35	0.38	Buckel (1991)
Pb <sup>a</sup>	7.20	82	39	0.48	Table 9.2
Nb <sup>a</sup>	9.25	39	52	1.28	Table 9.2
Pb-In	7.0	30	150	5.0	Orlando and Delin (1991)
Pb-Bi	8.3	20	200	10	Orlando and Delin (1991)
Nb-Ti	9.5	4	300	75	Orlando and Delin (1991)
Nb-N	16	5	200	40	Orlando and Delin (1991)
PbMo <sub>6</sub> S <sub>8</sub> (Chevrel)	15	2	200	100	Orlando and Delin (1991)
V <sub>3</sub> Ga (A15)	15	≈2.5	90	≈35	Orlando and Delin (1991)
V <sub>3</sub> Si (A15)	16	3	60	20	Orlando and Delin (1991)
Nb <sub>3</sub> Sn (A15)	18	3	65	22	Orlando and Delin (1991)
Nb <sub>3</sub> Ge (A15)	23.2	3	90	30	Orlando and Delin (1991)
K <sub>3</sub> C <sub>60</sub>	19	2.6	240	92	Holczer <i>et al.</i> (1991)
Rb <sub>3</sub> C <sub>60</sub>	29.6	2.0	247	124	Sparn <i>et al.</i> (1992)
(La <sub>0.925</sub> Sr <sub>0.075</sub> ) <sub>2</sub> CuO <sub>4</sub> <sup>b</sup>	37	2.0	200	100	Poole <i>et al.</i> (1988)
YBa <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>7</sub> <sup>b</sup>	89	1.8	170	95	Poole <i>et al.</i> (1988)
HgBaCaCuO	126	2.3			Gao <i>et al.</i> (1993)
HgBa <sub>2</sub> Ca <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>8+δ</sub>	131			100	Schilling <i>et al.</i> (1994b)

<sup>a</sup> Figures are rounded averages from Table 12.2.

<sup>b</sup> Averages of the polycrystalline data from our earlier Table III-1 (1988).

Fonte: Poole *et al.* (2007, p. 343).

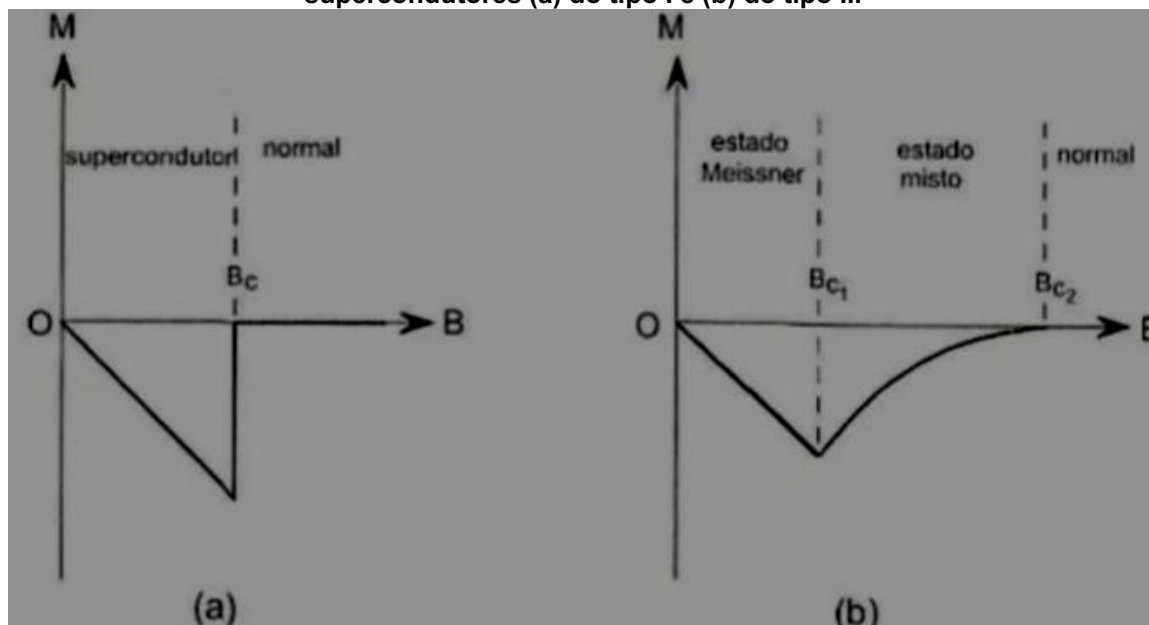
### 2.1.1 Efeito Meissner

O efeito Meissner é observado em todos os supercondutores desde que o campo aplicado seja suficientemente fraco. Porém, alguns materiais supercondutores, descobertos posteriormente, apresentaram diferentes comportamentos em relação ao campo magnético (SILVA, 2015). O resultado disso levou à classificação de dois tipos de supercondutores. Os supercondutores do tipo I apresentam apenas os estados Meissner e normal. Se o campo aplicado for inferior ao valor crítico não ocorre penetração de campo magnético no seu interior, como mostrado na Figura 4 (a) por meio do comportamento de curvas do campo magnético aplicado em função da magnetização. A magnetização define a resposta magnética que os materiais apresentam quando são submetidos à presença de um campo magnético externo. Neste sentido alguns materiais podem reagir fracamente ao campo magnético (baixos valores de magnetização), como é o caso do alumínio, ou podem reagir fortemente à presença de campo magnético externo (alta magnetização), como é o caso dos supercondutores (repulsão) e do Ferro (atração). Partindo da representação fundamental entre os campos  $\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M})$ , na presença do efeito Meissner,  $B = 0$ , a relação entre o campo aplicado e a magnetização pode ser obtida como mostra a equação 2:

$$\mathbf{H} = -\mathbf{M} \quad (2)$$

Já os supercondutores do tipo II apresentam dois campos críticos (Figura 4 (b)). A exclusão total do fluxo magnético por meio do estado Meissner, que persiste em condições menores que o campo crítico inferior  $H_{c1}$ , cujo valor sempre baixo, sendo que acima deste campo, o fluxo magnético penetra parcialmente na amostra, coexistindo com a supercondutividade até que seja atingido o campo crítico superior,  $H_{c2}$ , acima do qual a supercondutividade deixa de existir (Figura 4 (b)). A região do diagrama de fases entre o valor de  $H_{c1}$  e  $H_{c2}$  é denominada de estado misto ou estado de vórtices, em função da penetração quantizada de fluxo magnético no interior da amostra. Cabe destacar que os supercondutores do tipo II possuem maior utilidade tecnológica, pois apresentam  $T_c$  mais elevadas, além dos valores de  $H_{c2}$  encontrados nesse sistema são geralmente mais elevados que os valores de  $H_c$  encontrados nos supercondutores do tipo I (PUREUR, 2012).

Figura 4 - Comportamento da magnetização  $M$  em função da indução magnética aplicada em supercondutores (a) do tipo I e (b) do tipo II.



Fonte: MENEGOTTO (2012)

Desde o surgimento da supercondutividade em 1911, diferentes materiais supercondutores foram descobertos, o que gerou grande entusiasmo da comunidade científica, principalmente pelo aumento gradativo na temperatura crítica, o que possibilitou o uso do Nitrogênio Líquido (com temperatura de ebulição de 77K). Esse uso se deu, em especial, no caso dos cupratos cerâmicos (YBCO, LBCO, dentre outros) e não dependendo dos altos custos agregados ao hélio líquido 4,2 K para a verificação e o estudo da supercondutividade nesses materiais (BARROS E SILVA, 2003).

### 2.1.2 Resistência nula

Podemos afirmar que a existência do efeito Meissner no interior de um supercondutor implica numa resistência nula. Se a resistência elétrica não fosse nula a corrente superficial deveria diminuir com o tempo e, portanto, o valor de  $B$  deixaria de ser nulo no interior do supercondutor. As tentativas realizadas por Kamerling Onnes para medir resistência elétrica de um supercondutor mostraram que essa resistência era sempre menor que o valor mínimo, difícil de ser mensurado, porém, com o avanço do desenvolvimento de técnicas mais refinadas de medidas, ficou confirmado que este valor é nulo.

### 2.1.3. Materiais supercondutores

A partir da descoberta da supercondutividade no mercúrio por Onnes em 1911, diversas pesquisas realizadas em sistemas supercondutores tiveram reconhecimento científico, gerando vários prêmios Nobel aos pesquisadores envolvidos, como mostrado no Quadro 1.

**Quadro 1 - Laureados com o prêmio Nobel de Física por pesquisas realizadas no campo da supercondutividade**

<b>Ano</b>	<b>Premiados</b>	<b>Colaboração</b>
<b>1913</b>	Heike K. Onnes	Abordagem sobre a propriedade da matéria em baixas temperaturas e a descoberta da supercondutividade.
<b>1972</b>	John Bardeen Leon N. Cooper Robert Schrieffer	Teoria microscópica da supercondutividade denominada BCS.
<b>1973</b>	Brian D. Josephson  Ivar Giaver  Obs.: Neste ano Leo Esaki também foi contemplado por seus estudos sobre tunelamento em semicondutores.	Teoria do tunelamento dos pares de Cooper.  Tunelamento de elétrons.
<b>1987</b>	Karl Alex Muller J. Georg Bednorz	Descoberta da supercondutividade de alta temperatura crítica em um cuprato de lantânio e bário.
<b>2003</b>	Vitaly Ginzburg  Alexei A. Abrikosov	Teoria fenomenológica.  Teoria dos supercondutores do tipo II

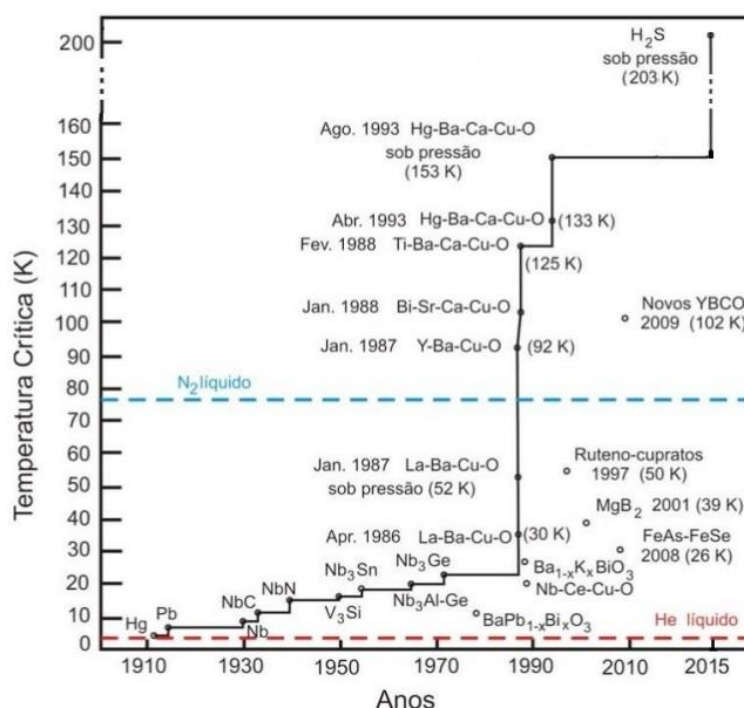
Fonte: Modificado de refe Pavão (2012, p. 2602-10).

Em paralelo com o desenvolvimento das teorias aplicadas ao fenômeno da supercondutividade, as pesquisas experimentais demonstravam que este fenômeno era verificado em diferentes materiais, e em temperaturas que se superavam com o decorrer do tempo, como mostrado na Figura 5. Neste sentido, a evolução cronológica da temperatura crítica dos materiais supercondutores apresentou um marco importante para a descoberta de muitos compostos Nb entre as décadas de 30 e 70, como o difundido Nb<sub>3</sub>Sn (composto intermetálico nióbio-estanho), que



viabilizou o desenvolvimento de aplicações tecnológicas na geração de campo magnético intenso. Outro marco importante foi obtido em 1986, com a descoberta do do Composto de Lantâneo de Bário (LBCO) por Johannes Georg Bednorz e Karl Alexander Müller, o primeiro da classe dos cupratos cerâmicos que superaram a temperatura de liquefação do nitrogênio, 77 K (kelvin), difundindo ainda mais esse campo de estudo em função da sua abundância e viabilidade econômica.

Figura 5 - Evolução do descobrimento dos materiais supercondutores.



Fonte: LEPICH (2017, p. 16)

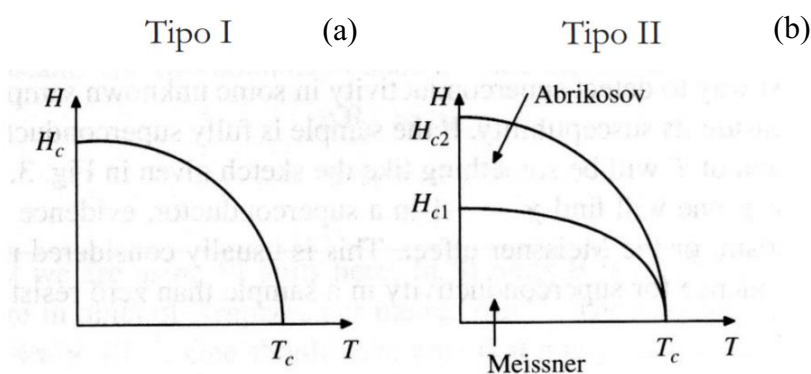
Cabe destacar que na maioria dos casos, os materiais supercondutores que apresentam altas temperaturas críticas, não apresentam boas propriedades condutoras no estado normal, como é o caso dos óxidos cerâmicos,  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  ( $T_c = 92 \text{ K}$ ) e  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+\delta}$  ( $T_c = 108 \text{ K}$ ), ou apenas apresentam a supercondutividade próximas da temperatura ambiente quando submetidos à altíssimas pressões, da ordem de centenas de GPa (Giga Pascal), como é o caso dos hidretos  $\text{YH}_6$ ,  $\text{LaH}_{10}$  e  $\text{H}_2\text{S}$ . Cabe destacar que este último grupo de materiais, os hidretos supercondutores, possuem suas propriedades descritas pela teoria BCS, diferente da maioria dos supercondutores de alta temperatura crítica descobertos até este momento.

#### 2.1.4 Supercondutores do tipo II: o estado misto

De uma maneira geral, os supercondutores do tipo II apresentam maior utilidade tecnológica em relação aos supercondutores do tipo I, pois apresentam maiores valores de  $H_{c2}$  (Campo magnético crítico), possibilitando o transporte de densidade de corrente elétrica mais elevada.

Em um supercondutor do tipo I, a supercondutividade é descrita pelo estado Meissner,  $B = 0$ , coexistindo com o regime de resistência nula. No entanto, os supercondutores do tipo II apresentam uma região no diagrama de fases  $H \times T$ , entre o valor inferior  $H_{c1}$  e superior  $H_{c2}$ , o estado misto, caracterizado pela penetração quantizada de campo magnético no material em coexistência com o regime supercondutor de resistência nula, como mostrado na Figura 6.

**Figura 6 - Dependência dos campos críticos em função da temperatura para supercondutores do tipo I (a) e do tipo II (b).**



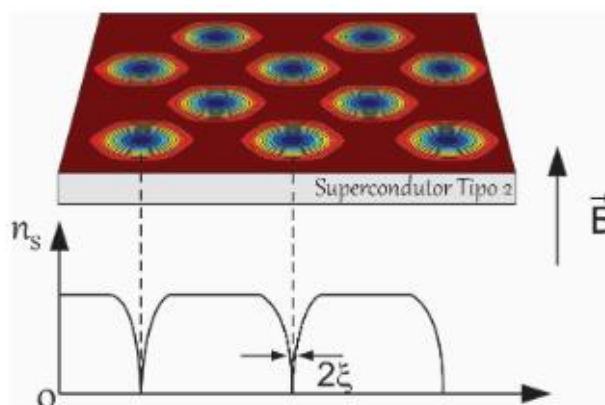
Fonte: Pureur, 2004, p.4.

Analisando o diagrama de fases representado na Figura 6 (b) podemos observar diferenças entre a transição para o estado normal nos supercondutores do tipo I e II. Nos supercondutores do tipo II, o estado supercondutor é formado por duas regiões diferentes; abaixo de  $H_{c1}$ , o estado Meissner, entre  $H_{c1}$  e  $H_{c2}$ , o estado misto. Acima da linha  $H_{c2}$ , o campo magnético penetra completamente todo o material fazendo com que o supercondutor transicione para o estado normal.

No estado misto o campo magnético penetra de forma quantizada no supercondutor, por meio de vórtices, que tendem a se organizar na forma hexagonal centrada, conhecida como a rede de Abrikosov. Os vórtices dessa rede são formados por um núcleo, com campo magnético e que atinge o estado normal no seu centro, que é circulado por supercorrentes, que tendem a confinar esse fluxo magnético (OSTERMANN; PUREUR, 2005).

Cabe destacar que os vórtices podem ser representados como cilindros que transpassam a amostra da sua base ao topo. Estes cilindros, de diâmetro típico  $\xi$ , o comprimento de coerência, são circundados por correntes que impedem que o campo no seu interior se espalhe pelo material. Essas correntes também se distribuem por um comprimento tipicamente dado por  $\lambda$ , a profundidade de penetração de London, como mostrado na Figura 7.

**Figura 7 - Ilustração da rede de Abrikosov, e da dependência espacial do comprimento de coerência.**



Fonte: RODRIGUES, 2013, p. 20.

É interessante ressaltar que a dimensão espacial dessa rede de vórtices muda conforme o campo magnético no qual a amostra está submetida. Dessa forma, considerando que a amostra esteja no estado misto, quanto mais próxima da linha  $H_{c2}$ , ou seja, da condição de campo crítico e de temperatura crítica, maior será a densidade de vórtices e mais próximos estarão um do outro no interior do supercondutor, de modo que ao cruzar a linha  $H_{c2}$  do diagrama de fases, a amostra estará completamente preenchida por vórtices, e nesta situação não restará qualquer porção supercondutora no seu interior, ou seja, a amostra terá transicionado para o estado normal.

É interessante destacar que mediante a razão da profundidade de penetração de London,  $\lambda$ , e o comprimento de coerência,  $\xi$ , é possível definir o parâmetro de Ginzburg-Landau,  $\kappa$ , que pode ser usado para classificar os supercondutores do tipo I e II, conforme a equação 3.

$$\kappa = \frac{\lambda}{\xi} \quad (3)$$

Quando  $\kappa$  for menor que  $1/\sqrt{2}$ , o supercondutor será do tipo I e caso  $\kappa$  for maior que  $1/\sqrt{2}$ , o supercondutor será do Tipo II.

### 2.1.5 A teoria BCS

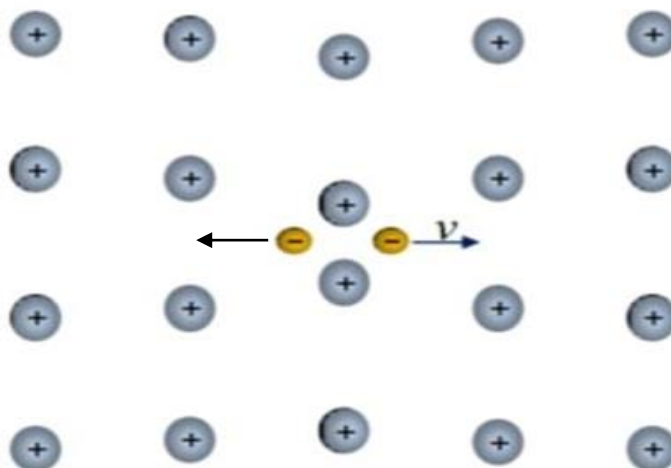
A teoria BCS foi formulada em 1957 pelos físicos americanos John Bardeen, Leon Cooper e John Robert Schrieffer, sendo a primeira teoria que partia de argumentos baseados no comportamento de propriedades microscópicas da matéria, que buscavam explicar melhor o fenômeno da supercondutividade. Nesta teoria, os elétrons presentes em um material no estado supercondutor organizam-se em pares, conhecidos como pares de Cooper. Para tanto, os elétrons formadores dos pares de Cooper se acoplam por meio das oscilações dos átomos da rede cristalina, que se comportam como íons positivos. Essas vibrações se propagam ao longo da rede cristalina do supercondutor promovendo o movimento dos pares de Cooper livre de resistência elétrica (COSTA; PAVÃO, 2012).

A Figura 8 mostra o fenômeno do elétron passando pelos íons, o qual atrai os íons positivos mais próximos na rede, aumentando a concentração de cargas positivas. Assim, de acordo com Costa e Pavão (2012) observa-se que os pares de Cooper atuam como Bósons, ou seja, como partículas de spin inteiro, porque podem se condensar a um mesmo nível de energia, em relação ao comportamento dos elétrons isolados.

Para Costa e Pavão (2012), os íons que estão presos à rede cristalina por forças elásticas, geram uma região com maior densidade de carga que se propaga pelo material como uma onda de vibração de rede, conhecida como fônon, permitindo o acoplamento dos elétrons. Desta forma, o par de Cooper apresenta

uma separação entre seus elétrons da ordem do comprimento de coerência, cada um com spins e momentos lineares opostos.

**Figura 8 - Íons positivos atraídos pelo elétron que passa pela rede cristalina do material supercondutor, fazendo interação elétron-fóton e finalmente formando par de Cooper.**



Fonte: Adaptado de MIRANDA, (2013, p. 32).

Pela teoria BCS, o conceito físico fundamental é que um elétron no seu movimento polariza o meio, atraindo os íons positivos da rede. Este excesso de carga positiva atrai um segundo elétron, originando uma interação atrativa entre os dois elétrons (GARCIA, 2017, p. 43). Se esta interação for suficientemente forte para vencer a repulsão de Coulomb, surge uma atração efetiva entre os elétrons.

Nessa interação "(...) os elétrons formam um par ligado através de uma interação com a rede cristalina (...), com energia menor do que a que teriam se fossem independentes, dando lugar ao novo portador (...) chamado de par de Cooper, responsável pela formação dos portadores de carga da supercondutividade (GARCIA, 2017, p.44).

Cabe destacar que qualquer tipo de energia suficientemente maior que aquela responsável pela formação dos pares de Cooper (conhecida como energia de GAP) é fornecida ao supercondutor, o acoplamento não ocorre e dessa forma a amostra transiciona para o estado normal.

#### 2.1.6 Aplicações da supercondutividade

Dentre as contribuições associadas ao fenômeno da supercondutividade, a geração de altos campos magnéticos se destaca, pois, esses materiais são capazes

de conduzir altas densidades de corrente elétrica quando submetidos a uma temperatura abaixo da temperatura crítica -  $T_c$ .

Para comparar a capacidade de transporte de corrente de um supercondutor à de um condutor convencional de cobre ou alumínio, buscamos alguns dados baseados na Associação Brasileira de Normas Técnicas - NBR 5410 que determina, dentre outras aplicações, a capacidade máxima de transporte de corrente de fios e cabos elétricos em função da sua aplicação e bitola. Essa norma descreve que condutores de cobre e de alumínio podem transportar respectivamente de 618 a 1125 A/cm<sup>2</sup> e de 495 a 878 A/cm<sup>2</sup>, considerando diferentes aplicações de fios e cabos elétricos, tais como: submersos, aéreos e com diferentes tipos de isolamento. Já para o caso de supercondutores, diferentes métodos empregados na fabricação e no processo de medida desses materiais, podem render diferentes valores na densidade de corrente elétrica. Em um experimento usando amostras de  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  com granulometria variada de 3 a 53  $\mu\text{m}$ , foi verificada uma densidade de corrente crítica de  $2 \times 10^6$  A/cm<sup>2</sup> (POOLE, 2007, p.17).

Comparando esses valores aos do cobre, podemos concluir que, um fio supercondutor de YBCO seria capaz de transportar cerca de 1000 vezes mais corrente elétrica que um fio de cobre da mesma bitola.

Outra aplicação dos supercondutores consiste na geração de altos campos magnéticos, o que possibilitou o desenvolvimento de máquinas mais eficientes, com bobinas mais compactas, como aquelas usadas para realizar a ressonância magnética, aprimorando ainda mais os diagnósticos por imagens na medicina e nos estudos das propriedades magnéticas dos materiais. Neste sentido, uma liga metálica que se destacou comercialmente para a geração de altos campos magnéticos é o  $Nb_3Sn$ , com  $T_c = 18,3$  K, que pode suportar campos magnéticos que variam de 25 a 30 T quando dopados com Ta ou Ti (FLÜKIGER, 2013). No ano de 2008, pesquisadores relataram atingir um recorde no transporte de corrente elétrica, atingindo a marca de  $26,43 \times 10^6$  A/cm<sup>2</sup>, em uma amostra de  $Nb_3Sn$  preparada pela técnica *Powder In Tube*, na temperatura de 4,2 K (DALTONICS, 2008).

Outro material de grande interesse comercial é o  $Bi_2Sr_2Ca_1Cu_2O_x$  (BSCCO – 2212), sendo o único cuprato supercondutor de alta temperatura crítica (*High Temperature Superconductor – HTS*) capaz de produzir fios supercondutores cilíndricos. Usando a técnica *Powder In Tube*, um revestimento de prata é preenchido pelo material previamente sintetizado, que na sequência é extrusado

para então receber tratamentos térmicos. Pesquisas indicam que os fios de BSCCO – 2212 gerados por meio dessa técnica são capazes de suportar correntes críticas da ordem de  $1100 \text{ A/mm}^2$ , em um campo de 18 T à 4,2 K, resultado superior ao obtido em amostras de  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  (FLÜKIGER, 2013). Uma desvantagem comercial para esse material consiste no custo da prata usada no revestimento do fio, e na baixa estabilidade mecânica do mesmo.

Finalizando, as aplicações para o uso dos diferentes tipos de materiais supercondutores podem ser classificadas pelas dimensões dos dispositivos produzidos. As aplicações destinadas à produção de dispositivos de grandes dimensões como o caso dos fios, magnetos, motores, reservatórios de energia entre outros, necessitam acima de tudo, de materiais que, além de boas propriedades supercondutoras, possuam também boas propriedades mecânicas (maleabilidade e ductibilidade) apropriadas. Já para as aplicações envolvendo dispositivos de pequenas dimensões, como componentes eletrônicos, sensores, geradores de micro-ondas, filtros e antenas, deseja-se um controle mais refinado das propriedades cristalinas dos materiais, optando em muitos casos pelo uso de materiais que exibem propriedades mecânicas menos atraentes.

#### 2.1.7 Levitação magnética

Uma das aplicações em larga escala da supercondutividade consiste no transporte de alta velocidade por meio de veículos magneticamente levitados, tendo como exemplo o trem Transrapid MAGLEV (Magnetic Levitation) opera comercialmente, ligando Xangai ao aeroporto de Pudong, na China, por uma extensão de 30 km em apenas 8 minutos. Já no Japão, um trem MAGLEV opera experimentalmente há alguns anos. Seu funcionamento está baseado na repulsão entre solenoides supercondutores, localizados dentro do trem e campos magnéticos gerados por correntes de Foucault. Eletroímãs supercondutores são usados no sistema de guia, gerando estabilidade e propulsão do trem. A levitação magnética, que é produzida pelos solenoides supercondutores, acaba eliminando o atrito das rodas do trem com os trilhos, fazendo com que o trem possa alcançar velocidade superior  $500 \text{ km/h}$  (SILVA, 2015). A concepção desse sistema está esquematizada na Figura 9.

**Figura 9 - Esquema do trem de Maglev de funcionamento operacional desenvolvido no Japão**



**Fonte: Pureur (2012, p. 55).**

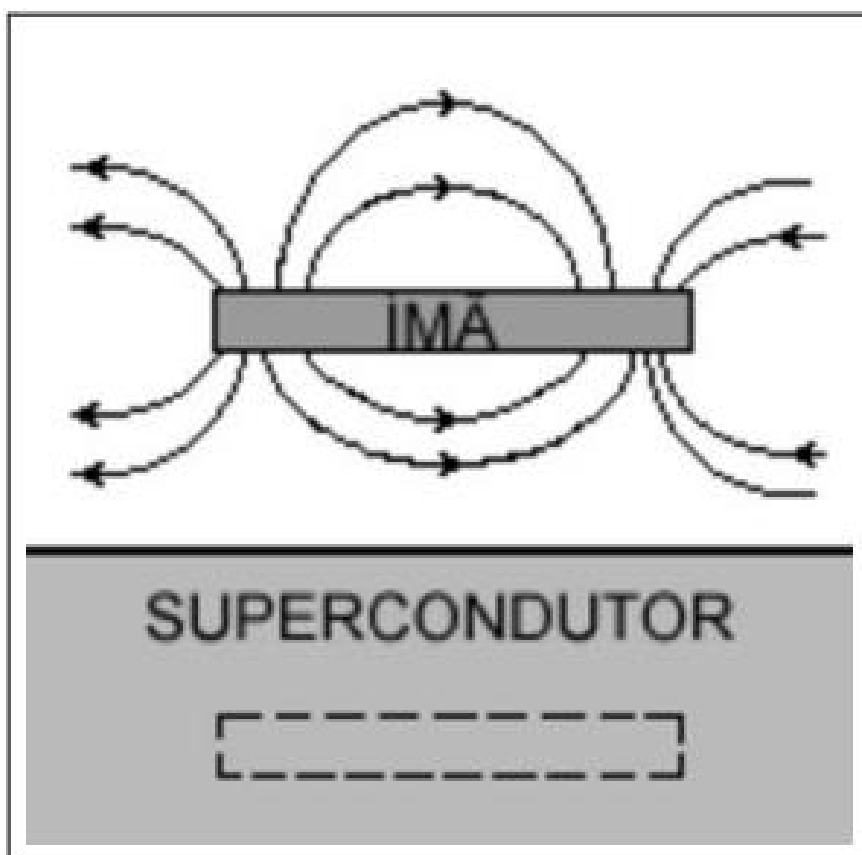
Uma variação mais simplificada de um experimento que permite verificar o fenômeno da levitação magnética pode ser realizada usando uma pastilha supercondutora e um ímã intenso, ou seja, de grande magnetização. Neste experimento, a pastilha supercondutora fica em contato térmico com o líquido criogênico de modo a permanecer em uma temperatura menor que  $T_c$ , enquanto o ímã levita, ficando suspenso sobre a mesma, como mostrado na Figura 10.

Analisando a Figura 10, pode-se notar que o processo de levitação ocorre em decorrência da deformação das linhas de campo magnético nas vizinhanças do supercondutor. Essa deformação surge em função da impossibilidade das linhas de campo penetrarem o supercondutor, levando ao surgimento de uma força repulsiva entre o supercondutor e o ímã, que é contrabalanceada com a força peso do ímã, gerando uma condição de equilíbrio instável. Cabe ressaltar que o equilíbrio de forças entre o ímã e o supercondutor na maioria dos casos será instável sempre que o estado Meissner estiver estabelecido.

Um modo simples para que seja gerada uma condição de equilíbrio estável entre um ímã e um supercondutor consiste em permitir que parte do fluxo magnético do ímã fique ancorado no supercondutor, em regiões conhecidas como centros de aprisionamento, *pinning centers*, conforme mostrado na Figura 11.

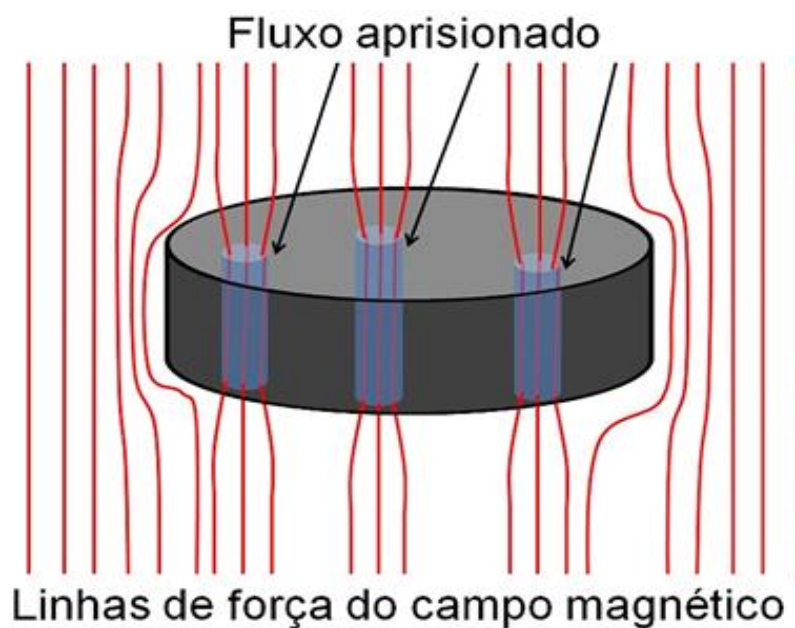


Figura 10 - Ilustração de um ímã levitando sobre um supercondutor.



Fonte: Gomes (2016, p. 18).

Figura 11 - Ilustração do supercondutor do tipo II, no estado misto, na presença de campo magnético.



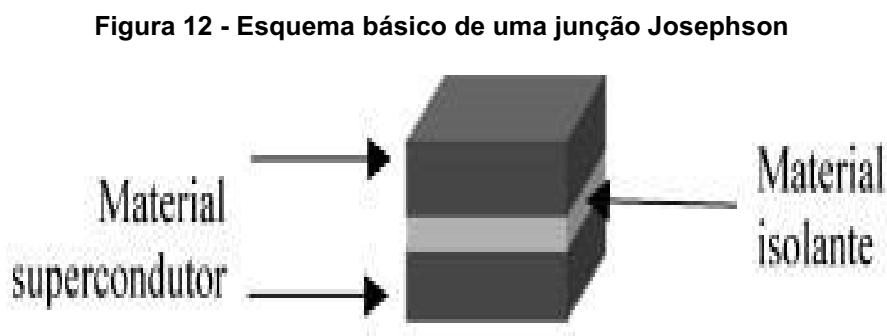
Fonte: Santos *et. al.* (2015, p. 2505-4).

Finalizando, destaca-se que o aprisionamento de campo magnético acontece apenas em supercondutores do tipo II, quando o estado misto é estabelecido no material. No entanto, existem casos específicos onde o movimento dos vórtices não ancorados no supercondutor do tipo II, pode gerar dissipação de energia, tendo em vista que este movimento é viscoso, ocasionado por forças não conservativas.

### 2.1.8 Junções Josephson e SQUIDS

Segundo Tipler e Mosca (2006, p. 170), “Dois supercondutores em contato através de uma película de isolamento elétrico (por exemplo, uma camada de óxido de alumínio com alguns nanômetros de espessura na escala), constituem uma junção de Josephson”, como mostrado na Figura 12.

Neste cenário, Josephson previu que seria possível o tunelamento de pares de Cooper entre dois supercondutores, separados por uma distância da ordem do comprimento de coerência (Aprox.  $10 \text{ \AA}$ ), na ausência de uma voltagem externa.



Fonte: Costa; Pavão (2012, p. 2602-7).

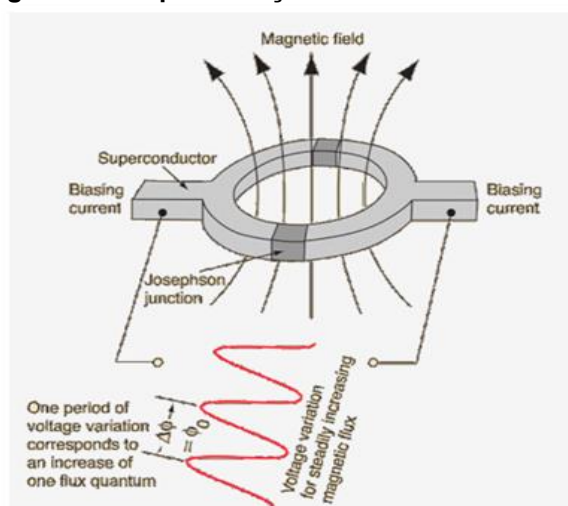
Em geral, as medidas magnéticas de várias espécies de materiais são realizadas, frequentemente, por um equipamento denominado de magnetômetro que pode operar com um sensor SQUID (*Superconducting Quantum Interferometer Device*), cuja capacidade de detecção é proporcionada pela junção Josephson presente no sensor. O SQUID atualmente é o sensor mais sensível para a detecção de campos magnéticos, capaz de medir intensidades de campo da ordem de  $10^{-15} \text{ T}$ .

A título de comparação, o campo magnético da terra é aproximadamente de  $10^{-6}$  T e o do cérebro humano é da ordem de  $10^{-13}$  T (PUREUR; OSTERMANN, 2005).

Quando o sensor SQUID é submetido a um campo magnético, este penetra de forma quantizada em seu interior, sendo que a cada vórtice que acessa seu interior, a corrente varia, passando dessa forma por máximos consecutivos à medida que o fluxo magnético aumenta, conforme mostra a Figura 13. Cabe destacar que o valor do quantum de fluxo magnético é obtido segundo a equação 4:

$$\phi_0 = \frac{h}{2e} = 2,0679 * 10^{-15} \text{ Tm}^2 \quad (4)$$

Figura 13 - Representação de um sensor SQUID.



Fonte: LE ROUX, C.; MACNAE, 2007, p. 417-423

Dessa maneira, por meio de um circuito integrador, pode-se determinar o número de máximos que a corrente atravessa e conhecer, assim, o fluxo magnético final instalado no interior do sensor.

## 2.2 O Ensino de Física na perspectiva histórico-crítica

Diante da situação social, política e econômica, o papel do professor em sala de aula deve ser voltado a enriquecer, aprofundar e esclarecer as contradições de forma que possa contribuir com a formação de cidadãos críticos, capazes de compreender e alterar sua realidade.

O docente deve procurar ensinar a natureza da ciência sobre vários aspectos, para que os alunos possam levantar hipóteses, chegar a conclusões, debater, compreender o ambiente e a linguagem científica usando como ferramentas

o método que se insere na teoria-prática, ou seja, partir sempre da prática social, contextualizando a fim de chegar a uma nova prática social, com benefícios concretos e compreensíveis. Sendo assim, trabalhar os conteúdos, contextualizando-os com a prática social mais ampla, é o fundamento da Pedagogia Histórico-Crítica, que levará o educando a uma reflexão sobre a sua participação na sociedade em que atua.

Para Sasseron e Carvalho (2011), o processo de enculturação científica (entendimento das relações existentes entre ciência e sociedade, a compreensão da natureza da ciência e dos fatores éticos e políticos que circuitam sua prática) dos alunos deve ser visto como um dos objetivos da educação científica. Tendo em vista o compromisso com a formação de cidadãos críticos, que compreendam a relevância entre a relação da ciência com a sociedade, optamos no presente trabalho utilizar como referencial a teoria Histórico-Crítica, que foi adaptada por Gasparin (2003), na qual apresenta uma proposta que descreve cinco passos que direcionam o trabalho do professor para que a teoria Pedagogia Histórico-Crítica seja aplicada em sala de aula, sendo eles: a prática social inicial, a problematização, a instrumentalização, a catarse e a prática social final.

O primeiro momento, a prática social inicial, segundo Gasparin (2003, p.17) “parte do conhecimento que o aluno já possui sobre o conteúdo”. Ou seja, o professor precisa desafiar, incentivar e ter a sensatez de observar os conhecimentos específicos do que os alunos já sabem tendo assim um conhecimento prévio da realidade, pois estes talvez possuam, em sua grande maioria, apenas uma percepção inicial de senso comum.

Passando para o segundo passo, a da problematização, que consiste em selecionar e discutir problemas cuja origem esteja na prática social. Os alunos, neste instante, vão entender que precisam aprender a se questionar, investigar, refletir, ir a fundo para encontrar um caminho que possa solucionar as questões que foram levantadas na prática social.

Partindo dessa ideia “deve ser realizada uma triagem do que realmente é fundamental”, tendo em vista o conhecimento do todo, e não apenas do cotidiano imediato (GASPARIN, 2003, p. 36). As dúvidas que surgirem, com base nos dados indicados pelos alunos, será mediado pelo educador, que dará um tratamento mais amplo, possibilitando, assim, que os educandos entendam tais problemas e busquem a solução deles, com base no conhecimento científico, o que permitirá que

o estudo não consista apenas em reproduzir algo e, sim, em encaminhar soluções, ainda que teóricas, para os desafios apontados pela realidade, sendo neste momento estabelecido o entendimento.

Na fase da instrumentalização (terceiro passo), ocorre o desenvolvimento da metodologia, ou seja, é o trabalho do professor com os educandos para possibilitar a apropriação do conhecimento, na qual, de fato, de acordo com Gasparin (2003, p. 107), “ocorre a aprendizagem do conhecimento científico, ou seja, dos conceitos científicos”.

O processo dialético de construção do conhecimento é efetivado pelo educando e o professor, na instrumentalização, saindo do conhecimento baseado na experiência (empírico) para o concreto, ressaltando que os estudos dos conteúdos propostos vão ser colocados em prática, ou melhor, é retomar prática para transformá-la.

Para tanto, é indispensável a presença do professor, que agirá como mediador, interagindo com os alunos para que possam apreender o conhecimento historicamente produzido sobre os diferentes temas, auxiliando-os a elaborarem sua representação mental do objeto conhecimento. Gasparin (2003), ao discutir sobre o papel do professor, comenta:

Ao assumir o papel de mediador pedagógico, o professor torna-se provocador, contraditor, facilitador, orientador. Torna-se também unificador do conhecimento cotidiano e científico de seus alunos, assumindo sua responsabilidade social na construção/reconstrução do conhecimento das novas gerações em função da transformação da realidade (GASPARIN, 2003, p.113).

Nesse sentido, pode-se afirmar que, a partir do momento em que o aluno, com ajuda do professor, consegue entender os novos conhecimentos, este se transforma num cidadão que saiba se posicionar e assumir verdadeiramente seu papel na sociedade. Quando os alunos atingirem esse nível de compreensão, o professor terá cumprido sua função.

No quarto passo, na catarse, deve ser realizada a determinação do nível de aprendizagem do aluno, através da qual, seja possível uma nova forma de ponderar o conteúdo e a prática social. Com isso, faz-se necessário que o aluno realize uma síntese, demonstrando o grau de assimilação dos novos conteúdos,

que pode ser escrita ou oralmente e, assim, descobrir o novo posicionamento intelectual dos alunos.

Segundo Gasparin (2003, p.130), “Na catarse o aluno é capaz de situar e entender as questões sociais postas no início e trabalhadas nas demais fases, o conteúdo em uma totalidade social e dando a aprendizagem um novo sentido”.

Assim, o aluno manifesta o que assimilou dos conteúdos e dos métodos de ensino aplicados em função das questões que foram anunciadas anteriormente. Importante que esses cinco momentos pedagógicos apresentam flexibilidade e se entrelaçam e associam durante o processo de ensino aprendizagem.

Quinto passo, a prática social final que está associada diretamente com a prática social inicial. A diferença é que antes o conhecimento da realidade era apenas de senso comum e, nesta fase, adquirem um conhecimento orientado, sistematizado, com um caráter científico, que pode mudar seu comportamento social. Os resultados podem ser utilizados para indicar as contribuições e os limites da prática docente, bem como, revelam a disposição de como os alunos colocam em prática o novo conhecimento.

### 3 MÉTODO E PROCEDIMENTOS

O desenvolvimento desta pesquisa foi iniciado mediante um levantamento bibliográfico que contempla teses, dissertações e artigos científicos produzidos nos últimos dez anos, que trazem contribuições sobre o desenvolvimento do tema de supercondutividade na educação básica, com o objetivo de atualizar e embasar as discussões sobre o desenvolvimento do tema em sala de aula.

De acordo com Ludke e André (2014), a etapa da revisão bibliográfica em pesquisas de abordagem qualitativa é uma parte fundamental no desenvolvimento de uma pesquisa, pois possibilita compor o referencial teórico necessário para a compreensão do fenômeno analisado. Neste sentido, as bases de dados e as revistas científicas utilizadas para este levantamento foram: Revista Brasileira de Ensino de Física; Caderno Brasileiro de Ensino de Física; Caderno Catarinense de Ensino de Física; Revista do Professor de Física – UnB; Portal de Periódicos da Capes; Banco de Teses e Dissertações da Capes; e a Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações. Durante as buscas dos trabalhos nessas bases de dados, foram utilizados os seguintes termos: supercondutividade, ensino de supercondutividade, supercondutores; materiais supercondutores; levitação magnética; resistência nula e efeito Meissner.

Ao todo, foram selecionados 36 trabalhos que discutem os fenômenos relacionados à supercondutividade, porém, na maioria dos casos, sem um vínculo com o ensino desenvolvido em sala de aula. Do total dos trabalhos encontrados, apenas 8 deles discutem propostas para desenvolvimento do conteúdo de supercondutividade em sala de aula, o que evidencia uma boa gama de trabalhos que discutem essa temática e suas aplicações para a educação básica.

Em conformidade com Saviani (2020) pode-se concordar quando afirma que os conteúdos necessários para a formação do estudante no ensino médio não devem envolver apenas as habilidades evocadas pelo mercado de trabalho, mas também e, principalmente, os conhecimentos científicos necessários para a compreensão do desenvolvimento tecnológico produzido pela sociedade.

Considerando este aspecto, passamos a identificar como o conteúdo de supercondutividade tem sido trabalhado no ensino médio, ainda que nos dias de hoje, devido uma concepção instrumental de currículo, este e outros conteúdos

igualmente importantes e necessários para a formação dos estudantes não estejam sendo - na maioria dos casos - abordados em sala de aula. Esses dados serão apresentados nas próximas seções.

O desenvolvimento dessa pesquisa-intervenção, que tem como tema a supercondutividade é embasada nos pressupostos da Pedagogia Histórico-Crítica (PHC) de Saviani (2011/2020) que dentre outros aspectos, defende a ideia de que o ensino deve produzir o saber, fazendo com que aqueles que participam do processo consigam absorver os conteúdos e transformar o meio onde vivem em um local com igualdade de oportunidades.

Colaborando com a teoria PHC (Pedagogia Histórico-Crítica) proposta por Saviani, Gasparin (2003) propõe em sua obra, uma didática favorável para ser aplicada na realidade da escola, e baseia-se em cinco passos que permitem a evolução do conhecimento, tendo como ponto de partida a prática social do estudante e como ponto final, o conhecimento mais aprofundado e sistematizado, relacionado com a teoria e a prática.

### **3.1 Procedimentos de construção dos dados**

Tendo em vista o referencial teórico que norteia este trabalho, apresentamos na sequência a organização dos conteúdos, de acordo com os cinco passos para o desenvolvimento da PHC (Pedagogia Histórico-Crítica), em encontros destinados para o desenvolvimento deste produto educacional.

No primeiro momento (2 aulas), foi utilizado um questionário inicial, o qual serviu como base para o levantamento dos conhecimentos prévios dos estudantes sobre o tema supercondutividade. Na sequência, foi conduzida uma breve discussão sobre as respostas obtidas, com o intuito de nivelar e familiarizar os estudantes com o tema.

No segundo momento (2 aulas), foram retomados os conceitos sobre o tema supercondutividade, utilizando recursos como textos de apoio e vídeos, com abordagem contextualizada dos assuntos de supercondutividade e das aplicações tecnológicas do fenômeno.

No terceiro momento (2 aulas), realizamos uma experiência de demonstração do fenômeno de levitação magnética, a partir da qual foi gerado um



vídeo e, em seguida, foi encaminhada uma discussão sobre o assunto e suas aplicações, visando, sobretudo, a participação ativa dos estudantes.

O quarto momento (2 aulas), foi reservado para uma atividade teórico-prática de história em quadrinhos, que foi elaborada e apresentada pelos estudantes no quinto momento.

No quinto momento (2 aulas), foi encaminhada a apresentação das histórias em quadrinhos sobre supercondutividade, bem como, o questionário final, que serviu como parâmetro para discussões das questões e/ou lacunas que possam ter se mantido até o momento. Destaca-se que este questionário final foi o mesmo aplicado no início do desenvolvimento da proposta.

### **3.2 Perfis da escola e das turmas envolvidas**

Para o desenvolvimento desta pesquisa-intervenção foi escolhido o Colégio Estadual Presidente Castelo Branco - Ensino Médio, Normal e Profissional, pertencente ao Núcleo Regional de Educação de Toledo – Pr.

O referido colégio conta com 1300 alunos regularmente matriculados e divididos entre os cursos de ensino médio, formação de docentes e técnico em administração, nos períodos matutino, vespertino e noturno.

Este trabalho foi desenvolvido em uma turma de terceiro ano do Curso de Formação de Docentes, do período vespertino, que conta com um total de 29 alunos na faixa etária de 16 (dezesesseis) e 17 (dezessete) anos, com a concordância da direção e equipe pedagógica do colégio, sendo realizado durante as aulas de Física, com a previsão de ser desenvolvido em um período de 10 aulas de 50 minutos.

A turma envolvida na pesquisa é composta, em sua maioria, por alunos da classe média, sendo que 30% desses alunos são oriundos de municípios vizinhos e os demais pertencem à cidade de Toledo. Majoritariamente são filhos de comerciantes e industriários. São majoritariamente residentes na zona urbana, tanto de Toledo quanto dos municípios vizinhos, sendo que uma pequena parcela deles é residente e oriunda da zona rural, cujos pais são proprietários de sítios e pequenas fazendas.

### 3.3 Procedimentos de análise dos dados

Iniciando a etapa da coleta de dados dessa pesquisa destaca-se aqui o que Lüdke e André (2014) afirmam, ou seja, que é no momento da análise dos dados que o pesquisador deve rever suas ideias iniciais, ponderar, revisar e reorganizar, a fim de que novas ideias possam surgir nesse processo.

O processo de coleta de dados além da observação e do registro das ações e comportamentos dos alunos durante a realização das atividades propostas, utilizou também a análise dos questionários inicial e final, registro de fotos e observações ao longo do desenvolvimento do produto educacional, bem como, da construção pelos alunos de um “gibi” – livro de história em quadrinhos sobre o tema trabalhado.

Tendo em vista o cenário imposto pela pandemia do novo coronavírus (SARS-CoV-2), na etapa inicial, um questionário sobre o tema supercondutividade foi proposto a partir da plataforma *Quizizz Lesson Creator* (<https://quizizz.com/admin/quiz/60eb83e0547e91001b6ac9a1>), para identificar o conhecimento prévio dos estudantes sobre o assunto (APÊNDICE 1). Nesse momento, foi preciso um bom domínio dos conteúdos específicos visando manter o foco nos aspectos relevantes para o que se almeja alcançar, como afirmado por Lüdke e André (2014).

Num segundo momento, após a realização da transcrição dos dados analisados do questionário inicial, juntou-se ao referencial teórico adotado para o estudo, as fontes disponíveis que se encontravam em consonância com esse trabalho, objetivando estabelecer uma boa análise dos dados.

De posse de todos os dados da pesquisa e daqueles que foram obtidos durante a intervenção a partir das observações das atividades desenvolvidas, iniciou-se a organização e análise dos mesmos, tendo como base o referencial teórico que norteia o presente estudo.

Assim, por meio dos dados obtidos, foi elaborada uma análise partindo de três partes: a análise que corresponde à prática social inicial; a problematização da prática social e instrumentalização os alunos; e, o retorno à prática social final, que segue apresentada na seção a seguir.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Pensar a educação como meio de contribuir para o progresso individual bem como da sociedade como um todo, é pensar num ensino no qual os conteúdos curriculares são ensinados de maneira que ocorra a interação dos conhecimentos prévios trazidos pelos educandos, a sua história e o meio social inserido.

Saviani (2011) enfatiza que os conteúdos devem ser relacionados com as realidades sociais, destacando o conhecimento formulado e utilizado em diferentes épocas. Segundo o autor, a aprendizagem significativa ocorre diante de um novo estudo que leva à conclusão de que estas relações acontecem porque os conhecimentos são construídos por um ato social, que faz parte da experiência pessoal, cujo foco deve ser sempre o conhecimento do indivíduo.

Tendo em vista as considerações ora tecidas, procuramos, por meio da elaboração, planejamento e avaliação de uma sequência didática, desenvolver uma estratégia facilitadora de ensino que tem como ponto inicial e final, a atuação do educando na prática social que está inserida, construindo ativamente sua aprendizagem dentro de sua realidade vivida.

Assim, com base nesses pressupostos, foi desenvolvido o produto educacional com o título “Uma alternativa para o ensino da supercondutividade na educação básica”, que consta no Apêndice 3 desta pesquisa e cujo conteúdo busca alcançar o envolvimento do aluno na busca pela aprendizagem efetiva.

Na sequência, serão apresentados os resultados da pesquisa-intervenção em três tópicos de análise, que estão correlacionados com o referencial teórico-metodológico que embasam este trabalho.

### 4.1 Partindo da prática social inicial

Nesse primeiro momento, início da prática social inicial, os alunos foram levados ao laboratório de informática, como registrado na Figura 14, para disponibilização do aplicativo Quizizz – com as questões do questionário inicial sobre o tema supercondutividade, proposto a partir da plataforma *Quizizz Lesson*

*Creator.* Cabe destacar que os alunos já haviam tido uma introdução sobre supercondutividade a partir do disposto no livro didático adotado para a disciplina de Física no Colégio.

**Figura 14 - Alunos respondendo ao Questionário Inicial no Quizizz.**



**Fonte: Autoria própria (2021).**

Ao analisar a forma como os alunos interagiram com o questionário inicial, pudemos verificar que não apresentaram dificuldades com o uso da ferramenta Quizizz, por estarem ambientados com o uso da internet no seu cotidiano. No entanto, tiveram muita dificuldade em relação às questões que tratavam especificamente sobre supercondutividade, uma vez que este não era um tema conhecido por eles.

No geral, não pudemos considerar que o resultado foi de todo frágil, pois, ao analisar detalhadamente o questionário, observamos que apresentaram desconhecimento sobre alguns conceitos, mas já conseguiam fazer relação de outros com suas aplicações ou recursos diversos gerados a partir destes.

Na questão 1 os alunos foram questionados sobre as propriedades dos materiais supercondutores. Esperávamos que as respostas obtidas estivessem relacionadas com a “resistência elétrica nula quando material estiver abaixo da temperatura crítica”; “permitir a entrada do campo magnético em seu interior a uma temperatura acima da temperatura crítica” e, “apresentar o diamagnetismo perfeito caracterizado pela expulsão do campo magnético abaixo da temperatura crítica”. Somente uma dupla de alunos respondeu corretamente e notou-se que os demais apresentavam muitas dúvidas, demonstrando a necessidade de aprofundamento da questão.

A questão 2 pedia que os alunos citassem os principais desafios técnicos científicos para a aplicação prática da Supercondutividade. Essa questão tinha como

resposta correta “a construção de sistemas eficientes de grandes dimensões para manter as baixas temperaturas necessárias pelos supercondutores e obtenção de supercondutores que apresentem temperatura crítica mais próxima da temperatura ambiente”. Essa questão não gerou muitas dúvidas, o que levou a maioria das duplas de alunos a não conseguir dar a resposta correta e observou-se que com o desenrolar das aulas essas mesmas dúvidas poderiam ser sanadas.

A terceira questão pedia aos alunos que descrevessem o objetivo entre os cientistas que pesquisam a Supercondutividade, e estes, para responderem corretamente, deveriam afirmar que “seria o desenvolvimento de materiais supercondutores robustos, com  $T_c$  próximas ou superiores à temperatura ambiente, viabilizando a aplicação dos mesmos em diferentes dispositivos sem a necessidade de sistemas criogênicos”. Por ser uma questão discursiva surgiram algumas dúvidas e os alunos não conseguiram chegar à resposta correta. Na realidade, dava-se a impressão que os alunos não estavam dispostos a discorrer sobre o assunto e deixaram as respostas inacabadas. Esse fato indica a necessidade de intensificar o trabalho na questão histórica das pesquisas sobre o assunto ou que os alunos não estavam bem preparados no que tange à escrita.

Questionando a diferença entre os supercondutores do tipo I e do tipo II, a questão 4 pedia aos alunos que apontassem a resposta correta afirmando que: “Supercondutores do tipo I apresentam apenas um regime de resistência nula e diamagnetismo perfeito abaixo de  $T_c$ . Já os supercondutores do tipo II exibem dois regimes nos quais a resistência nula é observada. Para baixos campos (abaixo de  $H_{c1}$ ), o efeito Meissner é verificado. Em um regime de campos moderados, o estado misto é instalado no interior do supercondutor permitindo a entrada quantizada de campo magnético, que persiste até campos inferiores à  $H_{c2}$ , acima do qual o material transiciona para o estado normal. Novamente verificamos o surgimento de muitas dúvidas, sendo que a questão não ficou bem respondida por nenhum dos alunos, o que indicou também a necessidade de maior aprofundamento neste ponto.

A questão 5 pedia aos alunos que assinalassem onde é aplicada a Supercondutividade na sociedade moderna e, como respostas corretas esperávamos: nas transmissões de energia; em aparelhos que requerem intensos campos magnéticos; e, no transporte coletivo os trens de alta velocidade. Apenas uma dupla de alunos assinalou corretamente essa questão e as outras duplas indicaram apenas uma alternativa. Esse fato demonstra há um sensível

desconhecimento por parte dos alunos quanto à aplicação da Supercondutividade na modernidade.

Quando questionados sobre quem descobriu a Supercondutividade e quando isso ocorreu, todos os alunos deram a resposta correta apontando Heike Kamerlingh Onnes em 1911, indicando que uma pequena porção do conteúdo referente à parte histórica do conteúdo estava assimilada pelos alunos.

A questão 7, também discursiva, pedia aos alunos que citassem quais os pesquisadores que contribuíram para a compreensão da Supercondutividade, e, como resposta correta eles poderiam citar os seguintes nomes: Heike K. Onnes; Walther Meissner e Robert Ochsenfeld; Fritz e Heinz London; Vitaly Ginzburg e Lev Landau; John Bardeen, Leon N. Cooper e Robert Schrieffer; Brian D. Josephson; Karl Alex Muller e J. Georg Bednorz; Anthony J. Leggett e Alexei A. Abrikosov. Nessa questão, a maioria dos alunos citou entre dois ou três pesquisadores, e apenas dois alunos citaram H. K. Onnes. Entende-se que esta questão seria melhorada com o desenrolar dos estudos por se tratar também da parte histórica do conteúdo.

Na questão 8 os alunos deveriam assinalar falso ou verdadeiro para a seguinte afirmação: o supercondutor é um material que pode conduzir eletricidade ou transportar elétrons de um átomo para outro sem resistência elétrica. Isso significa que nenhum calor, som ou qualquer outra forma de energia seria liberada do material abaixo da temperatura crítica. Nesta questão, 4 duplas de alunos assinalaram como verdadeiro, o que demonstra entendimento inicial sobre o conteúdo.

Sobre o efeito Meissner e o campo magnético aplicado em materiais no estado supercondutor, a questão 9 solicitava que os alunos avaliassem algumas afirmações. Como respostas corretas esperávamos obter: o fenômeno da levitação magnética pode ocorrer concomitantemente ao efeito Meissner; a ação de campos magnéticos externos gera a degradação do estado supercondutor; e, que consiste na expulsão completa de campos magnéticos do interior do material supercondutor. Essa questão gerou muitas dúvidas e até exigiu a intervenção do professor com algumas explicações, no entanto, a maioria dos alunos não respondeu corretamente à questão deixando uma ou outra alternativa sem assinalar. Esse fato demonstrou a necessidade de melhor aprofundamento do assunto pelo professor pesquisador.

A questão 10 solicitava aos alunos sobre o que se poderia afirmar sobre o estado misto e tinha como resposta correta as afirmações de que este ocorre apenas em supercondutores do tipo II e que define uma região no diagrama de fases na qual é permitida a instalação de campo magnético no interior do supercondutor.

Já a questão 11 solicitava aos alunos para apontar, as alternativas corretas sobre a transição para o estado normal. Como respostas corretas esperaríamos obter: que de acordo com a teoria BCS, ocorre quando qualquer fonte de energia aplicada ao supercondutor for capaz de destruir os pares de Cooper; que ocorre quando o supercondutor for completamente penetrado por campo magnético; e, que ocorre quando a resistência elétrica deixa de ser nula. Novamente muitas dúvidas foram geradas em relação às questões 10 e 11 e novamente o professor pesquisador necessitou intervir.

Destacamos neste ponto, que não era esperado que os alunos apresentassem um conhecimento significativo do assunto.

Cabe enfatizar que uma justificativa para o acerto das respostas apresentadas pelos alunos pode estar relacionada com o modo com o qual o questionário inicial foi aplicado, em um laboratório de onde os alunos dispunham acesso à internet. Foi observado também que nesse momento os alunos estavam muito focados e preocupados na realização da atividade, tendo em vista sua relação com uma pesquisa vinculada à Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

#### **4.2. Problematicando a prática social e instrumentalizando os alunos**

Após o levantamento prévio dos conhecimentos que os alunos traziam sobre os supercondutores, bem como sobre o fenômeno do efeito Meissner, a verificação da resistência nula abaixo da temperatura crítica, demos início à problematização e instrumentalização do conteúdo a partir de atividades teórico-práticas descritas na proposta de sequência didática a ser trabalhada durante a realização desta pesquisa, com excelente participação dos alunos. Ressalta-se aqui que, como destacam as DCEs do Paraná, “É importante que o processo pedagógico, na disciplina de Física, parta do conhecimento prévio dos estudantes, no qual se incluem as concepções alternativas ou concepções espontâneas” (PARANÁ, 2008, p.60).

Para tanto foram utilizados vídeos e um texto de autoria própria que tratam do tema e suas aplicações tecnológicas abordando diferentes campos do

conhecimento, descritos no produto educacional. A Figura 15 retrata dois momentos diferentes durante o desenvolvimento dessa parte do trabalho.

**Figura 15 - Alunos em sala de aula no momento inicial do desenvolvimento do conteúdo de Supercondutividade.**



**Fonte: Autoria própria (2021).**

Ao observar a interação dos alunos com os vídeos e com o texto apresentado viu-se que estes apresentaram certo desânimo em realizar tais atividades. O texto foi lido e estudado como fazem rotineiramente, de modo superficial. Avaliamos esse comportamento como resultado do que vinha sendo trabalhado rotineiramente nas aulas, principalmente de Física.

Com relação aos vídeos, estes demonstraram um pouco mais de interesse por se tratar de uma mídia que é frequentemente utilizada por eles, seja na escola ou até mesmo no cotidiano de casa e amizades.

Na sequência, visando demonstrar de forma mais prática o fenômeno da Supercondutividade, foram desenvolvidas atividades experimentais no laboratório de Física do Colégio e também em sala de aula, onde os alunos puderam registrar suas conclusões, bem como, levantar suas dúvidas acerca dos conteúdos ministrados pela pesquisadora.

É importante destacar que esse é o momento ideal para corrigir equívocos e fenômenos mal compreendidos, por meio de indagações, debates e reflexões, desafio apresentado para os alunos, partindo do senso comum e utilizando-se o conteúdo científico.

O momento da problematização é, segundo Gasparin (2003), o momento certo para colocar um alicerce na transformação entre a prática e a teoria, de modo a provocar mudança nos conhecimentos prévios do aluno, uma vez que este será

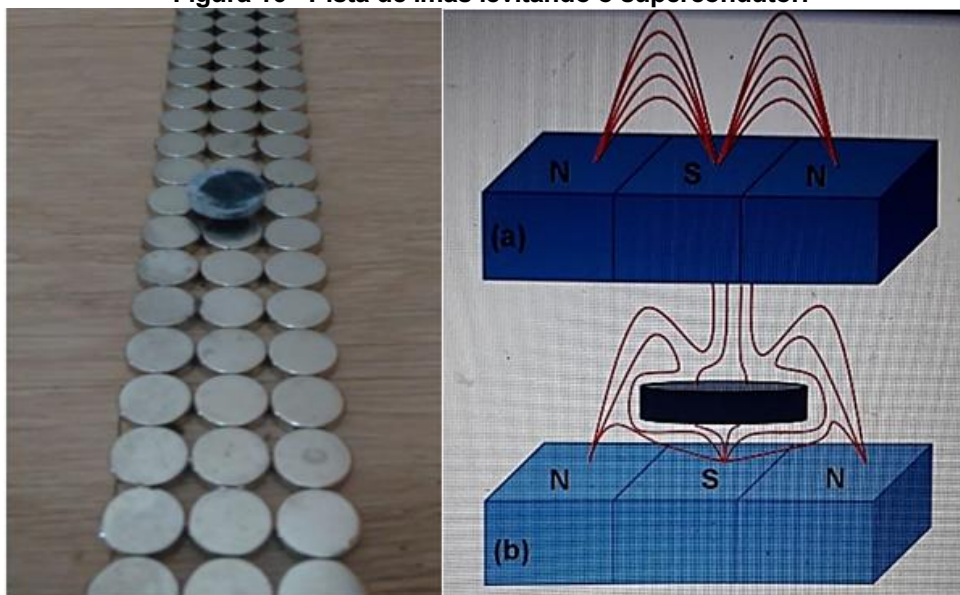


desafiado e motivado, a tentar encontrar soluções para as questões levantadas. É notório que, a partir desta etapa, a aprendizagem assume importância individual para o aluno, embora a necessidade de conhecimento seja social.

Já na instrumentalização tem-se a apresentação sistemática do conteúdo por parte do professor e, por meio da ação dos alunos, de se aproximarem e debaterem esse conhecimento, bem como de conhecerem os caminhos a serem explorados na promoção da aprendizagem.

Dando continuidade, o primeiro experimento realizado com os alunos foi chamado “A Pista”, cuja montagem consiste em um trilho formado por ímãs intensos, sobre o qual uma pastilha supercondutora irá levitar, como mostrado na Figura 16. Para tanto foram utilizados um total de 130 ímãs de Nd-Fe-Bo na forma de pastilhas cilíndricas com dimensões de 15 mm x 5 mm, cujos detalhes de montagem são descritos por Zadorosny e colaboradores (SANTOS *et. al.*, 2015). Dessa forma, foi produzido um trilho de 74 cm de comprimento e 4 cm de largura, capaz de levitar e uma pastilha de YBCO com dimensões de 1,5 cm x 0,7 mm, previamente resfriada em nitrogênio líquido.

**Figura 16 - Pista de ímãs levitando o supercondutor.**



**Fonte: Adaptado de Santos *et. al.* (2015, p. 2505-4).**

Por meio da Figura 16, pode-se notar que o arranjo das linhas de campo geradas pela pista favorece o equilíbrio da pastilha, pois gera uma condição de equilíbrio estável no seu centro.

Outro cuidado importante tomado durante o desenvolvimento desta atividade

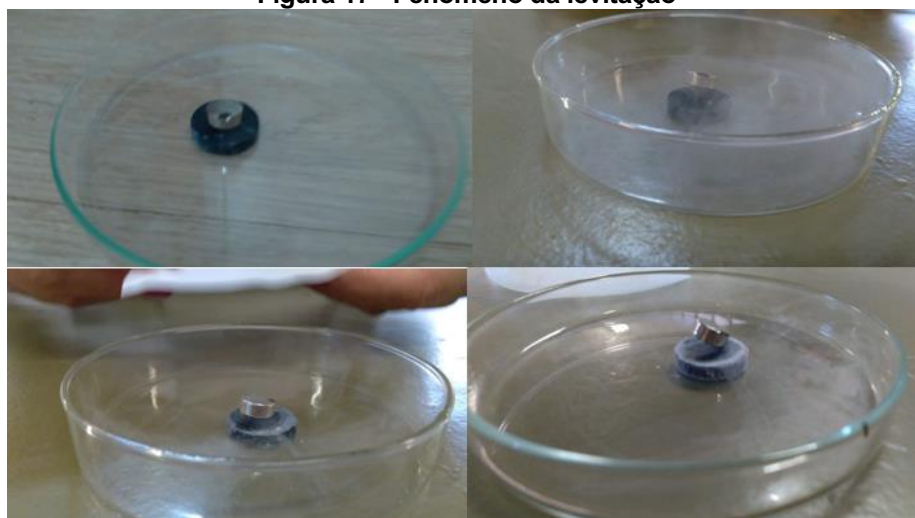
experimental consistiu em alertar os alunos dos cuidados necessários ao manipular os ímãs, pois eles são capazes de gerar uma força magnética muito elevada, capaz de provocar pequenos cortes e machucados durante a colisão de dois desses elementos.

Dessa forma, mesmo que o experimento não tenha sido todo montado pelos alunos, observou-se que a experimentação consiste em uma metodologia facilitadora para melhor entendimento do conteúdo, apresentar o fenômeno estudado de maneira prática, diferenciando-se das formas com que ele é tratado convencionalmente. Além disso, como metodologia, a experimentação é capaz de realçar algumas importantes atitudes, tais como criatividade e socialização no trabalho conjunto.

Durante a realização do experimento a maioria dos alunos ficou empolgada querendo manipular os materiais e muitos deles fizeram questionamentos acerca dos fenômenos que estavam observando o que demandou do conhecimento sólido do pesquisador sobre o conteúdo. Muitas vezes o pesquisador teve de alertá-los sobre os riscos e perigos associados ao experimento, bem como indicar em que os alunos podiam ajudar.

Para Araújo e Abib (2003), o desenvolvimento da observação e da criatividade, quando há a articulação com as atividades experimentais, envolve o educando, contribuindo para o seu aprendizado, de modo a avançar no domínio dos conceitos dos fenômenos estudados.

Na sequência, o segundo experimento realizado com os alunos consistiu em verificar o fenômeno da levitação de uma forma diferente do anterior. Ao invés do supercondutor ser levitado pelos ímãs por um curto período, neste experimento, a mesma pastilha supercondutora, colocada em uma placa de Petri e depois mergulhada em nitrogênio líquido (77 K), foi responsável por levitar um pequeno magneto cilíndrico de neodímio, com dimensões de 1,5 cm x 0,7 mm, conforme mostra a Figura 17.

**Figura 17 - Fenômeno da levitação**

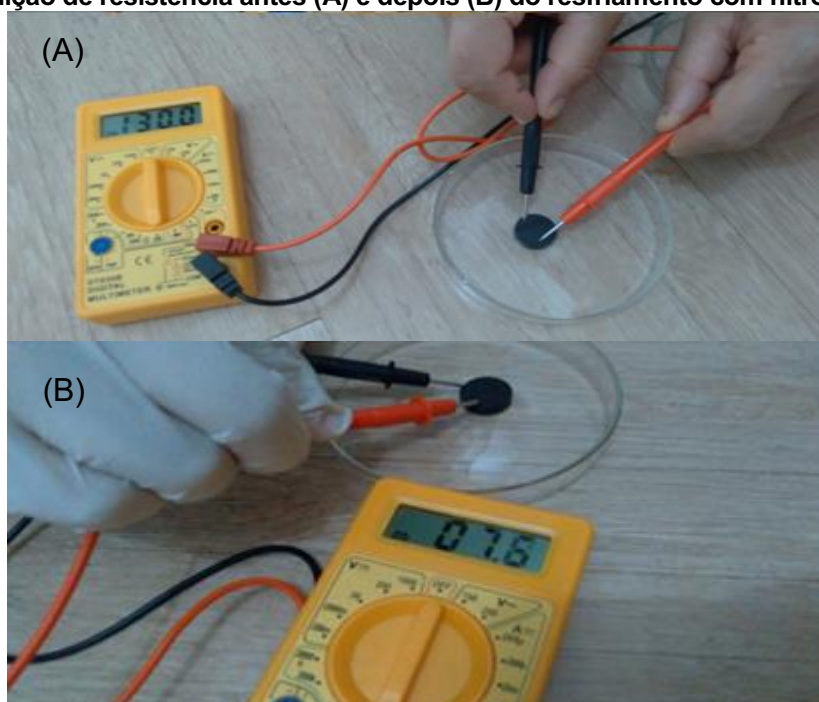
**Fonte: Autoria própria (2021).**

Neste experimento em especial, é necessário ter o cuidado com o líquido criogênico para evitar acidentes, bem como, de não deixar o ímã repousado sobre do supercondutor durante o resfriamento, pois, a pastilha de YBCO, por ser um supercondutor o tipo II, pode prender as linhas de campo magnético no seu interior, resultado ao final em uma atração entre o ímã e o supercondutor.

Em seguida, durante o resfriamento deve-se colocar o magneto suavemente próximo ao supercondutor e este irá levitá-lo, verificando dessa forma a repulsão entre o supercondutor e o ímã. Para facilitar essa visualização o professor poderá passar um pedaço de papel no espaço entre o magneto e o supercondutor, como demonstrado no vídeo gravado durante a realização do experimento disponibilizado no link: <https://drive.google.com/file/d/1dUUdXgNtFrbfqN75DECEOhkt8sxNA1vH/view?usp=sharing>

Outro experimento realizado com os estudantes consistiu em determinar de maneira qualitativa a variação da resistência elétrica da pastilha de YBCO durante o resfriamento até a temperatura de ebulição do nitrogênio líquido. Neste experimento um multímetro injeta uma corrente de prova pela amostra e por meio da Lei de Ohm determina a resistência elétrica que varia para valores baixos à medida que a amostra é resfriada, como mostrado na Figura 18.

Figura 18 - Medição de resistência antes (A) e depois (B) do resfriamento com nitrogênio.



Fonte: Autoria própria (2021).

No procedimento acima, o patamar de resistência nula normalmente não é alcançado em função da resistência elétrica entre as pontas de prova do multímetro e o material supercondutor, frequentemente denominada de resistência de contato. No entanto, cabe ressaltar que podemos observar uma queda pronunciada da resistência elétrica conforme a amostra foi resfriada, como mostrado nas Figuras 18 (A) e (B). Durante a realização desse experimento a maioria dos alunos ficou apenas observando e muitas perguntas foram feitas por eles. O professor pesquisador vendo a vontade de os alunos manipularem os materiais foi indicando um ou outro aluno para a realização da medição, sempre alertando para os devidos cuidados.

No terceiro momento da intervenção, constituído de quatro aulas, foi realizada a construção de um “gibi” – livro de história em quadrinhos, no qual os alunos criaram diferentes enredos que trataram sobre os temas abordados na supercondutividade, como o efeito Meissner, os supercondutores do tipo I e II, a teoria de BCS, a resistência nula, o diamagnetismo perfeito, a resistividade nula, bem como sobre as aplicações tecnológicas da supercondutividade. Algumas das capas dos gibis produzidos pelos alunos seguem mostrado na Figura 19.

Figura 19 - Livros de história em quadrinhos montados pelos alunos participantes da pesquisa.



Fonte: Autoria própria (2021).

Em uma análise mais aprofundada do conteúdo das histórias pode-se perceber a existência de relações diretas com as dimensões histórica e científica, possibilitando ao leitor um entendimento do tema abordado e a relação com as situações enfrentadas no cotidiano.

As histórias apresentam um alto grau de criatividade, com a apresentação de situações inéditas e de textos simples e sintéticos, características fundamentais de uma história em quadrinho. Além disso, os conceitos aprendidos envolvendo a Supercondutividade foram desenvolvidos de forma apropriada no enredo das histórias, não aparecendo de maneira desconexa, como se o autor tivesse apenas memorizado o conceito. Este fato também pôde ser observado durante a apresentação dos trabalhos, que foi o momento representado na Figura 20 que consta nas análises da Prática Social Final.

Figura 20 - Fragmentos de páginas internas dos gibis



Fonte: Autoria própria (2021).

Observamos que nos fragmentos da Figura 20 os alunos já usam termos como o trem de Maglev, relacionando inclusive com o seu funcionamento, uma vez que este levita numa linha elevada sobre o chão e é propulsionado pelas forças atrativas e repulsivas do magnetismo através do uso de supercondutores.

Destacamos, que os conteúdos tratados podem ainda ser mais aprofundados, porém faz-se necessário que os alunos sejam estimulados e motivados para gostar do conteúdo, o que deve resultar na melhoria do processo de ensino-aprendizagem.

#### 4.3. Retornando à prática social final.

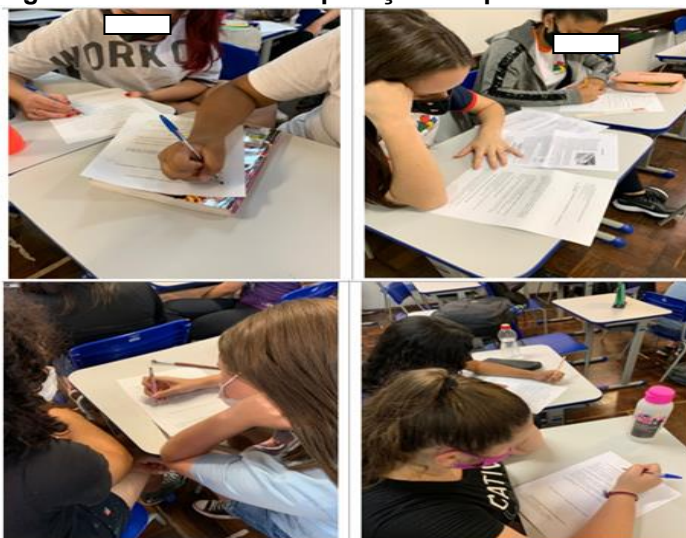
Na última parte dessa pesquisa foram retomados os conceitos aplicados nos encontros anteriores para, então, utilizar o questionário final com os estudantes, de modo que possa se constituir como um diagnóstico para superação de possíveis dúvidas sobre o tema.

Durante a intervenção, as atividades foram divididas em pontos que foram analisados e discutidos nas etapas anteriores e, nos quais, a pesquisadora pôde verificar em diversas situações que alguns alunos atingiram a catarse, momento que se apropriaram do conhecimento, tornando-se capazes de melhorar a argumentação e compreensão sobre o assunto. A catarse se realiza, segundo Gasparin e Petenucci (2012):

a) por meio da nova síntese mental a que o educando chegou; manifesta-se através da nova postura mental unindo o cotidiano ao científico em uma nova totalidade concreta no pensamento. Neste momento o educando faz um resumo de tudo o que aprendeu, segundo as dimensões do conteúdo estudadas. É a elaboração mental do novo conceito do conteúdo; b) esta síntese se expressa através de uma avaliação oral ou escrita, formal ou informal, na qual o educando traduz tudo o que aprendeu até aquele momento, levando em consideração as dimensões sob as quais o conteúdo foi tratado (GASPARIN; PETENUCCI, 2012, p.10).

Em consonância com os autores e analisando todo o processo de aprendizagem durante a intervenção, foi retomado o questionário inicial para observar e analisar a apropriação dos conceitos científicos trabalhados durante os encontros. Este momento, também chamado de Prática Social Final, consiste em ver o aluno colocar em prática o que realmente compreendeu, apresentando mudanças com relação ao conteúdo, destaca Gasparin (2003), conforme mostrado na Figura 21.

**Figura 21 - Momento da aplicação do questionário final.**



**Fonte: Autoria própria (2021).**

Para a realização desta atividade, os alunos foram reunidos em duplas e, em relação à primeira questão, assim como no início da intervenção, percebeu-se não ter muitas dificuldades nas respostas por parte dos alunos.

Na questão “1”, sobre materiais supercondutores, observou-se respostas muito diferentes entre os alunos e verifica-se que somente as duplas D1 e D5 assinalaram a alternativa c) apresentam o diamagnetismo perfeito caracterizado pela penetração do campo magnético abaixo da temperatura crítica. As duplas D3 e D4 assinalaram a alternativa “a” e a dupla D2 assinalou as alternativas “a”, “b” e “d”. Percebe-se, nesta questão, que os alunos, em sua maioria, ainda tinham dúvidas

sobre o conceito de materiais supercondutores e sobre a identificação de suas propriedades, principalmente o diamagnetismo perfeito.

A questão “2” solicitava aos alunos que citassem os principais desafios técnicos científicos para a aplicação prática da Supercondutividade sendo as alternativas corretas a) Construção de sistemas eficientes de grandes dimensões para manter as baixas temperaturas necessárias pelos supercondutores e b) obter supercondutores que apresentem temperatura crítica mais próxima da temperatura ambiente. Em análise aos questionários respondidos, observou-se que as duplas D1, D4 e D5 assinalaram apenas a alternativa “a” como correta, e, a dupla D3 assinalou somente a alternativa “b”. Somente a dupla D2 assinalou as alternativas “a” e “b” como correta.

Percebeu-se na análise das respostas a esta questão que os alunos não demonstram tantas dúvidas no que se refere à aplicação prática dos supercondutores, pois, conseguem fazer a identificação do fenômeno da Supercondutividade como um ingrediente importantíssimo no processo de evolução tecnológica no presente e no futuro, como afirmam Festa, Massoni e Pureur Neto (2015).

Na terceira questão os alunos teriam que descrever qual seria o maior objetivo entre os cientistas que pesquisam a Supercondutividade. Analisando as respostas dessa questão verifica-se que:

**Quadro 2 – Respostas para a questão 3 – questionário final.**

A inserção do Estudo da Física Moderna nas escolas. (D1)
Relações a temperatura. (D2)
Despertar a vontade dos alunos a entenderem as aplicações tecnológicas modernas. (D3)
Compreender as características desse tipo de pesquisa, conhecer alguns aspectos dos aparatos instrumentais, do processo de preparação de amostras e das condições adequadas para as experiências. (D4)
O objetivo das pesquisas de Supercondutividade é buscar compreender os aspectos os aparatos instrumentais da Supercondutividade e do processo das experiências (medidas de reatividade, de susceptibilidade magnética e etc.) (D5)

**Fonte: Autoria própria (2021).**



Comparando com a resposta correta, observamos que os alunos não conseguiram relacionar completamente preocupações dos cientistas em relação ao fenômeno da Supercondutividade, por exemplo, à descoberta de substâncias supercondutoras com temperaturas críticas mais próximas da temperatura ambiente, possibilitando o desenvolvimento de mecanismos otimizados para a transmissão de energia e de transporte.

As duplas de alunos D1 e D3 relacionaram o objetivo pedido na questão com os objetivos de se estudar a disciplina de Física e do tema escolhido. As duplas D4 e D5 foram muito mecânicas ao darem suas respostas, parecendo apresentar cópia de parágrafo de texto sobre o assunto. Já a dupla D2 não apresentou uma resposta compreensível. Fica evidente que os alunos não têm o hábito de responder perguntas abertas, revelando-se como uma oportunidade de formular um breve resumo, de autoria própria, do conteúdo já estudado. Neste sentido, entendemos como muito preocupante esse resultado para a formação dos estudantes.

A quarta questão do questionário indagava os alunos sobre a diferença entre os supercondutores do tipo I e do tipo II e obteve-se como respostas de quatro duplas: Os supercondutores do tipo I são formados principalmente pelos metais e algumas ligas metálicas e, em geral, são condutores de eletricidade à temperatura ambiente, e os do Tipo II são formados por ligas metálicas e outros compostos.

Observa-se que a resposta sobre os supercondutores do tipo II para em um ponto específico, demonstrando, talvez, um anseio de terminar rapidamente a atividade. No geral, as respostas dessas quatro duplas D1, D2, D3 e D5 parecem um tanto quanto mecânicas, pois, ao responderem que os supercondutores do Tipo II são formados por ligas metálicas e outros compostos, todas pareciam estar resumindo e copiando a resposta de um livro.

Uma dupla, entretanto, procurou responder à questão, utilizando termos ligados ao conteúdo: Tipo I Estado Meissner é normal, aplicado inferior ao valor crítico não ocorrendo nenhuma penetração do fluxo magnético; Tipo II dois campos críticos. Analisando a resposta tem-se a impressão que os alunos foram muito sintéticos e não conseguiram transmitir a ideia de maneira clara e objetiva.

Na questão “5”, os alunos deveriam indicar onde é aplicada a Supercondutividade na sociedade moderna e tinham como alternativas: a) nas transmissões de energia; b) na eletrônica, no uso de lâmpadas mais econômicas; c) em aparelhos que requerem intensos campos magnéticos; d) Transporte coletivo os

trens de alta velocidade. A questão tinha como opção de resposta correta as alternativas “a”, “c” e “d”.

As duplas D1 e D4 assinalaram as alternativas “b” e “c”. Para esta questão. Somente a dupla D2 assinalou as alternativas “a”, “c” e “d”. A dupla D3 assinalou a alternativa “d” e a dupla D5 assinalou somente a alternativa “b”.

Analisando essas respostas, percebe-se que a questão da aplicação da Supercondutividade na sociedade moderna requer mais tempo de estudos, pois,

A maioria das suas aplicações se vale da resistividade nula, que em alguns aparelhos elétricos é sinônimo de eficiência máxima, como é o caso dos geradores de eletricidade e dos cabos de transmissão, que não têm perda de energia elétrica por calor. Outras aplicações se valem dos altos campos magnéticos que podem ser obtidos eficientemente com magnetos supercondutores. Os aparelhos de ressonância magnética, por exemplo, assim como os trens flutuantes (Maglev) e alguns aparelhos utilizados no estudo de matérias utilizam estes campos. As outras aplicações mais comuns se valem do efeito Meissner (BRANÍCIO, 2001, p.384).

Quando questionados sobre quem descobriu a Supercondutividade e quando isso ocorreu, 100% dos alunos assinalaram a questão “a” que dizia ter sido “Heike Kamerlingh Onnes, em 1911”, demonstrando que trabalhar os conteúdos a partir da História das Ciências pode se constituir numa ferramenta importantíssima para cativar e desenvolver o aprendizado dos alunos, uma vez que se torna fácil relacionar física, tecnologia e as pesquisas com o cotidiano. Essa estratégia também ajuda o aluno a compreender que o que foi descoberto pode se tornar interessante e fazer com que o aprendizado deixe de ser automático, no qual os alunos são chamados a usar os conteúdos de Física aplicados a resolução de exercícios (IV CONAED, 2019). Neste sentido concordamos com esse tipo de prática, uma vez que esta ensina a ter organização, foco e comprometimento com os conteúdos que estão sendo ensinados.

A questão “7” do questionário pedia aos alunos que citassem os pesquisadores que contribuíram para a compreensão da Supercondutividade, sabendo-se que estes nomes surgiram ao ser trabalhada toda a questão histórica da descoberta da Supercondutividade durante os encontros realizados. Com base no quadro 2 desta pesquisa, nos textos estudados e nas respostas dadas pelas duplas de alunos, montou-se o seguinte quadro:

**Quadro 3 – Nomes de pesquisadores que contribuíram para a compreensão da Supercondutividade elencados pelos alunos.**

Duplas	Onnes	Meissner	Ochsenfeld	Bardeen	Cooper	Schrieffer	Josephson	Muller,	Bednorz	Ginzburg,	Abrikosov
D1	X	X	X								
D2		X	X					X	X		
D3		X	X	X							
D4	X	X	X								
D5				X				X			

Fonte: Autoria própria (2021).

Percebe-se que, mesmo sendo Onnes o primeiro pesquisador a retratar a questão da Supercondutividade, quatro duplas de alunos citaram os nomes de Meissner e Ochsenfeld.

O efeito de Meissner como sendo a expulsão de um campo magnético de um supercondutor, fenômeno descoberto em 1933 pela medição da distribuição do fluxo externo a espécimes condutores aos quais eles resfriaram abaixo de sua temperatura de transição e que teve sua explicação bem relatada por meio da realização do experimento em sala de aula, mostrado na Figura 18.

A dupla D5 além de citar os dois nomes assinalados no quadro 1, citou o nome de “Karl Marx”, provavelmente querendo se referir a Karl Muller, descobridor da Supercondutividade de alta temperatura crítica num Cuprato de Lantânio e Bário.

A questão “8” consistia em pedir aos alunos a veracidade da afirmação: Supercondutor é um material que pode conduzir eletricidade ou transportar elétrons de um átomo para outro sem resistência elétrica. Isso significa que nenhum calor, som ou qualquer outra forma de energia seria liberada do material abaixo da temperatura crítica. Nesta questão, 4 duplas assinalaram a alternativa “verdadeiro” e uma dupla deixou a questão em branco. Isso demonstra que em sua maioria, 80% dos alunos compreenderam o conceito de materiais supercondutores.

A questão “9” solicitava aos alunos para assinalar a alternativa correta sobre o efeito Meissner e o campo magnético aplicado em materiais no estado supercondutor. Apenas a dupla D2 não assinalou a alternativa correta. Desta forma 80% dos alunos respondentes a este questionário assinalaram as alternativas b) O fenômeno da levitação magnética pode ocorrer concomitantemente ao efeito

Meissner; c) A ação de campos magnéticos externos gera a degradação do estado supercondutor; d) Consiste na expulsão completa de campos magnéticos do interior do material supercondutor como alternativas corretas, muito provavelmente pelo enriquecimento deste conteúdo por meio dos experimentos de levitação realizados, representados nas Figuras 16 e 17.

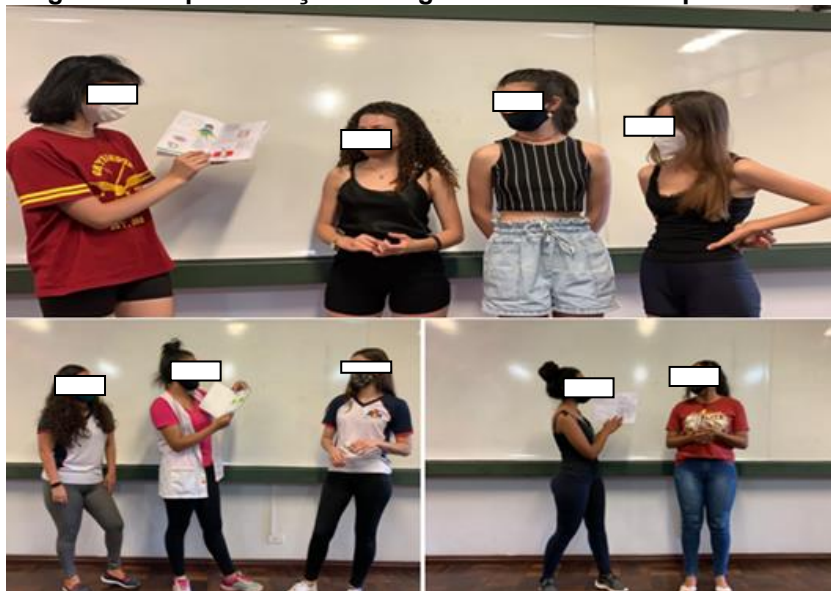
A questão “10”, perguntava aos alunos sobre o que é correto afirmar sobre o estado misto, e teve como respostas corretas as afirmações de que Ocorre apenas nos supercondutores do tipo II, e Define uma região no diagrama de fases na qual é permitida a instalação de campo magnético no interior do supercondutor, ou seja, as alternativas “b” e “d” respectivamente. Tabulando as respostas obtidas desta questão obteve-se: D1 – alternativas “b” e “d”; D2 - alternativas “a” e “b”; D3 - alternativa “b”; D4 - alternativas “b” e “d”; D5 - alternativas “b” e “d”. Nota-se que somente a dupla D2 indicou a resposta correta. As duplas D1, D4 e D5 indicaram respostas parcialmente corretas, ao apontar as alternativas “b” e “d”, bem como a dupla D3.

Sobre a transição para o estado normal, solicitada na questão 11, os alunos deveriam indicar como resposta correta as alternativas: a) De acordo com a teoria BCS, ocorre quando qualquer fonte de energia aplicada ao supercondutor for capaz de destruir os pares de Cooper; c) ocorre quando o supercondutor for completamente penetrado por campo magnético e d) Ocorre quando a resistência elétrica deixa de ser nula. Novamente as duplas D1, D4 e D5 indicaram respostas parcialmente corretas, ao assinalarem as alternativas “b” e “d”. A dupla D2 assinalou as alternativas “a” e “c”, cometendo a mesma falha que as outras duplas, deixando de assinalar a alternativa “d”. Já a dupla D3 errou completamente a questão. Neste cenário, entendemos que seja necessário enfatizar mais esses tópicos durante a interação com os alunos.

Finalizando essa etapa, observou-se que a maioria dos alunos apresentou respostas parcialmente corretas e alguns poucos alunos ainda apresentavam respostas afastadas do contexto. Considerando as falas de diversos alunos e, de modo geral, percebeu-se que estes conseguiram relacionar o conteúdo trabalhado com algumas situações conhecidas. De posse destes resultados entendemos que o conhecimento científico ainda necessita ser trabalhado de maneira mais aprofundada.

Além do questionário final, nesta etapa da pesquisa também foi realizada a apresentação das histórias em quadrinhos geradas pelos alunos, como mostra a Figura 22.

**Figura 22 - Apresentação dos “gibis” – história em quadrinhos.**



**Fonte: Autoria própria (2021).**

Avaliando a criação e a apresentação dos “gibis” – história em quadrinhos sobre a Supercondutividade, observamos a utilização de termos corretos, de forma dinâmica e com o envolvimento de todos os integrantes dos grupos.

Considerando o curto tempo de desenvolvimento das atividades, os diversos conteúdos explorados, bem como as ferramentas aplicadas, a busca pela garantia da aprendizagem foi uma constante ao longo da pesquisa, tanto pelo desejo em aprender quanto pelo envolvimento manifestado pelos alunos. Para alguns alunos participantes da pesquisa, o conteúdo era pouco conhecido e, com certeza, muitos pontos ainda podem ser confusos para eles, mesmo estes trazendo alguns conhecimentos do senso comum a respeito do tema. Entendemos que o tempo destinado ao aprofundamento dos conteúdos de Física, de uma maneira geral, necessita ser ampliado, para que propostas como a apresentada neste trabalho possam ser desenvolvidas sem o comprometimento de algum conteúdo específico e fundamental da educação básica.

Quando um conteúdo de Física é abordado em sala de aula, normalmente este é associado pelos alunos com o formalismo matemático e com o ensino mecânico, que frequentemente causa desânimo, criando resistência a interpretação dos cálculos.

Neste cenário observamos a importância de um trabalho que busca a contribuição de metodologias diferenciadas, para que os alunos procurem relacionar o referido conteúdo à sua própria realidade, ou, pelo menos, àquilo que a mídias modernas oferecem e que muitas vezes ficam fora dos muros escolares.

Isso vem demonstrar que os conteúdos da disciplina necessitam ser ampliados, com vistas a um desenvolvimento aprofundado, interativo, problematizador que busque a articulação entre teoria e prática, entre os saberes do senso comum e o conhecimento científico.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Essa proposta está fundamentada em uma metodologia capaz de permitir o ensino de conteúdos da disciplina de Física e embasada nos conceitos da supercondutividade. Para tanto, buscou-se por meio da perspectiva histórico-crítica - base metodológica desta proposta - compreender como ocorre a apropriação do conhecimento pelos alunos, pois, ao se observar a compreensão dos conceitos, a motivação e a socialização dos conteúdos podemos perceber aspectos relevantes no processo de aprendizagem.

Destaca-se que os instrumentos didáticos apresentados aos alunos foram pertinentes e capazes de despertar o interesse pela aprendizagem. Além disso, esses mesmos instrumentos também contribuíram para a articulação entre o conhecimento científico com os conhecimentos cotidianos e outras áreas das ciências naturais. Neste contexto, experimentos com supercondutores não são comuns e muito menos fáceis de ser conduzidos pelos alunos, principalmente pelos cuidados demandados com a manipulação do N líquido, como destacados por Bombardi (2021).

Este trabalho buscou desenvolver e avaliar uma proposta para o ensino Supercondutividade inserida no currículo do ensino médio, principalmente por estar relacionado à impressionante revolução tecnológica que se presencia desde o início de século XX, dando origem a uma série de aplicações potencialmente motivadoras para os alunos. A partir do trabalho desenvolvido nesta pesquisa, percebemos que esses conteúdos vêm sendo abordado, de modo superficial, o que dificulta a possibilidade dos alunos relacioná-lo às práticas e vivências do cotidiano.

Buscamos com a realização dessa pesquisa, oferecer ao professor uma ferramenta metodológica que possibilite um maior aprofundamento dos fundamentos do seu trabalho pedagógico na disciplina de Física. Pensamos que essa ferramenta poderá da melhor forma possível, ajuda o professor a ensinar ciências, uma vez que esta deve ser tratada por meio de situações problematizadoras que levem à motivação dos alunos e a elaboração de um conhecimento científico mais orientado.

Por fim, todo o resultado obtido do desenvolvimento deste trabalho foi divulgado no site <http://www.toocastelobranco.seed.pr.gov.br>, destacando a importância do trabalho realizado por meio de atividades que necessitam dos conteúdos da Física Clássica. Este fato leva-nos a compreender também que a partir de uma abordagem contextualizada, os conteúdos podem ser inseridos na educação básica, permitindo com isso, uma compreensão dos avanços tecnológicos, contribuindo com a formação cultural, econômica e social dos alunos.



## REFERÊNCIAS

ARAÚJO, M. S. T.; ABIB, M. L. V. S. Atividades Experimentais no Ensino de Física: Diferentes Enfoques, Diferentes Finalidades Experimentais. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, vol. 25, no. 2, p. 176-194, Junho, 2003.

BARROS E SILVA, D. **A Supercondutividade e suas aplicações**. (2003). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Disponível em: <https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/2846/4/DBSilva.pdf>. Acesso em: 5 de abr. 2022.

BOMBARDI, G. M.; *et. al.* **Supercondutividade no laboratório didático da Licenciatura em Física: uma estratégia para inserção da FMC no Ensino Médio**. In: SILVEIRA, J. L. (Org.) **Tópicos em Educação: docência, tecnologias e inclusão**. Formiga – MG: Editora MultiAtual, 2021.

BRANÍCIO, P. S. Introdução a Supercondutividade, Suas Aplicações e a Mini-Revolução Provocada Pela Redescoberta do MgB<sub>2</sub>: Uma Abordagem Didática. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, vol. 23, no. 4, Dez. 2001.

CARVALHO, S. H. M. ; ZANETIC, J. **Ciência e arte, razão e imaginação: complementos necessários à compreensão da física moderna**. 2004, **Anais...** São Paulo: SBF, 2004. Disponível em: <http://www.sbf1.sbfisica.org.br/eventos/epf/ix/sys/resumos/T0094-1.pdf>. Acesso em: 18 out. 2022.

COSTA, M. B. S.; PAVÃO, A. C. Supercondutividade: um século de desafios e superação. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 34, n. 2, p.2602, 2012.

DALTONICS, B. **Registro de corrente com um supercondutor de pó em tubo**. (2008). Disponível em: <https://web.archive.org/web/20081008042419/http://www.laboratorytalk.com/news/bru/bru219.html>. Acesso em: 5 de abr. 2022.

FESTA, F.; MASSONI, N.T.; PUREUR NETO, P. **Proposta didática para desenvolver o tema Supercondutividade no Ensino Médio** [recurso eletrônico]. Porto Alegre, UFRGS, Instituto de Física, 2015. Disponível em: [https://www.if.ufrgs.br/public/tapf/tapf\\_2015\\_v26\\_n4.pdf](https://www.if.ufrgs.br/public/tapf/tapf_2015_v26_n4.pdf). Acesso em: 4 de mar. 2022.

FLÜKIGER, R. **Superconductivity for Magnets** (2013). Disponível em: <https://cds.cern.ch/record/1974058/files/arXiv:1501.07146.pdf>. Acesso em: 5 de abr. 2022.

GARCIA, C. B. **Caracterização micro-estrutural de cerâmicas supercondutoras do tipo SmBaCuO através do software IMAGEJ**. 2017. Dissertação (Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico, Vitória, 2017.

GASPARIN, J. L. **Uma Didática para a Pedagogia Histórico-Crítica**. 2ªed. Campinas, SP: Autores Associados, 2003.

GASPARIN, J.L.; PETENUCCI, M.C. **Pedagogia histórico crítica: da teoria à prática no contexto escolar**. 2012. Disponível em: <http://www.diaadiaeducacao.pr.gov.br/portals/pde/arquivos/2289-8.pdf>. Acesso em: 05 de abr. 2022.

GOMES, E. P. A. **Controle digital para um sistema de levitação magnética**. 2016. Disponível em: <http://www.dee.ufc.br/wp-content/uploads/2017/07/TFC-EDUARDO-PASSOS-APOLIANO-GOMES.pdf>. Acesso em: 5 de abr. 2022.

HESSEL, R.; FRESCHI, A. A.; SANTOS, F. J. Lei de indução de Faraday: Uma verificação experimental. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 37, n. 1, 1506 (2015)

IV CONAED, 2019, Catalão, **Anais eletrônicos [...] Campinas: Galoá, 2019**. Disponível em: <<https://proceedings.science/conaed-2019/papers/-ensino-de-fisica-baseado-em-historia-e-evolucao-da-fisica>>. Acesso em: 01 abr. 2022.

LEPICH, R. S. **Caracterização da deposição de pó cerâmico supercondutor de  $\text{SmBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  em aço inoxidável lean duplex**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). UFES - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2017.

LE ROUX, C.; MACNAE, J. **SQUID sensors for EM systems**. In: "**Proceedings of Exploration 07: Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration**". Edited by B. Milkereit, 2007, p. 417-423

LÜDKE, M; ANDRÉ, M. E. D. A. **Pesquisa em educação: abordagens qualitativas**. São Paulo: Pedagógica e Universitária LTDA, 2014.

MAROUCHKINE, A. Supercondutividade à temperatura ambiente. **Cambridge International Science Publishing**, Cambridge, Reino Unido, 2004, p. 82-93.

MENEGOTTO, F.N. **Supercondutividade**. (2012). Disponível em: <https://pt.slideshare.net/meneguinha/supercondutividade>. Acesso em: 01 abr. 2022

MIRANDA, A. G. **Estudo sobre a teoria de Ginzburg-Landau e o conhecimento de mapas conceituais**. 2013. Dissertação (Mestrado em Física). Universidade Federal do Amazonas. Manaus, 2013.

MLA style: **Heike Kamerlingh Onnes - Facts. Nobel Prize.org. Nobel Prize Outreach AB 2022**. Disponível em: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1913/onnes/facts/>. Acesso em 01/04/2022.

OSTERMANN, F. **Tópicos de Física Contemporânea em Escolas de Nível Médio e na Formação de Professores de Física**. 2000. Tese (Doutorado em Ciências), Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

OSTERMANN, F.; PUREUR, P. **Supercondutividade**. 1ª ed. São Paulo: livraria da Física: Sociedade Brasileira de Física, 2005 (Temas Atuais de Física).

PARANÁ. Secretaria de Estado da Educação. **DCEs - Diretrizes Curriculares de Física**. Curitiba: SEED, 2008

POOLE, C. P.; FARACH, H. A.; CRESWISK, R. J.; PROSOROV, R. **Superconductivity**. 2 ed. San Diego - CA: Academic Press, 2007.

PUREUR, P. **Supercondutividade e Materiais Supercondutores**. Parte I: Supercondutividade. Porto Alegre: Instituto de Física-UFRGS, 2004.

PUREUR, P. **Supercondutividade**: uma introdução. IXa. ESCOLA do CBPF. Julho de 2012. Disponível em:  
[https://mesonpi.cat.cbpf.br/e2012/arquivos/pg13/Supercondutividade\\_aula\\_1.pdf](https://mesonpi.cat.cbpf.br/e2012/arquivos/pg13/Supercondutividade_aula_1.pdf).  
Acesso em: 6 jun. 2022.

PUREUR, P.; OSTERMANN, F. **Temas Atuais de Física: Supercondutividade**. 1 ed. São Paulo: Editora Livraria: SBF, 2005.

RODRIGUES, E. I. B. **Fórmula de Lichnerowicz-Weitzenböck aplicada a Supercondutores de uma e duas componentes**. Dissertação (Mestrado em Física) Programa de Pós-graduação em Física Aplicada, UFRPE, Pernambuco, 2013

SANTOS, A. L.; PRESOTTO, A. G.; JUNIOR, M. P. C.; BRITO, G. A.; CARVALHO, Cláudio L.; ZADOROSNY, R. Experimento demonstrativo de levitação supercondutora: Ferramenta para problematização de conceitos físicos. Desenvolvimento em Ensino de Física. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, 37 (2), Jun/ 2015.

SASSERON, L. H.; CARVALHO, A. M. P. Alfabetização científica: uma revisão bibliográfica. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 16, n. 1, p. 59–77, 2011.

SAVIANI, D. **Educação escolar, currículo e sociedade**: o problema da base nacional comum curricular. (Org.) Julia Malanchen, Neide da Silveira Duarte de Matos, Paulino José Orso. In: A pedagogia histórico-crítica, às políticas educacionais e a Base Nacional Comum Curricular. Campinas, S.P: Autores Associados, 2020.

SAVIANI, D. **Pedagogia histórico-crítica**: primeiras aproximações. 11. ed. rev. Campinas: Autores Associados, 2011. 137 p.

SILVA, C. E. **Estudo básico sobre Supercondutividade e suas aplicações**. 2015. Dissertação (Licenciatura em Física) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2015.

SILVA, W. S. **Solução da Equação de London no espaço hiperbólico**. Dissertação (Mestrado em Física da Matéria Condensada) – Universidade Federal de Alagoas, Instituto de Física, Maceió, 2016.

TIPLER, P. A.; MOSCA, G. **Física para Cientistas e Engenheiros**. Vol. 2, 5a ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

ZADOROSNY, R.; SANTOS, A. L.; PRESOTTO, A. G; JUNIOR, M. P. C.; BRITO, G. A.; CARVALHO, C. L. Fenomenologia da Supercondutividade e Supercondutores Mesoscópicos. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. v. 37, n.2, (2015).

## **APÊNDICE A - Questionário inicial/final**

**1) Quanto aos materiais supercondutores, é correto afirmar:**

- a) apresentam resistência elétrica nula quando material estiver abaixo da temperatura crítica.
- B). Permitem a entrada do campo magnético em seu interior a uma temperatura acima da temperatura crítica.
- c) apresentam o diamagnetismo perfeito caracterizado pela penetração do campo magnético abaixo da temperatura crítica.
- d) apresentam o diamagnetismo perfeito caracterizado pela expulsão do campo magnético abaixo da temperatura crítica.

**2) cite os principais desafios técnicos científicos para a aplicação prática da Supercondutividade consiste em:**

- a) Construção de sistemas eficientes de grandes dimensões para manter as baixas temperaturas necessárias pelos supercondutores.
- b) obter supercondutores que apresentem temperatura crítica mais próximas da temperatura ambiente.
- c) Compreensão de medidas das propriedades físicas dessa classe de materiais.
- d) vencer o desinteresse dos cientistas pesquisadores, uma vez que a supercondutividade é um fenômeno difícil e raro de acontecer.

**3). Descreva qual o maior objetivo entre os cientistas que pesquisam a Supercondutividade?****4). Qual a diferença entre os Supercondutores do tipo I e do tipo II?****5). Onde aplicada a Supercondutividade na sociedade moderna?**

- a) nas transmissões de energia.
- b) na eletrônica, no uso de lâmpadas mais econômicas.
- c) em aparelhos que requerem intensos campos magnéticos.
- d) Transporte coletivo os trens de alta velocidade.

**6). Quem descobriu a Supercondutividade e quando isso ocorreu?**

- a) Heike Kamerlingh Onnes em 1911.
- b) Heike Kamerlingh Onnes em 1908.
- c) John Bardeen em 1911.
- d) John Robert Schriefferem 1913

**7). Cite quais os pesquisadores que contribuíram para a compreensão da Supercondutividade?**

**8) Supercondutor é: um material que pode conduzir eletricidade ou transportar elétrons de um átomo para outro sem resistência elétrica. Isso significa que nenhum calor, som ou qualquer outra forma de energia seria liberada do material abaixo da temperatura crítica.**

Verdadeiro ( )

Falso ( )

**9) Sobre o efeito Meissner e o campo magnético aplicado em materiais no estado supercondutor, é correto afirmar que:**

- a) A sua existência prevê a existência de duas temperaturas críticas.
- b) O fenômeno da levitação magnética pode ocorrer concomitantemente ao efeito Meissner.
- c) A ação de campos magnéticos externos gera a degradação do estado supercondutor.
- d) consiste na expulsão completa de campos magnéticos do interior do material supercondutor.

**10). Sobre o estado misto, podemos afirmar que?**

- a) ocorre apenas em supercondutores do tipo II.
- b) define uma região no diagrama de fases na qual é permitida a instalação de campo magnético no interior do supercondutor.
- c) consiste em uma região onde ocorre dissipação de energia.
- d) ocorre apenas nos supercondutores do tipo I.

**11). Sobre a transição para o estado normal, é correto afirmar que?**

- a) De acordo com a teoria BCS, ocorre quando qualquer fonte de energia aplicada ao supercondutor for capaz de destruir os pares de Cooper.
- b) costumeiramente ocorre em temperaturas maiores para os supercondutores do tipo I.
- c) ocorre quando o supercondutor for completamente penetrado por campo magnético.
- d) ocorre quando a resistência elétrica deixa de ser nula.



## **APÊNDICE B – Gabarito do questionário inicial**

**Questão 1**

Alternativas corretas: a), b) e d)

**Questão 2**

Alternativas corretas: a) e b)

**Questão 3**

Resposta: Desenvolver materiais supercondutores robustos, com  $T_c$  próximas ou superiores à temperatura ambiente, viabilizando a aplicação dos mesmos em diferentes dispositivos sem a necessidade de sistemas criogênicos.

**Questão 4**

Resposta: Supercondutores do tipo I apresentam apenas um regime de resistência nula e diamagnetismo perfeito abaixo de  $T_c$ . Já os supercondutores do tipo II exibem dois regimes nos quais a resistência nula é observada. Para baixos campo (abaixo de  $H_{c1}$ ), o efeito Meissner é verificado. Em um regime de campos moderados, o estado misto é instalado no interior do supercondutor permitindo a entrada quantizada de campo magnético, que persiste até campos inferiores à  $H_{c2}$ , acima do qual o material transiciona para o estado normal.

**Questão 5**

Alternativas corretas: a), c) e d)

**Questão 6**

Alternativa correta: a)

**Questão 7**

Resposta: Heike K. Onnes; Walther Meissner e Robert Ochsenfeld; Fritz e Heinz London; Vitaly Ginzburg e Lev Landau; John Bardeen, Leon N. Cooper e Robert Schrieffer; Brian D. Josephson; Karl Alex Muller e J. Georg Bednorz; Anthony J. Leggett e Alexei A. Abrikosov.

**Questão 8**

Resposta: Verdadeiro

**Questão 9**

Alternativas corretas: b), c) e d)

**Questão 10**

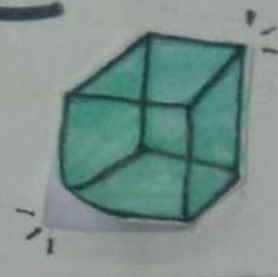
Alternativas corretas: a) e b)

**Questão 11**

Alternativas corretas: a), c) e d)

## **APÊNDICE C – Gibis produzidos pelos alunos**

Físicos  
que  
contribuyen  
para  
Superconductividad







ESTES SÃO OS FÍSICOS QUE  
CONTRIBUÍRAM PARA A CONDUTIVI-  
DADE:

- HEIKE KAMERLING ONNER
- KARL MEISSNER
- ROBERT OCHSENFELD



HEIKE KAMERLINGH ONNES  
DESCOBRIU O RACIÓCNIO  
RELACIONADO AO RES FRI-  
AMENTO DE METAIS E O  
AUMENTO DA CONDUCTIVIDA-  
DE.



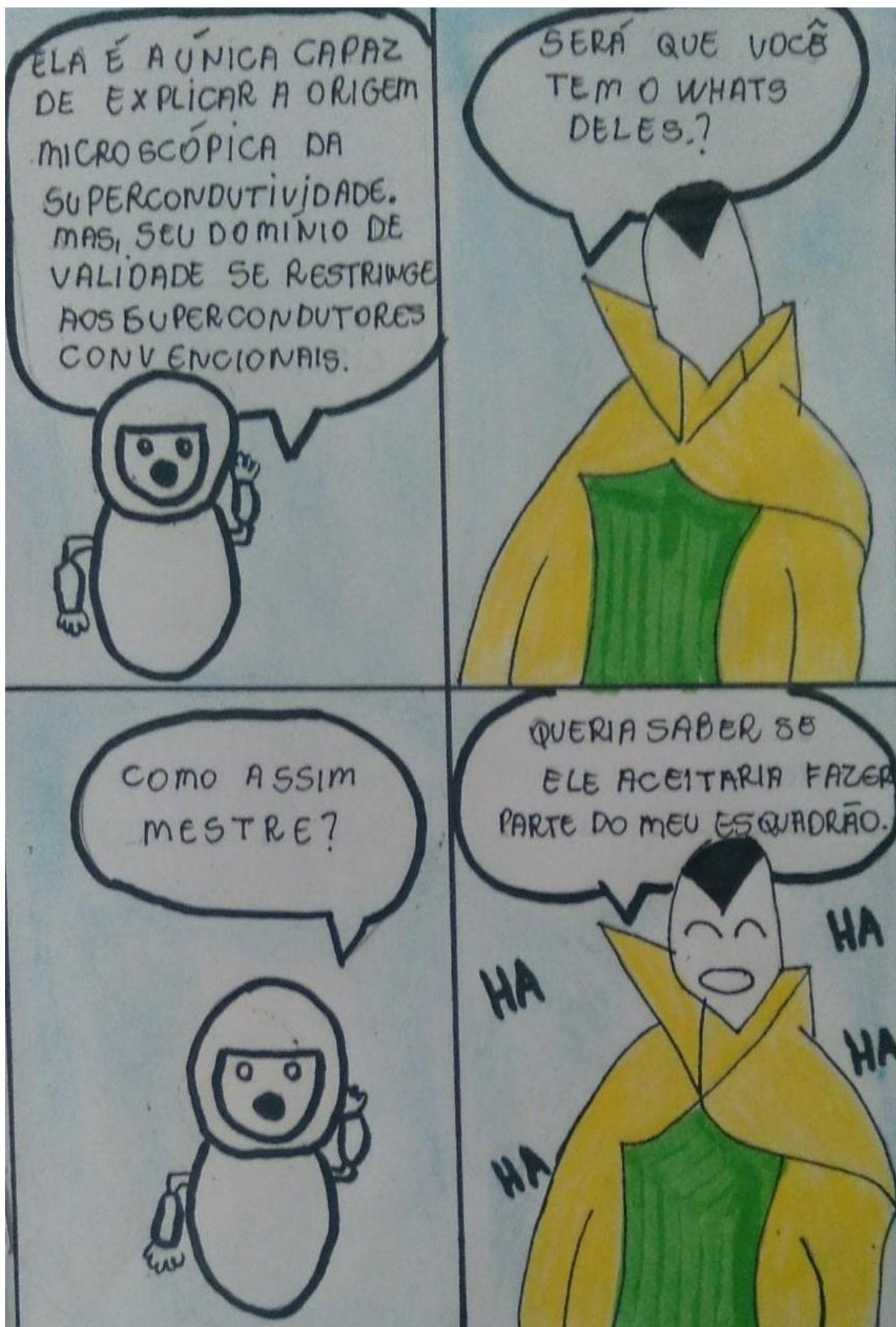


EM SEUS EXPERIMENTOS, DESCOBRIRAM  
QUE, QUANDO UM SUPERCONDUTOR É  
EXPOSTO A UM CAMPO MAGNÉTICO EXTER-  
NO, É POR MEIO DESSE FENÔMENO, ATUAL-  
MENTE CHAMADO DE EFEITO MEISSNER,  
QUE É POSSÍVEL FAZER TRENS LEVITA-  
REM, COMO É O CASO MAGLEV.















MARIA ROSELI SALU DOS S. HAPNER  
FÍSICA

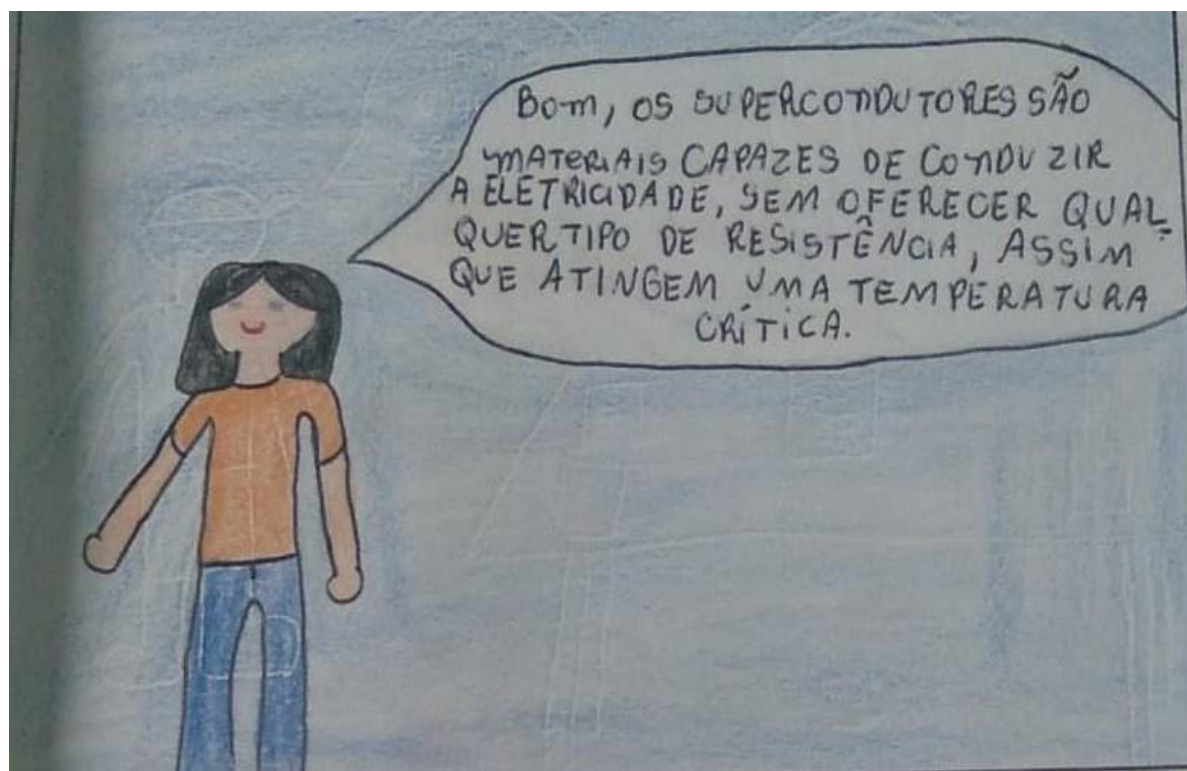
# Supercondutores

ANA PAULA SANTOS, n-03  
KAROLAINÉ SALVÁTICO, n-17  
SÂMELLA ALVES, n-26

3-AFD



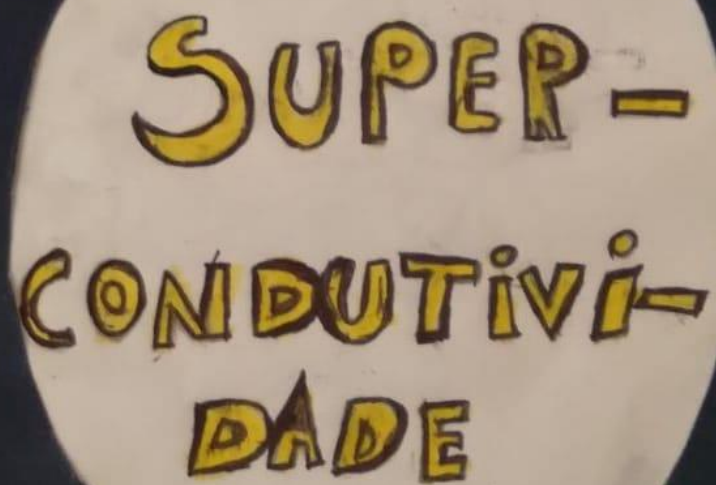




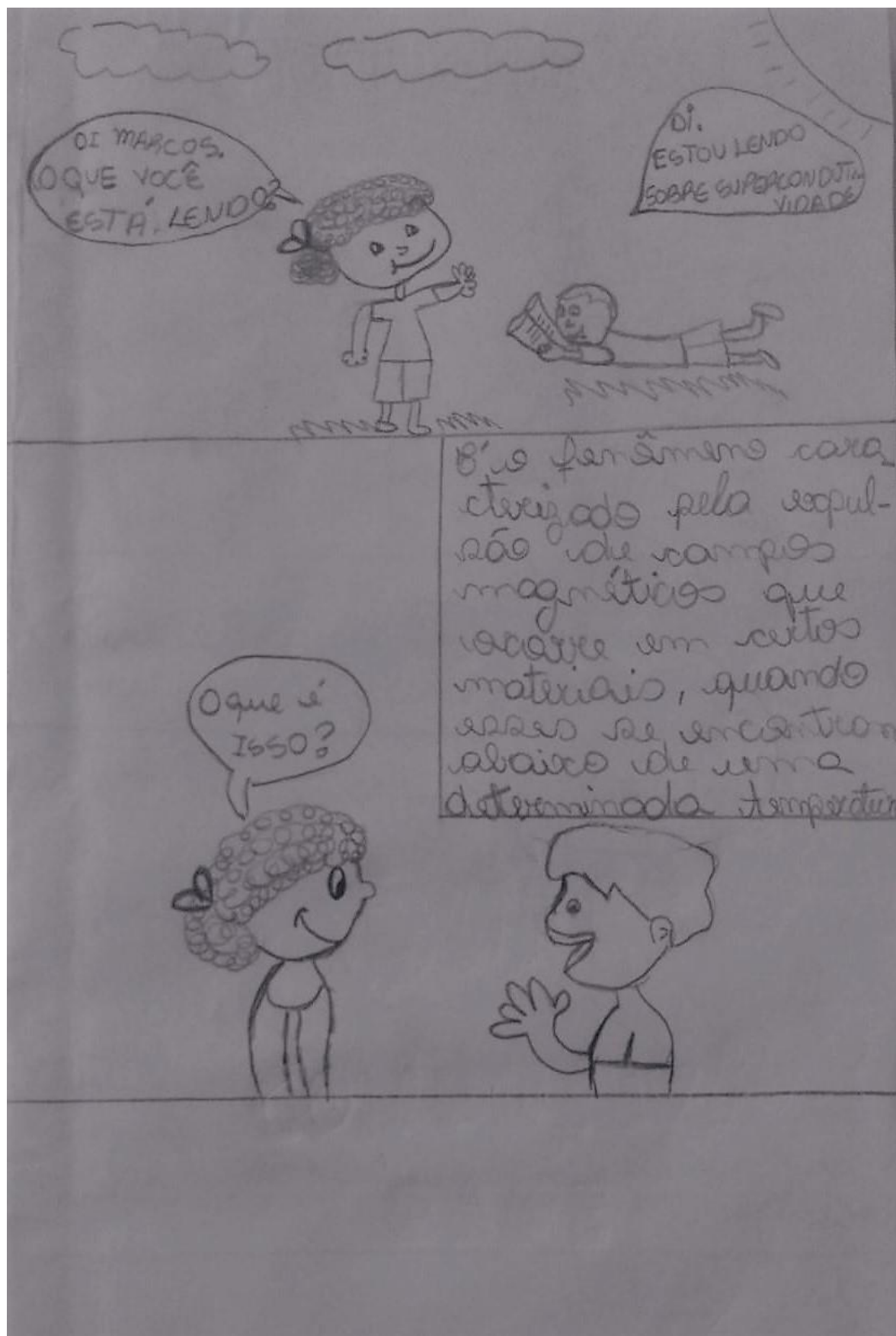






A white oval shape is centered on a dark blue background. Inside the oval, the words "SUPER-CONDUCTIVIDADE" are written in a bold, yellow, hand-drawn font. The text is arranged in three lines: "SUPER-" on the top line, "CONDUCTIVI-" on the middle line, and "DADE" on the bottom line.

SUPER-  
CONDUCTIVI-  
DADE



# Ver SUPERCONDUTORES

Nº

3º

É o que é o tal de supercondutores?

Veja, vou te explicar



O alumínio e o estanho são dois exemplos de materiais supercondutores. É habitual que os materiais arrefeçam com hélio líquido para que possam alcançar a tal temperatura crítica. Quando o material se transforma em supercondutor, pode ser usado para o desenvolvimento de circuitos e electroímãs.

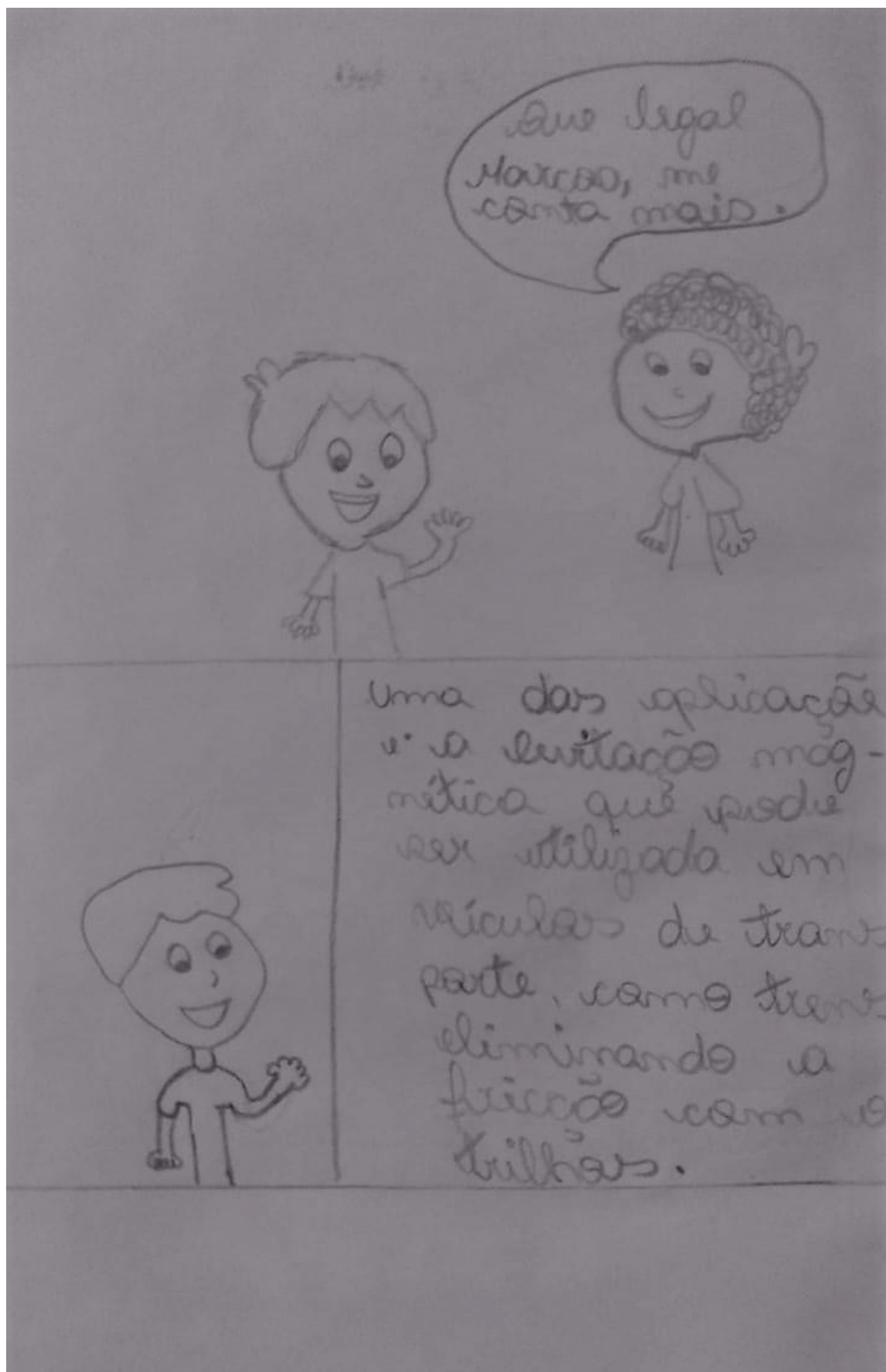


Um supercondutor conduz  
eletricidade sem resistência,  
uma propriedade  
única.



Também repele  
perfeitamente os cam-  
pos magnéticos em  
um fenômeno co-  
nhecido como efei-  
to Meissner, per-  
dendo qualquer  
campo magnético  
interno.

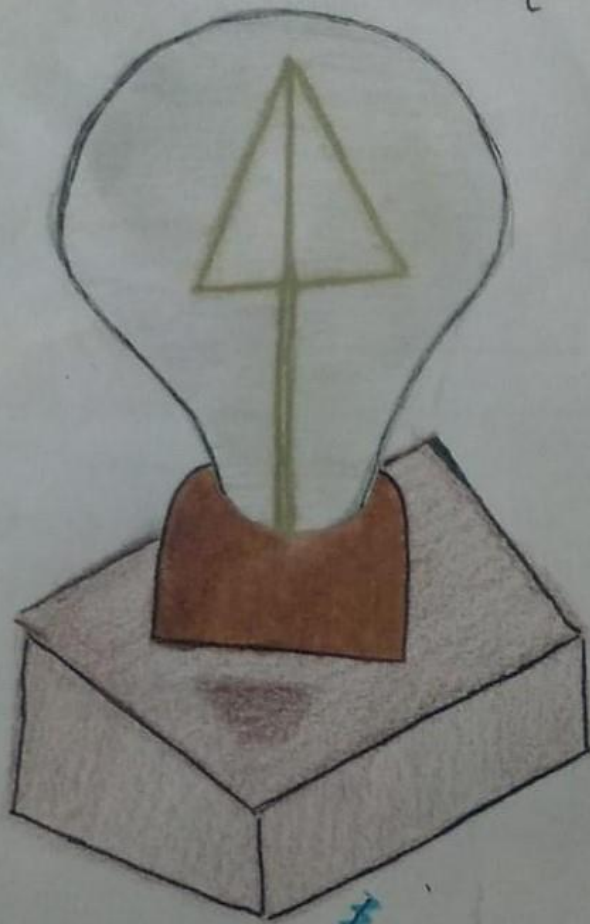




Gostei, vou falar para minha  
mãe que o super-herói  
faz lutação.



Levitación



MAGNÉTICA



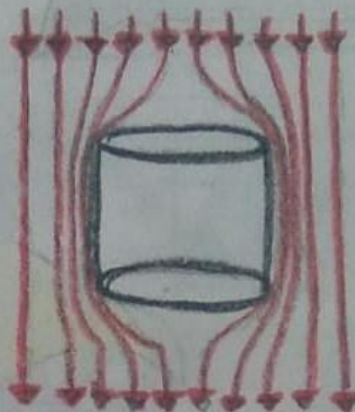
Contrariando, assim  
as forças de gravidade,  
mediante o uso de forças  
exercidas - sem contato  
com o objeto.



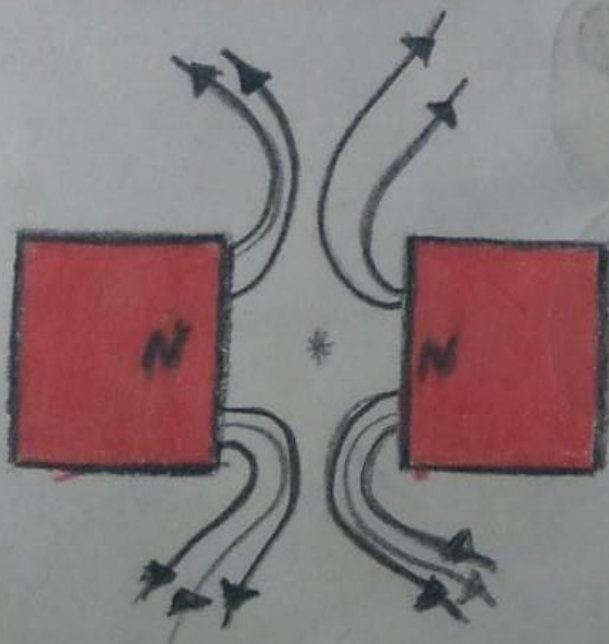
Mantem um corpo  
suspensa no ar, sem  
qualquer apoio  
aparente, como que  
desafiando a lei  
da gravidade, é  
reconhecido como  
fenômeno de  
Levitacão



A Levitação estável de alguns materiais comuns se baseia em uma propriedade que todos os materiais possuem, chamada de diamagnetismo



Ao tentar aproximar os pólos iguais de dois ímãs, este se repelem, o pólo positivo do campo externo repele os pólos positivo de cada átomo magnetizado do material



Quando os campos são contrários, essa força de repulsão gerada faz com que o material possa levitar quando a mesma for maior que o peso do material.

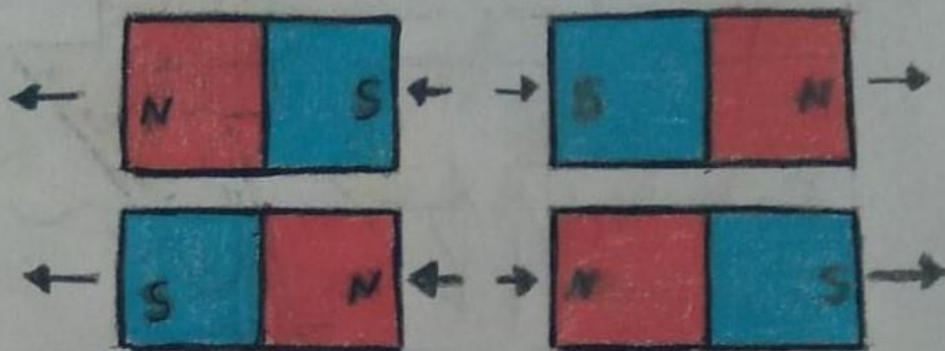


Existem três tipos básicos de levitação magnética

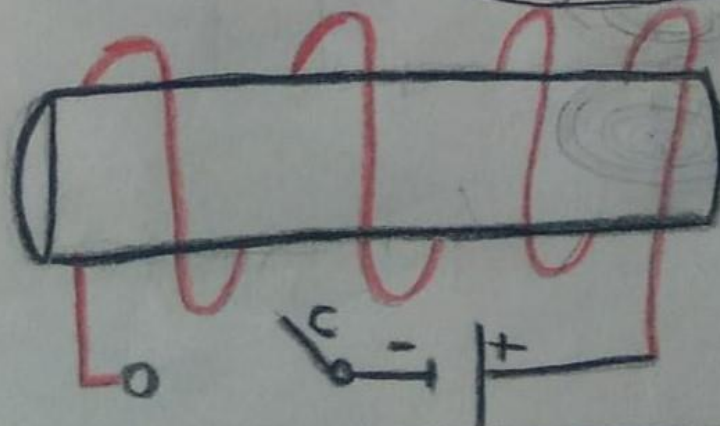
3



Levitação eletrodinâmica  
ou por  
repulsão magnética



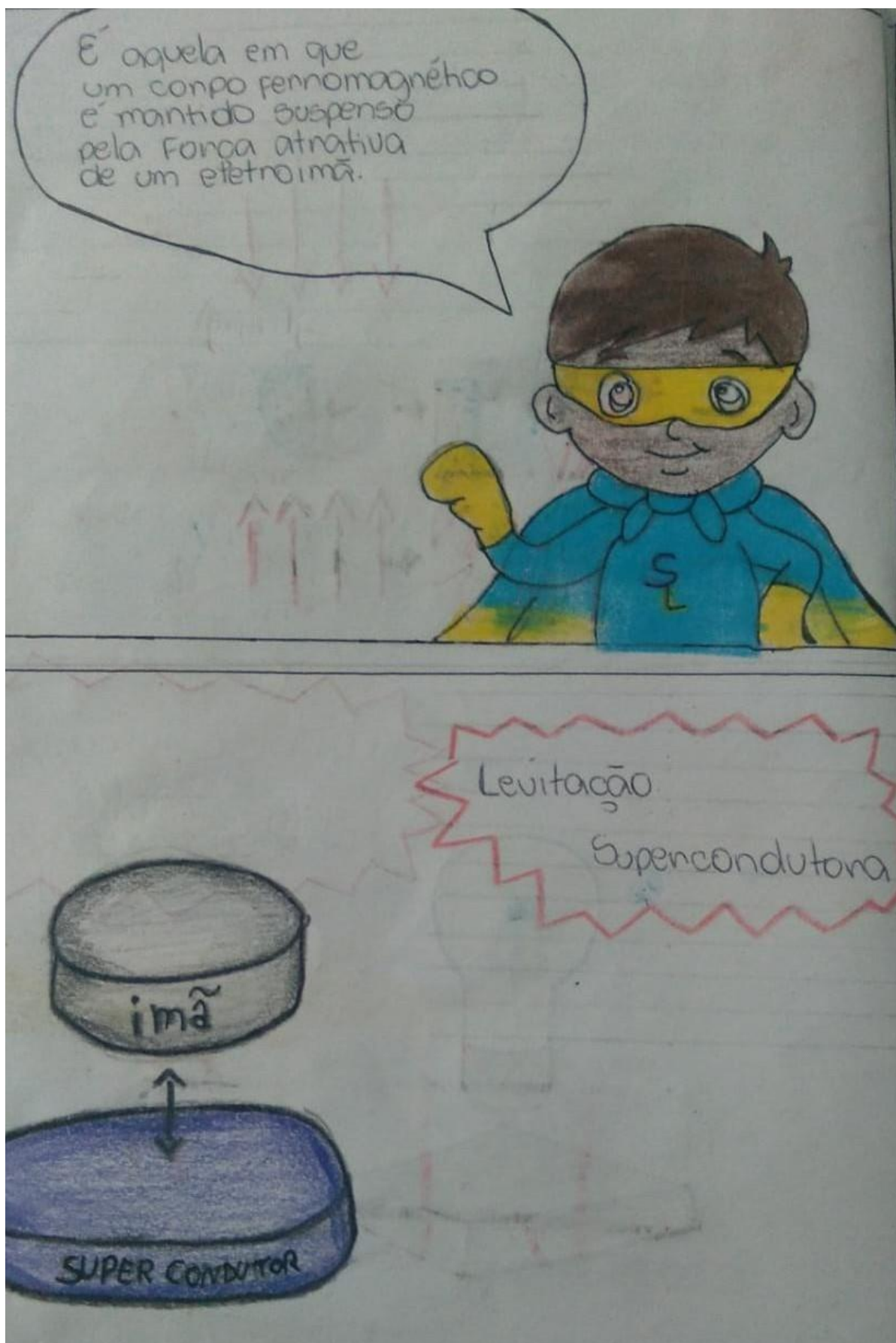
O método consiste na utilização de bobinas com uma baixa resistência elétrica, chamadas de bobinas supercondutoras para a geração de um campo magnético.

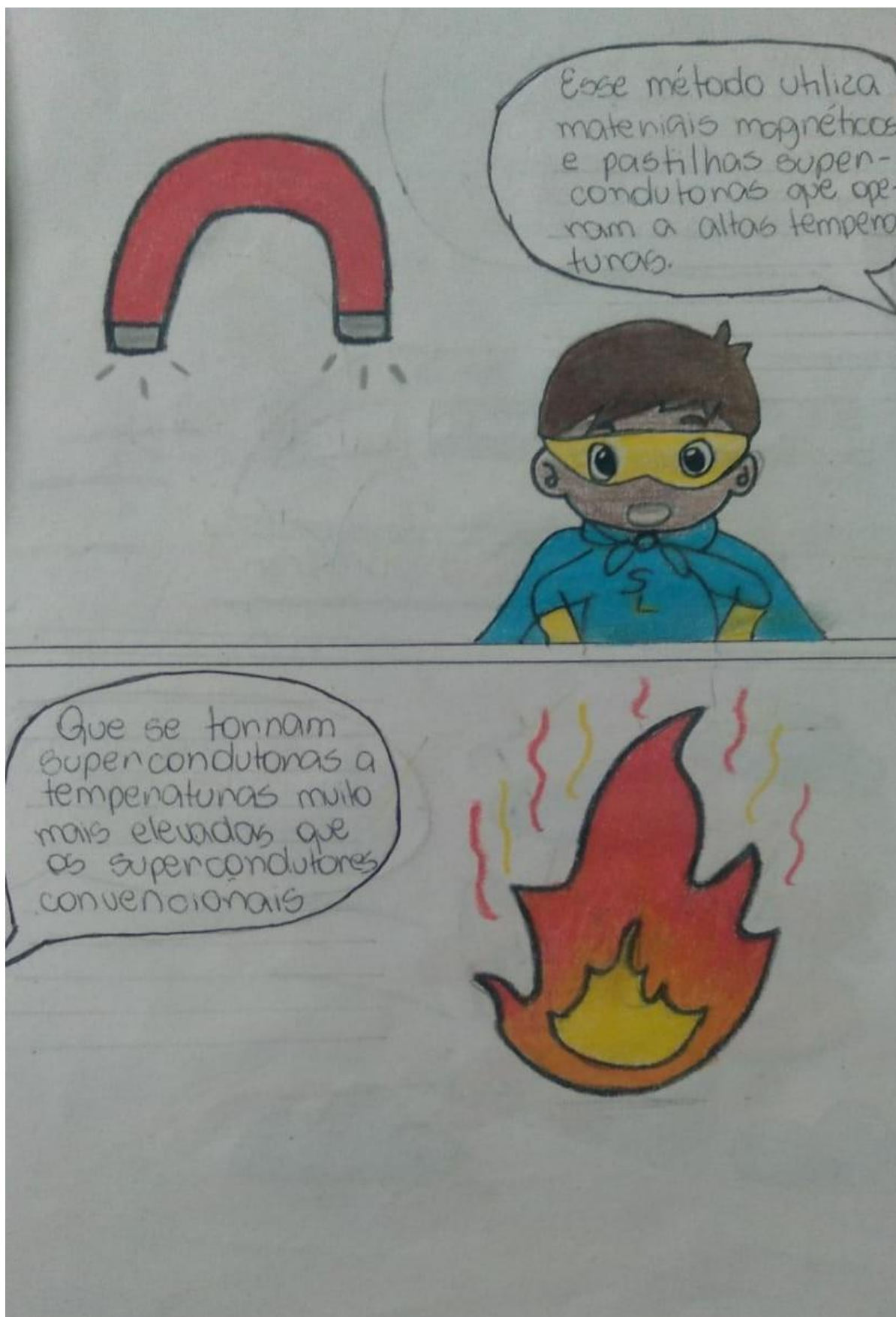


O qual provoca o surgimento de uma corrente elétrica induzida em um condutor, devido à movimentação do campo nas proximidades do mesmo.

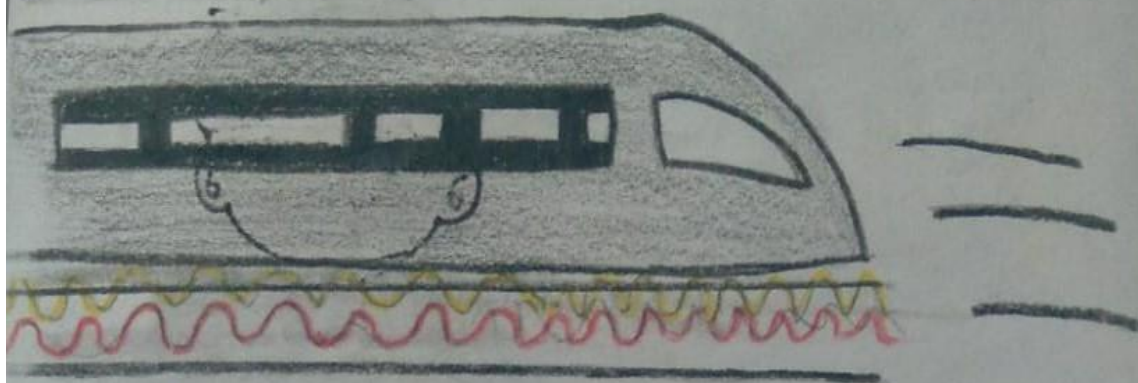


Estas correntes, conforme as leis de Faraday e Lenz, geram outro campo magnético que se opõe a campo criado pela bobina.

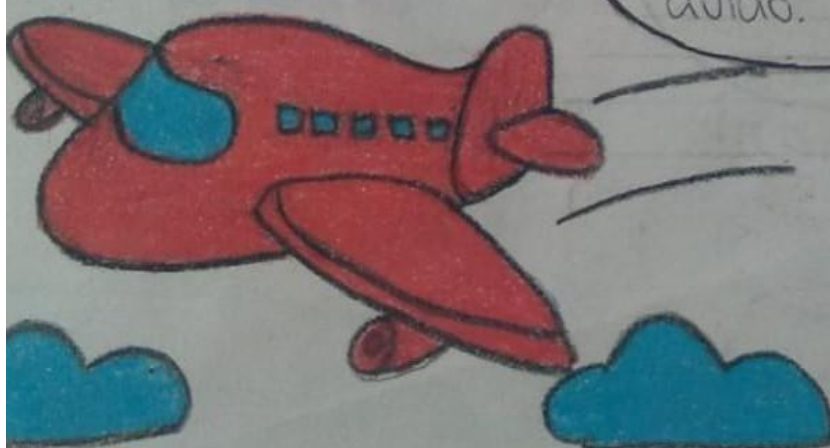




Um exemplo é os trens  
MAGLEV, que levitam  
sobre os carris e  
deslocam-se sem um  
motor convencional,  
apenas com base  
no campo magnético.



Estes podem atingir  
velocidades de 500km/h  
o equivalente a um  
avião.



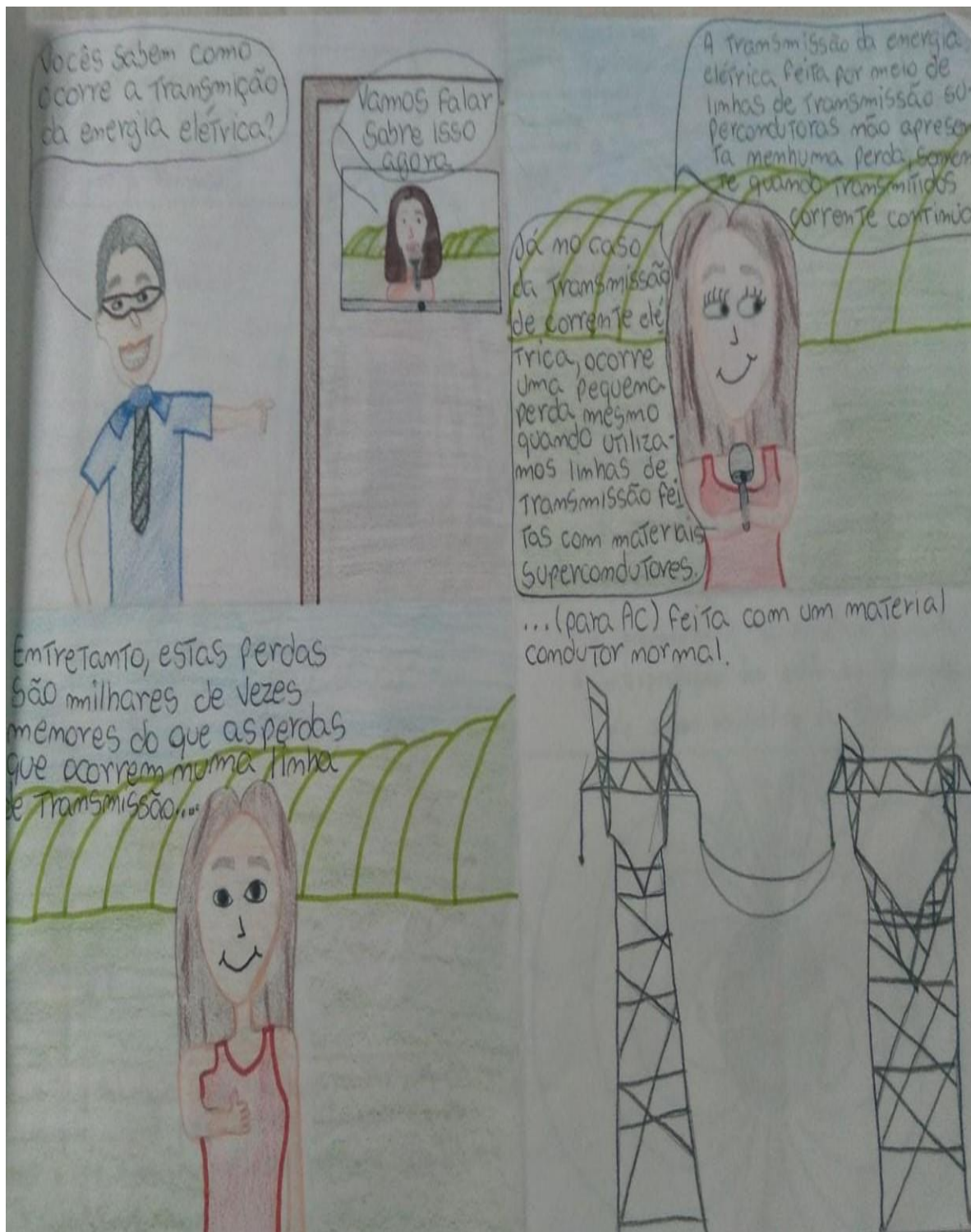
Supercondutividade:

• APLICAÇÕES •

tecnológicas

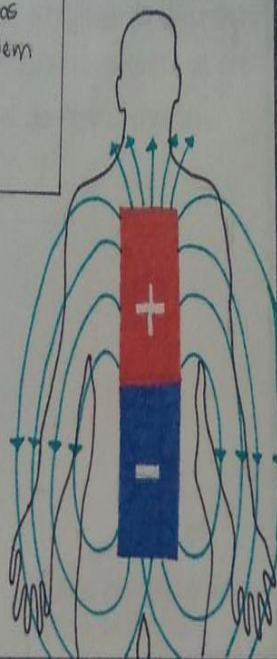
38  
40



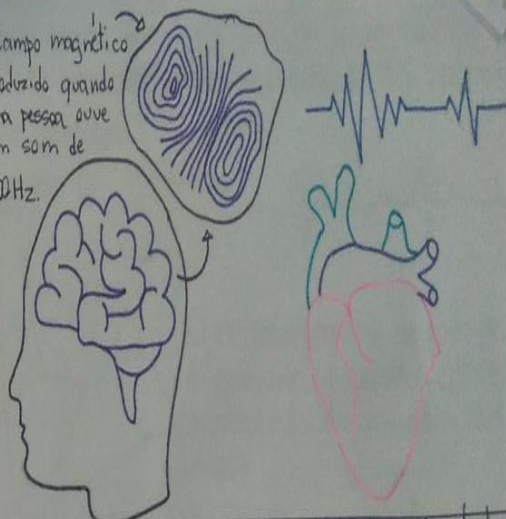




O Biomagnetismo estuda as atividades biológicas que podem produzir fracos campos magnéticos, como no corpo humano.



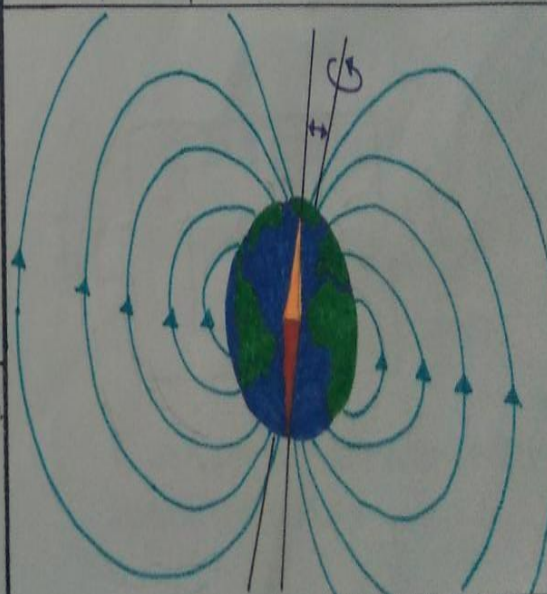
Campo magnético produzido quando uma pessoa ouve um som de 60Hz.



Por exemplo, algumas atividades do cérebro ou do coração produzem campos magnéticos extremamente fracos.

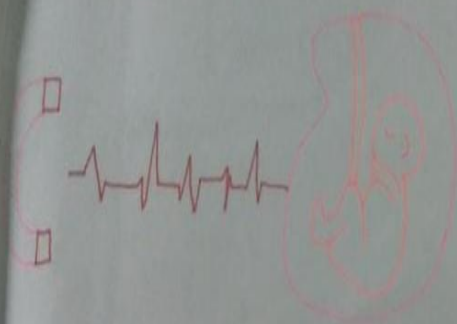


e, provavelmente se orientam mediante a interpretação dos estímulos provocados pelo campo magnético da Terra.



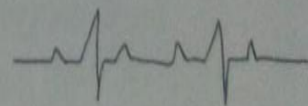
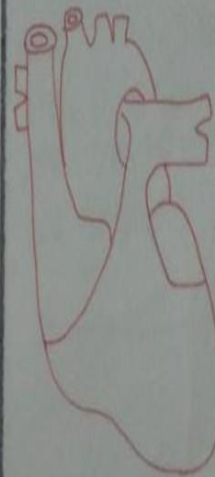
Já a Magnetobiologia estuda o efeito de campos mag. nos seres vivos.  
Por exemplo, alguns pesquisadores afirmam que as abelhas e as aves migratórias possuem sensibilidade magnética...

as o interesse maior das pesquisas de Biomagnética está concentrada nos campos magnéticos produzidos por fontes do interior do corpo humano.

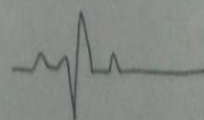


Como exemplo: o magnetocardiograma

Estes efeitos magnéticos possuem efeitos elétricos que são detectados através de medidas de ddp (diferença de potencial).



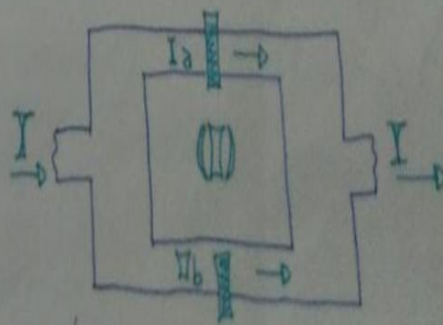
O eletrocardiograma por exemplo, é produzido por impulsos elétricos provenientes da atividade cardíaca



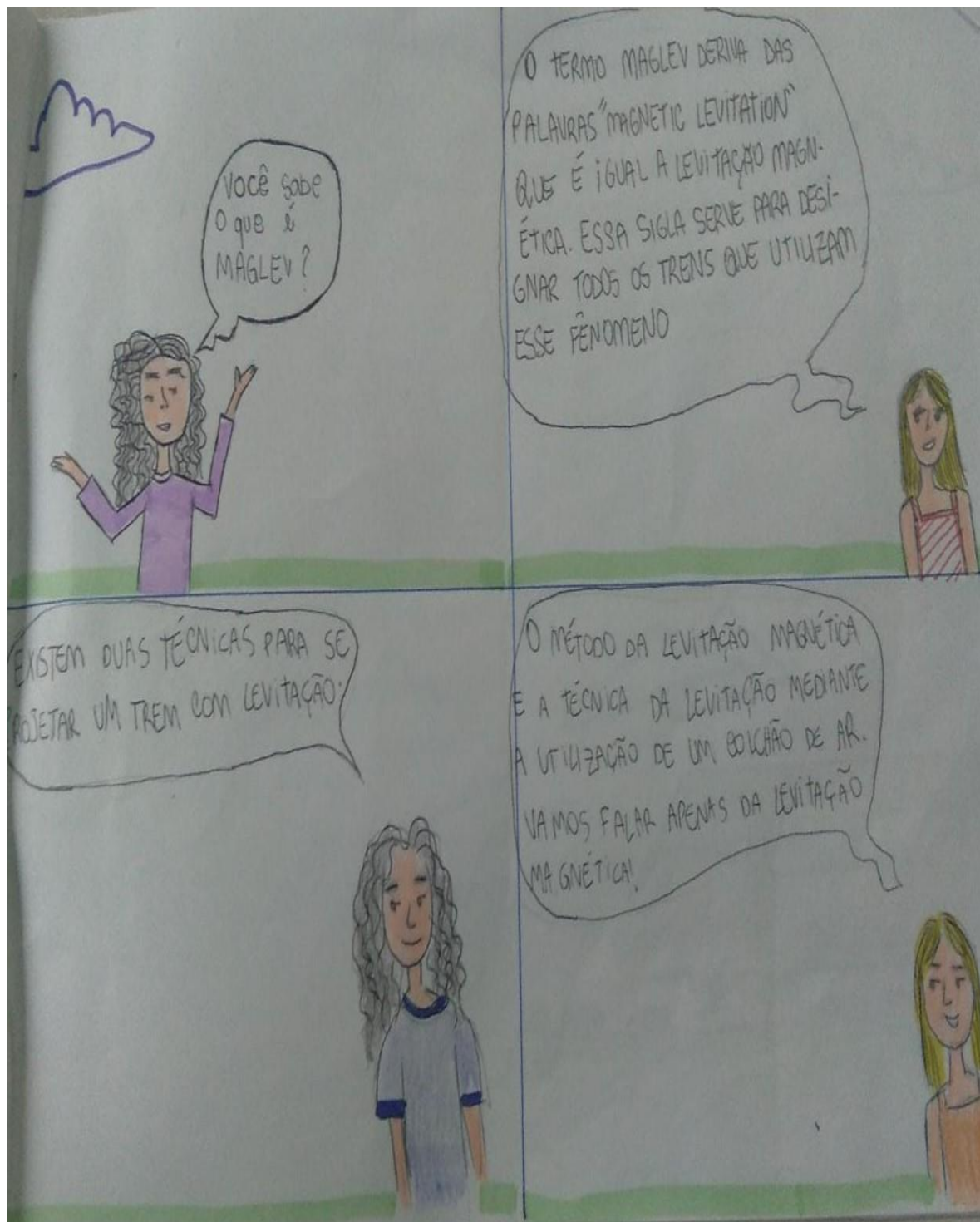
Os métodos envolvendo medidas elétricas são, atualmente, mais utilizados do que métodos magnéticos. Contudo, com o aperfeiçoamento do SQUID acredita-se que as medidas magnéticas biológicas irão desempenhar um papel relevante nas pesquisas médicas.

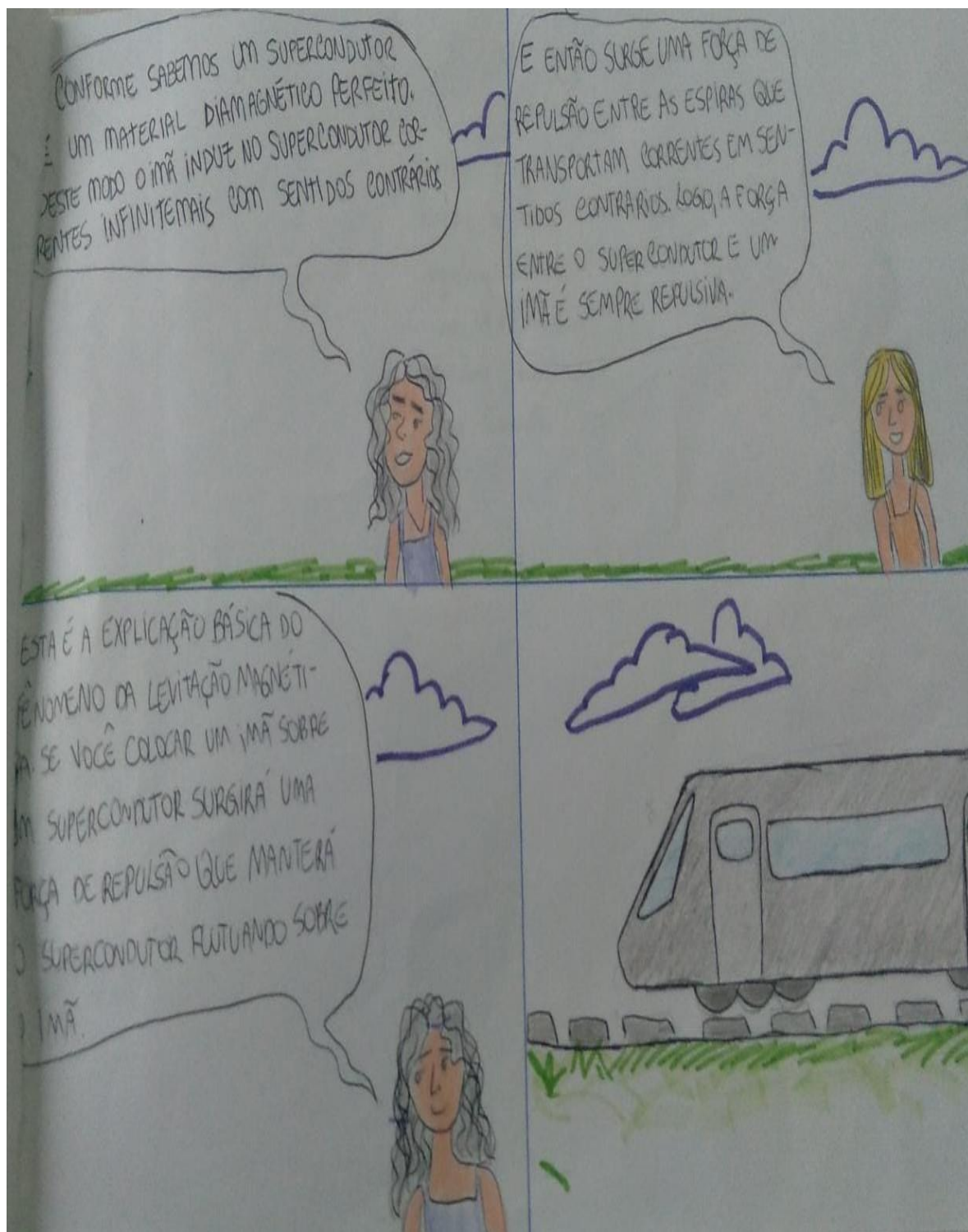


Um SQUID é um dispositivo que possui uma extraordinária sensibilidade para variações do fluxo magnético



É um dispositivo supercondutor que exibe a interferência quântica.





autores:

Arthur Bugs

Herica Beatriz

Jaqueline Siqueira

Luiza Winkelmann

Mariana Gregório

Renan Coineth

(N<sup>os</sup> 07, 14, 15, 21, 23 e 24)

## **APÊNDICE D – Produto Educacional**

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**MARIA ROSELI SALU DOS SANTOS HEPPNER**

**O ENSINO DA SUPERCONDUTIVIDADE NA EDUCAÇÃO BÁSICA**

**CAMPO MOURÃO  
2022**

**MARIA ROSELI SALU DOS SANTOS HEPPNER**

**O ENSINO DA SUPERCONDUTIVIDADE NA EDUCAÇÃO BÁSICA**

**The Teaching Of Superconductivity in Basic Education**

Produto Educacional apresentado ao Programa de Pós-graduação em Ensino de Física da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Orientador: Prof<sup>o</sup>: Dr. Cesar Vanderlei Deimling

**CAMPO MOURÃO**

**2022**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao (s) autor (es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



## RESUMO

O presente produto educacional foi gerado a partir de uma pesquisa de mestrado desenvolvida no Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, vinculado à Universidade Federal Tecnológica do Paraná, UTFPR – CM, na qual o tema de Supercondutividade foi abordado na educação básica, inserido no contexto da Física Moderna e Contemporânea (FMC) e caracterizado por apresentar funcionalidades que permitem amplas aplicações tecnológicas que, mesmo após um século de sua descoberta, continua sendo um campo de pesquisa de ponta. Esta proposta está fundamentada na Pedagogia Histórico-Crítica, e ao longo de seu desenvolvimento apresenta uma abordagem iniciada na realidade vivenciada do estudante, gerando ao final, uma aprendizagem consolidada e sistematizada no aluno. Ao longo deste trabalho foram desenvolvidas atividades teórico-práticas tais como, um questionário inicial – que serviu como ponto de partida para o desenvolvimento das atividades, um experimento demonstrando o fenômeno de levitação magnética, a produção de histórias em quadrinhos pelos alunos e um questionário final que serviu para avaliar a compreensão do conteúdo pelos estudantes. Esperamos que com o desenvolvimento deste projeto possamos contribuir com o aprendizado dos estudantes bem como disponibilizar aos professores uma alternativa atraente e viável para o ensino de supercondutividade na educação básica.

**Palavras-chave:** supercondutividade; resistência elétrica nula; levitação magnética; educação básica.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Interface do questionário inicial.....	17
Figura 2: Imagem de Kammerlingh Onnes (esquerda) e da medida da resistência em função da temperatura para a amostra de mercúrio (direita).....	21
Figura 3: (a) O comportamento de um supercondutor, revelando o efeito Meissner abaixo de $T_c$ , e em (b) de condutor perfeito que obedece à lei da indução de Faraday.....	23
Figura 4: Dependência do campo magnético em função da posição.....	25
Figura 5: Comportamento da magnetização $M$ em função do campo magnético aplicado em supercondutores (a) do tipo I e (b) do tipo II.....	26
Figura 6: Dependência dos campos críticos em função da temperatura para supercondutores do tipo I (a) e do tipo II (b) .....	27
Figura 7: Ilustração da rede de Abrokosov, e da dependência espacial do comprimento de coerência.....	28
Figura 8: Evolução do descobrimento dos materiais supercondutores.....	31
Figura 9: Íons positivos atraídos pelo elétron que passa pela rede cristalina do material supercondutor, fazendo interação elétron-fónon e finalmente formando par de Cooper.....	32
Figura 10: Representação de um sensor SQUID.....	33
Figura 11: Montagem para levitação de um pequeno ímã sobre um disco supercondutor de YBCO.....	35
Figura 12: Passos no experimento de levitação magnética.....	36

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 1: Laureados com o prêmio Nobel de Física por pesquisas realizadas no campo da supercondutividade.....</b>	<b>30</b>
--	-----------

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	6
2	OBJETIVOS.....	8
3	JUSTIFICATIVA .....	9
4	ENCAMINHAMENTO METODOLÓGICO.....	11
5	DESCRIÇÃO DO PRODUTO.....	15
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	37
	REFERÊNCIAS .....	38

## 1 INTRODUÇÃO

A Pedagogia Histórico-Crítica proposta por Saviani (2011) sugere uma prática pedagógica baseada na interação entre conteúdo e realidade visando a transformação da sociedade por meio da ação-compreensão-ação do educando e enfoca nos conteúdos como produção histórica social de todos os homens. Gasparin (2003) afirma, segundo a Pedagogia Histórico-crítica, que o uso das técnicas, das ferramentas convencionais de mediações em sala de aula auxiliam no processo ensino aprendizagem dos conteúdos escolares. Neste produto educacional apresenta uma proposta embasada no referencial teórico da Pedagogia histórico-crítica, e trazemos uma abordagem conceitual, qualitativa sobre a supercondutividade para o ensino médio.

Nesse sentido, recursos educacionais integrados às TDICs, como os Quizizz, o uso de ferramentas digitais, foram utilizados com o objetivo de facilitar e favorecer a aprendizagem dos conteúdos de Supercondutividade abordados ao longo da pesquisa, tornando a aula mais interativa, motivando os estudantes. O uso das TDICs proporciona a abordagem dos conteúdos de maneira mais dinâmica e interativa, como por exemplo, no uso vídeos que abordam a descoberta da Supercondutividade e seu contexto histórico que, de maneira comentada, podem facilitar a compreensão dos tópicos da Supercondutividade, dos materiais supercondutores, da teoria BCS, do efeito Meissner e da levitação Magnética. Com o objetivo de gerar o aprendizado mais consolidado e sistematizado sobre o tema da Supercondutividade, as atividades desenvolvidas ao longo do produto educacional compreenderam a elaboração de textos, como por exemplo, na escrita de história em quadrinhos pelos alunos sobre os conteúdos desenvolvidos.

Segundo Ostermann (2000), os conteúdos curriculares presentes geralmente se limitam a contemplar a Física Clássica, descrevendo os conceitos e as teorias elaboradas até o final do século XIX. Neste contexto é importante citar que as críticas se referem à predominância quase que exclusiva de temas clássicos e não à presença destes no currículo, pois eles fornecem suporte para a compreensão dos conteúdos mais elaborados e de diversos fenômenos cotidianos.

Dentre os trabalhos que abordam a introdução ao Moderna e Contemporânea (FMC) – do qual a Supercondutividade se enquadra -, Carvalho e Zanetic (2004) defendem que a aprendizagem desses conteúdos colabora para que os estudantes desenvolvam um entusiasmo maior e duradouro pela ciência, com o intento de que toda a Física faça parte da formação Cultural dos estudantes.

Entendemos que a inserção de temas da Física Moderna e Contemporânea (FMC) no se torna necessária para que os educandos compreendam a sua função do desenvolvimento científico e tecnológico, bem como da relação entre os diferentes campos do conhecimento, como o econômico, o conceitual, o cultural e o social. Analisando a escassez de trabalhos sobre o tema de Supercondutividade na educação básica e, tendo em vista que a discussão para a inserção do tema já vem ocorrendo desde a década de noventa, com os Parâmetros Curriculares Nacionais – PCN visamos com este trabalho contribuir com o ensino deste conteúdo. Nesse contexto, o produto educacional desenvolvido a partir desta pesquisa de mestrado tem como tema; a supercondutividade na educação básica é caracterizada por uma ação necessária para levar o aluno a compreender de uma forma contextualizada uma pequena parte do campo de conhecimento da Física Moderna Contemporânea. Através das aplicações tecnológicas relacionadas a este tema, e de atividades teórico-práticas, buscamos a compressão aprofundada e articulada com a realidade cotidiana do estudante. Elas compreendem um questionário (utilizado nos momentos inicial e final), vídeos sobre o fenômeno, experimento sobre a levitação magnética (de autoria própria), textos sobre o tema, exposição oral dialogada em diferentes momentos e a elaboração de uma história em quadrinho pelos estudantes (gibi) sobre o tema.

Na sequência apresentamos os objetivos que definem o desenvolvimento e o alcance desse estudo. No próximo tópico, a justificativa, trazemos um recorte sobre as discussões e apontamentos obtidos a partir de um levantamento bibliográfico em diferentes bases de conhecimento tendo em vista a escassez de trabalhos sobre o tema aplicados à educação básica, revelando dessa forma a motivação do desenvolvimento deste trabalho. Os encaminhamentos metodológicos são apresentados na sequência, trazendo detalhes sobre o contexto do desenvolvimento do produto educacional em sala de aula. A descrição teórica do produto educacional é apresentada na sequência.

## 2 OBJETIVOS

Propor aos alunos discussões, para um diagnóstico básico sobre a Supercondutividade, explorando o conhecimento prévio trazidos pelos estudantes, e a partir deste, iniciar a problematização do assunto desenvolvendo práticas que possibilitem ao estudante ampliar a capacidade de organizar e sistematizar os dados e resultados sobre o conteúdo de Supercondutividade.

Fornecer aos professores e profissionais da educação básica um material paradidático para o desenvolvimento dos conteúdos de supercondutividade através de aulas teórico-práticas, utilizando recursos tecnológicos que permitam contribuir com o ensino da supercondutividade, caracterizado por ser um tema da física que contribui para o desenvolvimento e compreensão do aluno nas aplicações dos avanços tecnológicos.

### 3 JUSTIFICATIVA

Embora o tema de Supercondutividade não esteja explicitamente descrito nos documentos regulatórios oficiais, trabalhos como o de Saviani (2020) reforçam que os conteúdos necessários para a formação do estudante não devem apenas atender às necessidades evocadas pelo mercado de trabalho, mas principalmente, devem preparar os estudantes com os conhecimentos científicos necessários para compreensão do desenvolvimento produzido, acumulado e sistematizado pela humanidade.

Com a finalidade de compreender como o tema dessa pesquisa tem sido desenvolvido em sala de aula, foi realizado um levantamento das produções científicas que tratam do tema no âmbito da educação básica. Neste sentido, foram pesquisadas: Revista Brasileira de Ensino de Física, Caderno Catarinense de Ensino de Física, Revista do Professor de Física, Banco de Dados e Teses e Dissertações da Capes. Nossos resultados apontaram um montante de 36 artigos científicos que tratam sobre o tema, sendo que destes, apenas 8 trabalhos trouxeram contribuições sobre o tema na educação básica, usando em seu desenvolvimento uma abordagem fundamentalmente qualitativa, revelando a partir disso, uma escassez de material para o desenvolvimento da temática.

A partir do desenvolvimento deste produto educacional foi possível que os estudantes ampliem seus conhecimentos acerca da Supercondutividade, permitindo que passaram a compreender a importância deste conteúdo para o desenvolvimento científico e tecnológico, bem como das suas aplicações, tais como, os SQUIDS (Superconducting Quantum Interference Device), computação quântica, transporte de eletricidade, ressonância magnética e a levitação magnética baseada no Efeito Meissner.

Tendo em vista a relevância do tema proposto e que os PCNs - Parâmetros Curriculares Nacionais (BRASIL, 1997) e as DCEs – Diretrizes Curriculares de Física (PARANÁ, 2008) não definem como obrigatório o ensino do conteúdo de supercondutividade, entende-se que este tema deva ser proposto de uma forma transversal, pois compõe a área de estudos da Física Moderna e Contemporânea (FMC) e abre possibilidades para o aprimoramento da compreensão de outras grandezas físicas, como a resistência elétrica, a corrente elétrica, a diferença de



potencial, o campo magnético, a força magnética, e a temperatura, usualmente trabalhadas no ensino médio.

Finalizando, não menos importante, justificamos o desenvolvimento deste trabalho, pois, ele permitirá a disponibilização de materiais paradidáticos para professores de Física sobre o ensino de supercondutividade no ensino médio, gerando uma alternativa didático-pedagógica que contribui para uma compreensão mais crítica e sistematizada pelos estudantes sobre o tema de supercondutividade e dos avanços tecnológicos envolvidos no desenvolvimento da ciência.

#### 4 ENCAMINHAMENTO METODOLÓGICO

O desenvolvimento desta pesquisa foi iniciado mediante um levantamento bibliográfico que contempla teses, dissertações e artigos científicos produzidos nos últimos dez anos, que trazem contribuições sobre o desenvolvimento do tema de Supercondutividade na educação básica, com o objetivo de atualizar e embasar as discussões sobre o desenvolvimento do tema em sala de aula.

De acordo com Ludke e André (2014), a etapa da revisão bibliográfica em pesquisas de abordagem qualitativa é uma parte fundamental no desenvolvimento de uma pesquisa, pois possibilita compor o referencial teórico necessário para a compreensão do fenômeno analisado. As bases de dados e as revistas científicas utilizadas para este levantamento foram: Revista Brasileira de Ensino de Física; Caderno Brasileiro de Ensino de Física; Caderno Catarinense de Ensino de Física; Revista do Professor de Física – UnB; Portal de Periódicos da Capes; Banco de Teses e Dissertações da Capes; e a Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações. Durante as buscas nessas bases de dados foram utilizados os seguintes termos: supercondutividade, ensino de supercondutividade, supercondutores; materiais supercondutores; levitação magnética; resistência nula e efeito Meissner.

Ao todo, foram encontrados 36 trabalhos que discutem os fenômenos relacionados à Supercondutividade, porém, na maioria dos casos, sem um vínculo com o ensino desenvolvido em sala de aula. Do total dos trabalhos encontrados, apenas 8 deles discutem propostas para desenvolvimento do conteúdo de Supercondutividade em sala de aula, o que evidencia a escassez de trabalhos que discutem essa temática e suas aplicações para a educação básica. Concordamos com Saviani (2020) quando afirma que os conteúdos necessários para a formação do estudante no ensino médio não devem envolver apenas as habilidades evocadas pelo mercado de trabalho, mas também e, principalmente, os conhecimentos científicos necessários para a compreensão do desenvolvimento tecnológico produzido pela sociedade.

Considerando este aspecto, passamos a identificar como o conteúdo de Supercondutividade tem sido trabalhado no ensino médio, ainda que nos dias de hoje, devido uma concepção instrumental de currículo, este e outros conteúdos igualmente importantes e necessários para a formação dos estudantes não estejam sendo - na maioria dos casos - abordados em sala de aula.

De posse das análises dos trabalhos, passamos a elaborar o produto educacional que consiste em uma proposta de ensino para o tema de supercondutividade na educação básica, embasada nos pressupostos da Pedagogia Histórico-Crítica (PHC) de Saviani (2011, 2020) que defende a ideia de que o ensino deve produzir o saber, fazendo com que aqueles que participam do processo consigam absorver os conteúdos e transformar o meio onde vivem em um local com igualdade de oportunidades. Colaborando com a teoria PHC (Pedagogia Histórico-Crítica) proposta por Saviani, Gasparin (2003) propõe em sua obra, uma didática favorável para aplicá-la na realidade da escola, e baseia-se em cinco passos que permitem a evolução do conhecimento, tendo como ponto de partida a prática social do estudante e como ponto final, o conhecimento mais aprofundado e sistematizado, relacionado com a teoria e a prática à realidade do estudante.

No primeiro passo, prática social inicial, implica em identificar o conhecimento que o aluno já sabe sobre o conteúdo (Gasparin, 2003, p.17). Neste cenário, os pré-requisitos que o professor deve identificar nos estudantes devem compor o ponto de partida da prática docente, e, são frequentemente baseados em uma percepção inicial do senso comum.

O segundo passo, a problematização, acontece quando fenômenos e situações-problemas são discutidos e relacionados com a prática social inicial. Neste momento acontecem os questionamentos por parte dos alunos, que serão direcionados pelo professor, que por sua vez iniciara uma reflexão muito maior, possibilitando entender os problemas e as dificuldades que os conteúdos científicos apresentaram.

De acordo com Gasparin (2003, p.17), no terceiro passo, a instrumentalização, acontece o contato mais aprofundado com o conhecimento teórico em suas diferentes dimensões, relacionando as afirmações baseadas nas experiências cotidianas com o conteúdo concreto e mais sistematizado.

O quarto passo, a catarse, determina qual nível de aprendizagem o estudante atingiu. Para tanto são utilizados com uma frequência de textos, exposições orais

onde o aluno irá fazer uma síntese demonstrando o seu grau de assimilação dos novos conteúdos.

A retomada da prática social final constitui o quinto passo, e este momento serve para consolidar a compreensão mais ampla e crítica da realidade. Ele está relacionado diretamente com a prática social inicial, modificado pela compreensão dos conteúdos teóricos, gerando um conhecimento mais amplo, aprofundado e sistematizado da nova realidade assimilada pelo estudante.

Tendo em vista os cinco passos para o desenvolvimento da PHC (Pedagogia Histórico-Crítica), apresentamos na sequência a estrutura dos encontros com os estudantes que serviu como norte para o desenvolvimento desta proposta.

No primeiro momento, foi utilizado um questionário inicial, o qual serviu como base para o levantamento dos conhecimentos prévios dos estudantes sobre o tema Supercondutividade. Na sequência, foi conduzida uma breve discussão sobre as respostas obtidas, com o intuito de nivelar e familiarizar os estudantes com o tema.

No segundo momento foram retomados os conceitos sobre o tema supercondutividade utilizando recursos como textos de apoio e vídeos, visando abordar conteúdo de forma contextualizada com as aplicações tecnológicas do fenômeno.

No terceiro momento foi realizada uma experiência de demonstração do fenômeno de levitação magnética a partir da qual foi gerado um vídeo, e em seguida, foi encaminhada uma discussão sobre o assunto e suas aplicações, visando, sobretudo, a participação ativa dos estudantes.

O quarto momento foi reservado para uma atividade teórico-prática na qual os estudantes criaram uma história em quadrinhos que foi apresentada pelos estudantes no quinto momento.

No quinto momento foi encaminhada a apresentação das histórias em quadrinhos sobre Supercondutividade, bem como, com o questionário final, que servirá como parâmetro para discussões das questões ou lacunas que possam ter se mantido até o momento.

Finalizando, cabe destacar que este trabalho foi desenvolvido em uma turma de terceiro ano do curso de formação de docente de um Colégio Estadual pertencente ao Núcleo Regional de Toledo Pr, do período vespertino, um total de 35 alunos. Para tanto, um termo de consentimento foi encaminhado aos participantes – que segue em anexo - em concordância com a direção e equipe pedagógica deste

colégio, para que, durante 10 aulas de Física de 50 minutos cada, as atividades contidas no produto educacional fossem desenvolvidas com os estudantes, bem como a realização da coleta de dados para a pesquisa.

## 5 DESCRIÇÃO DO PRODUTO

Este produto educacional foi desenvolvido com base em uma revisão bibliográfica de revistas científicas de teses e dissertações sobre o tema Supercondutividade do ensino básico, levantadas em diferentes bases de dados. O produto incorpora na etapa inicial um questionário sobre o tema Supercondutividade proposto a partir da plataforma *Quizizz*, para identificar o conhecimento prévio que os estudantes trazem sobre o assunto.

De posse dos dados obtidos a partir do questionário, foi desenvolvido o conteúdo sobre Supercondutividade, supercondutores, teoria do BCS, efeito Meissner, Levitação Magnética, diamagnetismo perfeito, Teoria BCS, pares de Cooper e as aplicações tecnológicas da Supercondutividade, por meio do desenvolvimento das atividades teóricas práticas, texto, experimento, vídeos, que relacionam os conceitos sobre o tema Supercondutividade. Para tanto, foi utilizado um texto de apoio que aborda os assuntos de Supercondutividade de maneira contextualizada com as aplicações deste fenômeno.

É importante notar que além do texto, foram utilizados vídeos para dinamizar e facilitar a compreensão dos fenômenos da Supercondutividade. Destacamos ainda que todas as atividades foram desenvolvidas em conformidade com as orientações previstas nos PCNs - Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio (BRASIL, 1997), nas DCNs de Física - Diretrizes Curriculares da Educação Básica do Paraná (PARANÁ, 2008), no PPP (Projeto Político Pedagógico), e na PPC (Proposta Pedagógica Curricular) do estabelecimento de ensino.

Para facilitar a organização das atividades descritas no do produto educacional, abaixo apresentamos o plano de unidade que detalha as atividades desenvolvidas em cada aula.

<b>PLANO DE UNIDADE</b>
<b>INSTITUIÇÃO:</b> COLÉGIO DA REDE PUBLICA DO NÚCLEO DE TOLEDO
<b>PROFESSORA:</b> MARIA ROSELI SALU DOS SANTOS HEPPNER
<b>DISCIPLINA:</b> FÍSICA
<b>PLANO DE UNIDADE:</b> O ENSINO DA SUPERCONDUTIVIDADE NA EDUCAÇÃO BÁSICA.
<b>ANO LETIVO:</b> 2021 <b>TRIMESTRE:</b> 3°

<b>SÉRIE:</b> 3º FORMAÇÃO DOCENTE	<b>DURAÇÃO:</b> 10h/a
-----------------------------------	-----------------------

<b>CONTEÚDO:</b> SUPERCONDUTIVIDADE
-------------------------------------

### **OBJETIVO GERAL**

- Propor aos alunos discussões, para um diagnóstico básico sobre a Supercondutividade, explorando o conhecimento prévio trazidos pelos estudantes, e a partir desta análise, iniciar a problematização do assunto desenvolvendo práticas que possibilitem ao estudante ampliar a capacidade de organizar e sistematizar os dados e resultados sobre o conteúdo de Supercondutividade.
- Elaborar uma proposta didático-pedagógica para o ensino da supercondutividade na disciplina de com objetivo de melhorar o processo de ensino-aprendizagem, explorando diferentes dimensões do conteúdo, tais como, histórica, conceitual, científica, econômica e social.
- Fornecer aos professores e profissionais da educação básica um material paradidático para o desenvolvimento dos conteúdos de supercondutividade através de aulas teórico-práticas, utilizando recursos tecnológicos que permitam contribuir com o ensino da supercondutividade, caracterizado por ser um tema da que contribui para o desenvolvimento e compreensão do aluno nas aplicações dos avanços tecnológicos.

### **PRÁTICA SOCIAL**

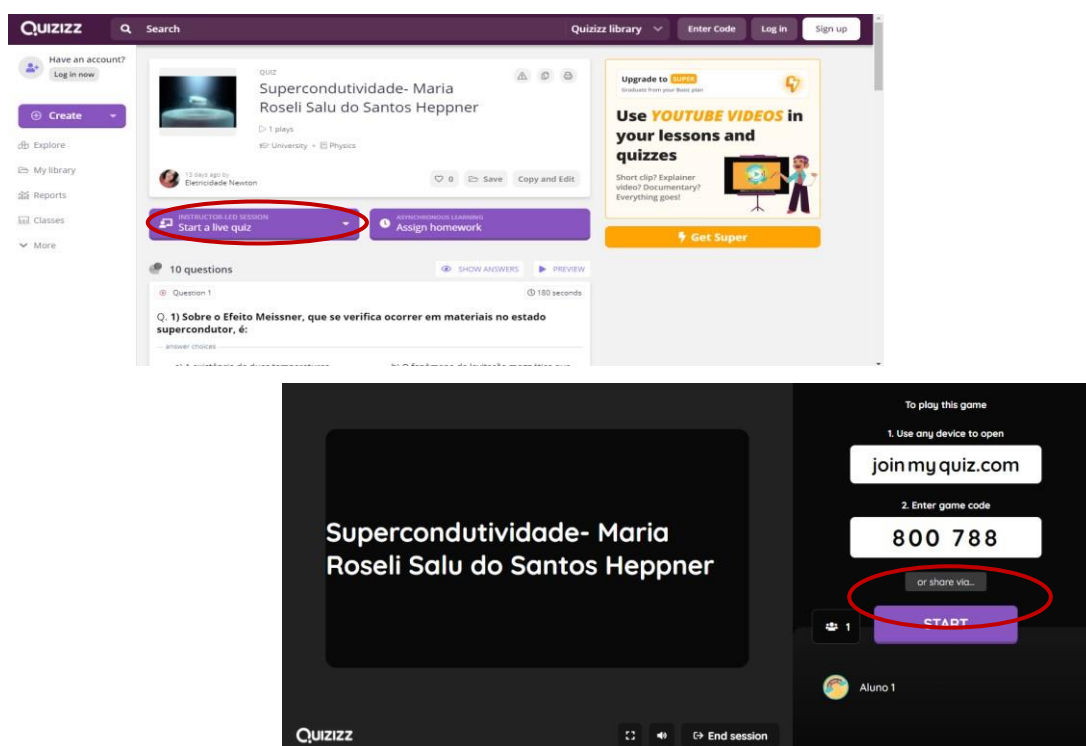
**PASSO 1: Questionário inicial**

**DURAÇÃO: 2h/a**

No primeiro passo, prática social inicial, implica em identificar o conhecimento que o aluno já sabe sobre o conteúdo (Gasparin, 2003, p.17). Neste cenário, os pré-requisitos que o professor deve identificar nos estudantes devem compor o ponto de partida da prática docente, e, são frequentemente baseados em uma percepção inicial do senso comum. Para tanto, foi utilizado um questionário, composto por perguntas que possibilitam identificar quais os conhecimentos trazidos pelos estudantes sobre supercondutividade. Este questionário foi disponibilizado em uma plataforma, *Quizziz*, conforme mostra a Figura 1.

Com base na Figura 1 podemos notar que a interface do aplicativo é bem intuitiva, que a montagem do cenário, da definição da unidade e das questões fornecidas aos estudantes podem ser compartilhadas pelo link, no exemplo [joinmyquiz.com](https://joinmyquiz.com), ou por um código digitado diretamente no site Quizziz. Abaixo apresentamos as perguntas que compõe o questionário inicial, que também pode ser acessado pelo link: <https://quizziz.com/admin/quiz/60eb83e0547e91001b6ac9a1>

Figura 1: Interface do questionário inicial.



Fonte: HEPPNER (2022)

**1). Quanto aos materiais supercondutores, é correto afirmar que:**

- a) apresentam resistência elétrica nula quando material estiver abaixo da temperatura crítica.
- b) permitem a entrada do campo magnético em seu interior a uma temperatura acima da temperatura crítica.
- c) apresentam o diamagnetismo perfeito caracterizado pela penetração do campo magnético abaixo da temperatura crítica.
- d) apresentam o diamagnetismo perfeito caracterizado pela expulsão do campo magnético abaixo da temperatura crítica.



**2). Os principais desafios técnicos científicos para a aplicação prática da supercondutividade consistem em:**

a) construir sistemas eficientes de grandes dimensões para manter as baixas temperaturas necessárias pelos supercondutores.

b) obter supercondutores que apresentem temperatura crítica mais próxima da temperatura ambiente.

c) compreender as medidas das propriedades físicas dessa classe de materiais.

d) vencer o desinteresse dos cientistas e pesquisadores, uma vez que a supercondutividade é um fenômeno difícil e raro de acontecer.

**3). Descreva qual o maior objetivo entre os cientistas que pesquisam a supercondutividade?**

**4). Qual a diferença entre os supercondutores do tipo I e do tipo II?**

**5). Onde é aplicada a supercondutividade na sociedade moderna?**

a) nas transmissões de energia.

b) na eletrônica, no uso de lâmpadas mais econômicas.

c) em aparelhos que requerem intensos campos magnéticos.

d) Transporte coletivo os trens de alta velocidade.

**6). Quem descobriu a supercondutividade e quando isso ocorreu?**

a) Heike Kamerlingh Onnes em 1911.

b) Heike Kamerlingh Onnes em 1908.

c) John Bardeen em 1911.

d) John Robert Schrieffer em 1913

**7). Cite quais os principais pesquisadores que contribuíram para a compreensão da supercondutividade?**

**8) Supercondutor é: um material que pode conduzir eletricidade ou transportar elétrons de um átomo para outro sem resistência elétrica. Isso**

**significa que nenhum calor, som ou qualquer outra forma de energia seria liberada do material abaixo da temperatura crítica.**

Verdadeiro

Falso

**9). Sobre o efeito Meissner e o campo magnético aplicado em materiais no estado supercondutor, é correto afirmar que:**

- a) relaciona a existência de duas temperaturas críticas.
- b) o fenômeno da levitação magnética pode ocorrer concomitantemente ao efeito Meissner.
- c) a ação de campos magnéticos externos gera a degradação do estado supercondutor.
- d) consiste na expulsão completa de campos magnéticos do interior do material supercondutor.

**10). Sobre o estado misto, podemos afirmar que?**

- a) ocorre apenas em supercondutores do tipo II.
- b) define uma região no diagrama de fases na qual é permitida a instalação de campo magnético no interior do supercondutor.
- c) consiste em uma região onde ocorre dissipação de energia.
- d) ocorre apenas nos supercondutores do tipo I.

**11) sobre a transição para o estado normal, é correto afirmar que?**

- a) de acordo com a teoria BCS, ocorre quando o supercondutor for submetido a qualquer fonte de energia aplicada ao supercondutor for capaz de destruir os pares de Cooper.
- b) costumeiramente ocorre em temperaturas maiores para as supercondutores do tipo I.
- c) ocorre quando o supercondutor for completamente penetrado por campo magnético.
- d) ocorre quando a resistência elétrica deixa de ser nula.

**PROBLEMATIZAÇÃO****PASSO 2: Textos de apoio e vídeos****DURAÇÃO: 2h/a**

O segundo passo, a problematização, acontece quando fenômenos e situações-problemas são discutidos e relacionados com a prática social inicial. É neste momento que acontecem os questionamentos por parte dos alunos, retomando os conceitos sobre o tema supercondutividade por meio de vídeos e textos de apoio, com abordagem contextualizada em aplicações tecnológicas da supercondutividade.

Os vídeos usados para a introdução do tema de supercondutividade (vídeo 1 – *“Na era dos Supercondutores”*<sup>1</sup>; vídeo 2 – *“Supercondutor - Trens do Futuro”*<sup>2</sup>) serviram para iniciar as discussões sobre o fenômeno e algumas das aplicações tecnológicas possíveis.

Já o texto, que segue abaixo, é de autoria própria e foi disponibilizado aos alunos com o propósito de complementar alguns aspectos teóricos sobre o comportamento dos supercondutores, descrevendo com mais detalhes o efeito Meissner, os conceitos iniciais sobre a teoria BCS, articulando o comportamento das grandezas físicas em diferentes materiais, tais como, isolantes, condutores e semicondutores.

Neste contexto, optamos por explorar o fenômeno da levitação magnética vinculado com a supercondutividade, de modo a compreender como um campo magnético externo pode interagir com o supercondutor gerando uma repulsão estável. Entenderemos também como o fenômeno da levitação magnética pode ser aplicado como ferramenta com potencial de aprimorar o transporte em larga escala.

Outra opção explorada no texto visa avaliar o transporte de corrente elétrica entre um condutor convencional e um supercondutor. Com o desenvolvimento da medicina, tornou-se cada vez mais comum o uso de exames baseados em técnicas de imagens sofisticadas, como a ressonância magnética. Nesta técnica, altos campos magnéticos são empregados, obtidos através de grandes eletroímãs que necessitam transportar altas correntes elétricas.

---

<sup>1</sup> Disponível em: <https://youtu.be/609Xyza5zi4> (acesso em 15/10/2021)

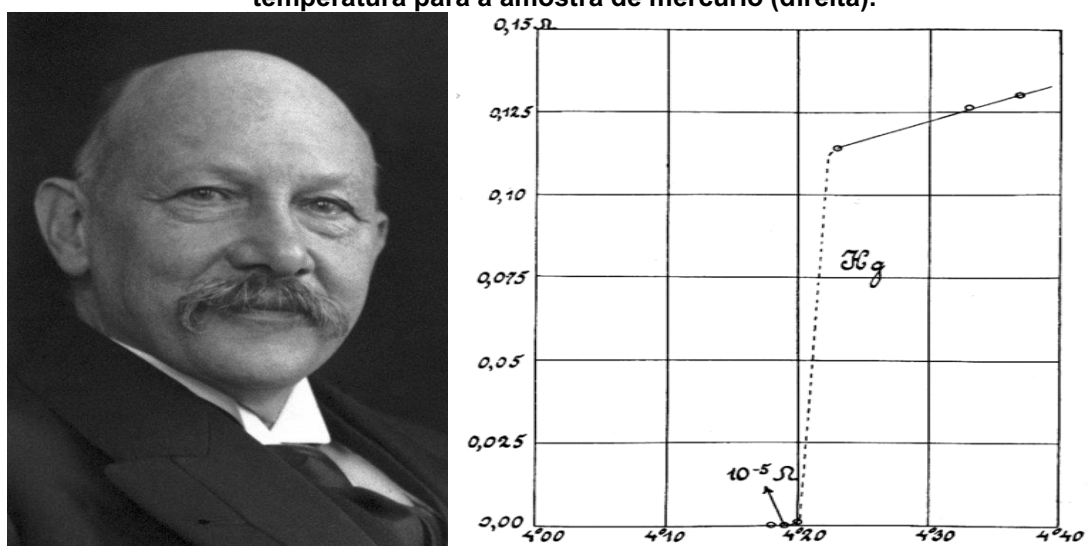
<sup>2</sup> Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=BHW1YdGY-00> (acesso em 15/10/2021)

Ao longo do texto abaixo, e dos vídeos que seguem, entenderemos melhor como o campo magnético é gerado e mantido nessas máquinas, sem a necessidade da conexão com uma fonte de alimentação ligada 24 horas por dia.

## A SUPERCONDUTIVIDADE

A supercondutividade define um fenômeno descoberto pelo físico alemão Heike Kamerling Onnes em 08 de abril de 1911, em Leiden, que realizou medidas de resistência elétrica em uma amostra de mercúrio em função da temperatura. Onnes estava pesquisando as propriedades elétricas de diferentes metais em temperaturas extremamente baixas, e para realizar este feito, usava um banho térmico de hélio líquido. A descoberta da Supercondutividade aconteceu quando foi verificado que a resistência elétrica do mercúrio caía inesperadamente a zero em 4,2 K. Com essa descoberta, uma nova classe de materiais condutores foi desenvolvida, os materiais supercondutores, gerando um campo de estudo de um dos fenômenos físicos mais fascinantes do século XX. Cabe destacar que Heike Kamerlingh Onnes foi um físico nascido me Groningen, na Holanda, ganhador do prêmio Nobel de em 1913 pelos seus trabalhos realizados sobre propriedade da matéria a baixa temperatura, que levaram a liquefazer o hélio em 1908 pela primeira vez e, portanto, famoso por seus trabalhos em criogenia e supercondutividade.

**Figura 2: Imagem de Kammerlingh Onnes (esquerda) e da medida da resistência em função da temperatura para a amostra de mercúrio (direita).**



Fonte: (Esquerda) MLA style (2022), (Direita) MAROUCHKINE, 2004, p.310

Analisando a Figura 2 (direita), podemos notar a transição entre as fases normal e supercondutora para a amostra de mercúrio, realizada originalmente por Onnes. Nela podemos observar um comportamento linear entre a resistência e a temperatura acima de  $T_c$  – comportamento tipicamente esperado para os metais –, seguido de uma transição abrupta para um valor muito pequeno, não mensurável da resistência elétrica abaixo de  $T_c$ . Estudos complementares demonstraram que a resistência elétrica no estado supercondutor é nula. Cabe destacar que para aferir a temperatura crítica nesta técnica de medida, a corrente elétrica usada na medida não pode ser grande, pois neste caso, ela pode antecipar a transição de fase tendo em vista a energia transferida para a amostra neste processo.

No entanto, quase 20 anos depois, em 1933, Walther Meissner e Robert Ochsenfeld verificaram que além dos supercondutores apresentarem resistência elétrica nula, também eram capazes de promover a expulsão total do campo magnético do seu interior, ou seja, o diamagnetismo perfeito, caracterizando dessa forma o efeito Meissner. Sendo assim, para que um material seja caracterizado como supercondutor, é necessário a apresentação de duas propriedades físicas simultâneas: a resistência elétrica nula e o efeito Meissner abaixo de  $T_c$ .

Neste cenário, o fenômeno da supercondutividade causou grande empolgação no meio científico, devido às muitas possibilidades de suas aplicações, seja no campo do transporte de corrente elétrica, geração de altos campos magnéticos, sensores magnéticos, ou ainda no campo da levitação magnética.

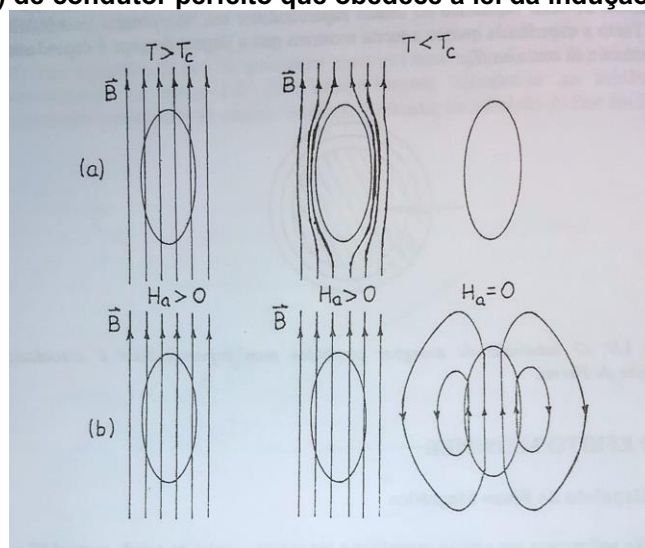
Visando diferenciar o comportamento entre um condutor perfeito, que exhibe apenas resistência elétrica nula, e um supercondutor, que além deste efeito exhibe também o diamagnetismo perfeito, apresentamos na Figura 3, que demonstra o comportamento do campo magnético durante o resfriamento da amostra, chamado de resfriamento na presença de um campo magnético (*Field Cooling – FC*).

Neste procedimento uma amostra supercondutora, inicialmente no estado normal, é resfriada na presença de um campo magnético até atingir uma temperatura inferior à temperatura crítica,  $T_c$ . Verifica-se que em  $T_c$ , o campo magnético é expulso abruptamente do interior do supercondutor, caracterizando o fenômeno efeito Meissner (Figura 3a). No entanto, o mesmo não ocorre com o condutor perfeito, que permanece com o campo magnético penetrado no seu interior em temperaturas baixas (Figura 3b), uma vez que para gerar correntes de blindagem nesses materiais, é necessária uma variação temporal do fluxo

magnético, descrito pela Lei de Faraday. Nos supercondutores o campo magnético é expulso do seu interior em função do aparecimento de supercorrentes superficiais que geram um campo oposto ao aplicado, cancelando a indução magnética  $B$  no seu interior. Por fim, quando o campo externo é removido em temperaturas menores que  $T_c$ , no condutor perfeito a indução magnética aprisiona o campo magnético no seu interior ( $B \neq 0$ ), enquanto no supercondutor o efeito Meissner continua a expulsar o campo magnético do seu interior ( $B = 0$ ).

Visando diferenciar o comportamento entre um condutor perfeito (com resistência nula) e um supercondutor, apresentamos na Figura 3, um procedimento chamado de resfriamento na presença de um campo magnético (*Field Cooling – FC*). Se aplicarmos um campo magnético fraco a um sistema supercondutor quando esse se encontra no estado normal ( $T > T_c$ ) e realizarmos o procedimento *FC*, observaremos uma expulsão abrupta do campo magnético quando o estado supercondutor for obtido, em temperaturas menores ou iguais a  $T_c$ , caracterizando o fenômeno efeito Meissner, conforme Figura 3a.

**Figura 3: (a) O comportamento de um supercondutor, revelando o efeito Meissner abaixo de  $T_c$ , e em (b) de condutor perfeito que obedece à lei da indução de Faraday.**



Fonte: Pureur, 2004, p. 10.

O procedimento *FC* (onde resfria-se a amostra na presença de um campo magnético) com o qual verifica-se que o fluxo é excluído do interior do material. É por este procedimento que se demonstra que um SC não é um condutor perfeito e, sim, um diamagneto perfeito (OSTERMANN; PUREUR, 2005).

Porém o mesmo não ocorre com o condutor perfeito ( $R = 0$ ), que permanece com o campo magnético penetrado no seu interior em temperaturas baixas, conforme mostra a Figura 3 (b). Esta propriedade mostra que, se a transição de fase ocorrer na presença de um campo magnético, serão induzidas supercorrentes superficiais nas amostras supercondutoras que cancelam a indução magnética  $B$  no seu interior, caracterizando o efeito Meissner. Por fim, ainda na Figura 3b, quando o campo externo é anulado, em função da indução magnética e em conformidade com a Lei de Faraday, surge no condutor perfeito um campo oposto à variação de fluxo magnético, revelando ao final, uma amostra com campo aprisionado no seu interior.

A lei da indução eletromagnética, frequentemente referida como lei de Faraday é de suma importância para o desenvolvimento do eletromagnetismo, uma vez que revela a existência de uma relação direta entre fenômenos elétricos e magnéticos, que foram tratados como fenômenos distintos por muitos anos.

De acordo com Hessel *et. al.* (2015) a lei de Faraday enuncia que quando houver variação do fluxo magnético através de um circuito, surgirá nele uma força eletromotriz induzida. Nota-se que o surgimento de correntes elétricas depende da mudança temporal de fluxo magnético. Segundo a Lei de Faraday, a variação temporal de fluxo magnético é equivalente ao negativo do potencial elétrico medido em volts (V), chamado de força eletromotriz induzida ( $\mathcal{E}$ ), conforme se observa na equação 1:

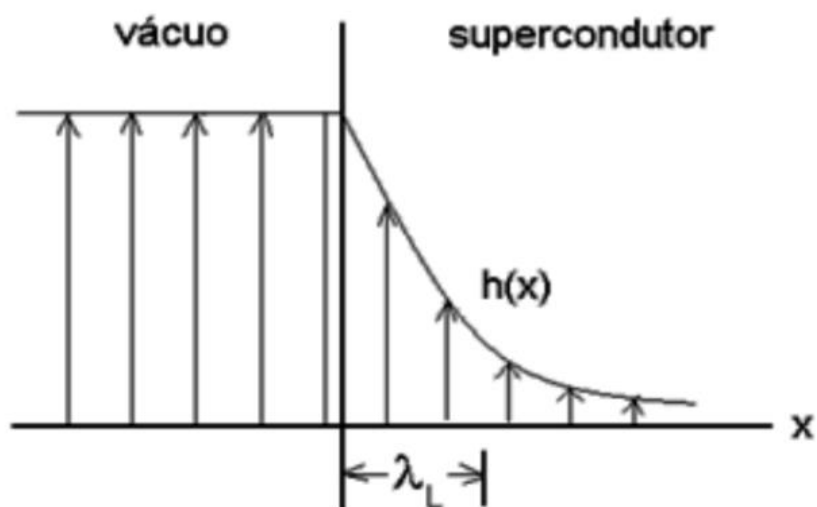
$$\mathcal{E} = - \frac{\Delta\phi}{\Delta t} \quad (1)$$

Onde se tem:  $\mathcal{E}$  - força eletromotriz induzida (V - volts),  $\Delta\Phi = \Phi_F - \Phi_i$  - variação do fluxo magnético (Wb) e  $\Delta t$  - intervalo de tempo (s).

Cabe destacar que o campo magnético não decai abruptamente na interface do supercondutor. Esta região é percorrida por supercorrentes superficiais que blindam a amostra, e circulam o material em uma espessura que possui uma escala característica denominada profundidade de penetração de London,  $\lambda$ . Esta quantidade é uma das grandezas características do estado supercondutor, que depende de cada material, mas em geral sua ordem de grandeza é de 100 nm. A Figura 4 ilustra a dependência do campo magnético em função com a posição na interface do supercondutor.

O efeito Meissner é observado em todos os supercondutores desde que o campo aplicado não seja demasiadamente alto. Porém, com a evolução dos estudos e a descobertas de novos materiais supercondutores, diferentes comportamentos em relação ao campo magnético foram verificados, levando à classificação dos supercondutores em duas classes: os supercondutores do tipo I e do tipo II.

Figura 4: Dependência do campo magnético em função da posição.

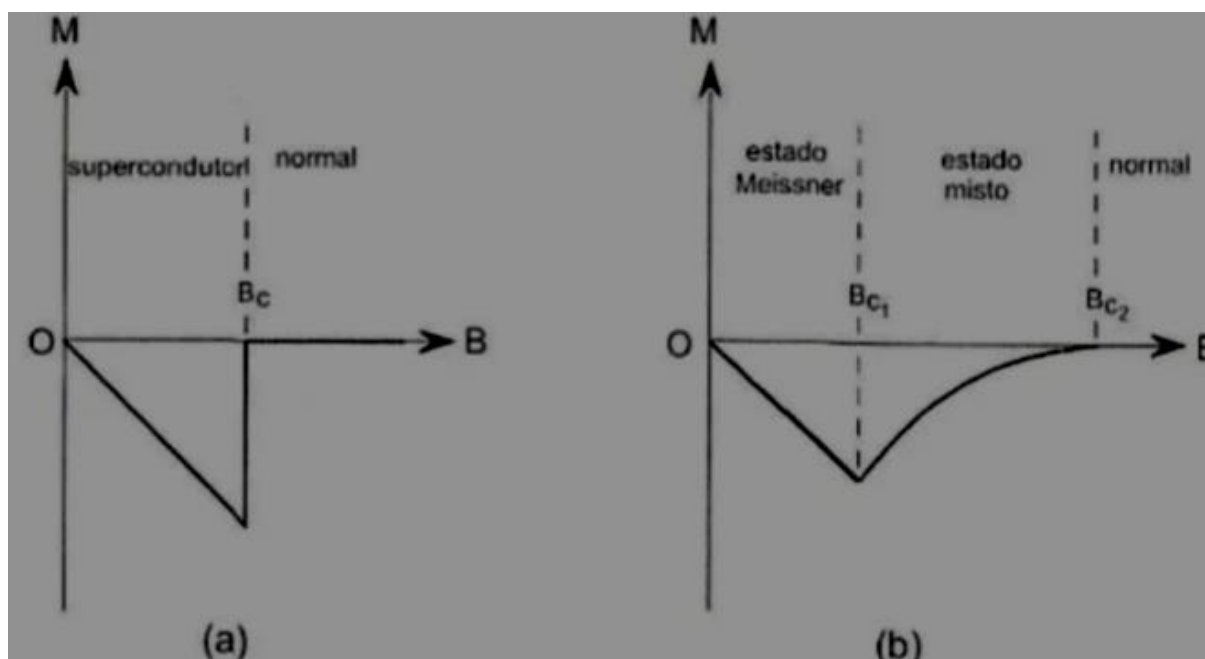


Fonte: Pureur, 2012, p. 5

Os supercondutores do tipo I apresentam apenas os estados Meissner e normal. Se o campo aplicado for inferior ao valor crítico não ocorre nenhuma penetração de campo magnético no seu interior, como mostrado na Figura 5a. Já os supercondutores do Tipo II apresentam dois campos críticos (Figura 5b). Para campos magnéticos menores que  $H_{c1}$  – o campo crítico inferior – ocorre a exclusão total do fluxo magnético por meio do estado Meissner. Aumentando o campo magnético, o fluxo magnético penetra parcialmente na amostra, preservando a resistência nula até o campo crítico superior  $H_{c2}$  seja atingido, cujo valor pode ser as vezes muito maior que  $H_{c1}$  (Figura 5b). A região do diagrama de fases entre o valor de  $H_{c1}$  e  $H_{c2}$  é denominada de estado misto ou estado de vórtices, em função da penetração quantizada de fluxo magnético no interior da amostra.



Figura 5: Comportamento da magnetização  $M$  em função do campo magnético aplicado em supercondutores (a) do tipo I e (b) do tipo II.



Fonte: MENEGOTTO (2012, s.p)

Para entender melhor as interações entre o campo magnético nas amostras supercondutoras, segue abaixo a representação fundamental entre a magnetização e os campos magnéticos, segundo a equação 2:

$$B = \mu_0(H + M) \quad (2)$$

Onde,  $H$  é o campo magnético aplicado, medido em A/m no sistema internacional de unidades, SI,  $M$  é a magnetização, definida pela resposta magnética da amostra, medida em A/m, e  $B$  é a indução magnética, proporcional ao campo aplicado somada à magnetização, medida em tesla, T.

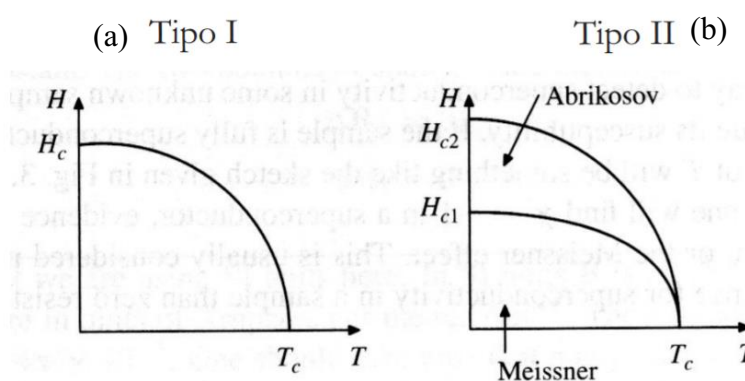
Em um supercondutor no estado Meissner,  $B = 0$ , a relação entre o campo aplicado e a magnetização é linear e pode ser descrita como mostra a equação 3:

$$H = -M \quad (3)$$

Cabe destacar que os supercondutores do tipo II apresentam maior utilidade tecnológica em relação aos supercondutores do tipo I, pois apresentam maiores valores de  $H_{c2}$ , possibilitando o transporte de densidade de corrente elétrica mais elevada.

É interessante ressaltar que  $H_c$ ,  $H_{c1}$  e  $H_{c2}$  são dependentes da temperatura e da corrente transportada ao longo do supercondutor. Considerando o regime supercondutor, quanto maior a temperatura, ou seja, mais próxima de  $T_c$ , menores serão os valores dos campos e das correntes críticas, como mostrado na Figura 6.

**Figura 6: Dependência dos campos críticos em função da temperatura para supercondutores do tipo I (a) e do tipo II (b).**



Fonte: Pureur, 2004, p.4.

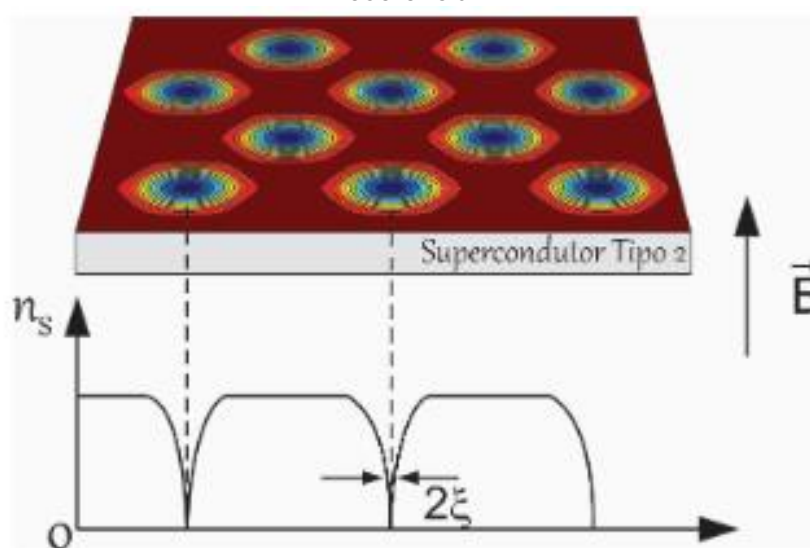
Analisando o diagrama de fases representado na Figura 6(b) podemos observar de outra maneira a transição para o estado normal. Nos supercondutores do tipo II, o estado supercondutor é formado por duas regiões diferentes; abaixo de  $H_{c1}$ , o estado Meissner, entre  $H_{c1}$  e  $H_{c2}$ , o estado Misto. Acima da linha  $H_{c2}$  as propriedades supercondutoras deixam de existir, e o material passa para o estado normal.

No estado misto o campo magnético penetra de forma quantizada no supercondutor, por meio de vórtices, que tendem a se organizar na forma hexagonal centrada, conhecida como a rede de Abrikosov. Os vórtices são formados por um núcleo, com campo magnético e que atinge o estado normal no seu centro, circulado por supercorrentes, que tendem a confinar esse fluxo magnético.

Cabe destacar que os vórtices atravessam a amostra de um lado ao outro, de maneira análoga a um cilindro fino, blindado por supercorrentes que possui dimensões espaciais típicas descritas por uma escala característica,  $\xi$ , denominada comprimento de coerência, conforme mostrado na Figura 7. É interessante ressaltar que a dimensão espacial dessa rede de vórtices muda conforme o campo magnético no qual a amostra está submetida.

Dessa forma, considerando que a amostra esteja no estado misto, quanto mais próxima a condição de campo magnético e de temperatura da linha  $H_{c2}$ , mais próximo um vórtice estará do outro no interior do supercondutor, de modo que ao cruzar a linha  $H_{c2}$  do diagrama de fases, a amostra estará completamente preenchida por vórtices de tal forma que não restará qualquer porção supercondutora no seu interior, ou seja, a amostra terá passado para o estado normal.

**Figura 7: Ilustração da rede de Abrikosov, e da dependência espacial do comprimento de coerência.**



Fonte: RODRIGUES, 2013, p. 20.

É interessante destacar que mediante a razão da profundidade de penetração de London,  $\lambda$ , e o comprimento de coerência,  $\xi$ , é possível definir a constante de Ginzburg-Landau,  $\kappa$ , que pode ser usado para classificar os supercondutores do tipo I e II conforme a equação 4.

$$\kappa = \frac{\lambda}{\xi} \quad (4)$$

Quando for menor que  $1/\sqrt{2}$ , o supercondutor será do tipo I e caso  $\kappa$  for maior que  $1/\sqrt{2}$ , o supercondutor será do Tipo II.

## MATERIAIS SUPERCONDUTORES E SUAS APLICAÇÕES

Dentre as contribuições associadas ao fenômeno da supercondutividade, a geração de altos campos magnéticos se destaca em função desses materiais conduzirem alta densidade de corrente elétrica, quando submetidos a uma temperatura abaixo da temperatura crítica,  $T_c$ .

Para comparar a capacidade de transporte de corrente de um supercondutor à um condutor convencional de cobre ou alumínio, buscamos alguns dados baseados na Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 5410 que determina, dentre outras aplicações, a capacidade máxima de transporte de corrente de fios e cabos elétricos em função da sua aplicação e bitola. Essa norma descreve que condutores de cobre e de alumínio podem transportar respectivamente de 618 a 1125 A/cm<sup>2</sup> e de 495 a 878 A/cm<sup>2</sup>, considerando diferentes aplicações de fios e cabos elétricos, tais como: submersos, aéreos e com diferentes tipos de isolamento. Já para o caso de supercondutores, diferentes métodos empregados na fabricação e no processo de medida desses materiais, o podem render diferentes valores na densidade de corrente elétrica. Em um experimento usando amostras de YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> com granulometria variada de 3 a 53 μm, foi verificada uma densidade de corrente crítica de 2x10<sup>6</sup> A/cm<sup>2</sup>(Poole, 2007, p.17). Comparando esses valores aos do cobre, podemos concluir que, um fio supercondutor de YBCO seria capaz de transportar uma corrente elétrica mais de 1000 vezes maior que um fio de cobre com a mesma bitola.

Neste sentido, os altos campos que podem ser gerados pelos supercondutores possibilitaram o desenvolvimento de máquinas compactas, como as de ressonância magnética, aprimorando ainda mais os diagnósticos por imagens na medicina e nos estudos das propriedades magnéticas dos materiais.

Desde a descoberta do primeiro elemento supercondutor em 1911, muitos outros materiais foram descobertos, bem como, muitas teorias foram criadas com o intuito de explicar o fenômeno da supercondutividade. Abaixo apresentamos a Tabela 1 que apresenta os principais marcos no desenvolvimento teórico da supercondutividade.

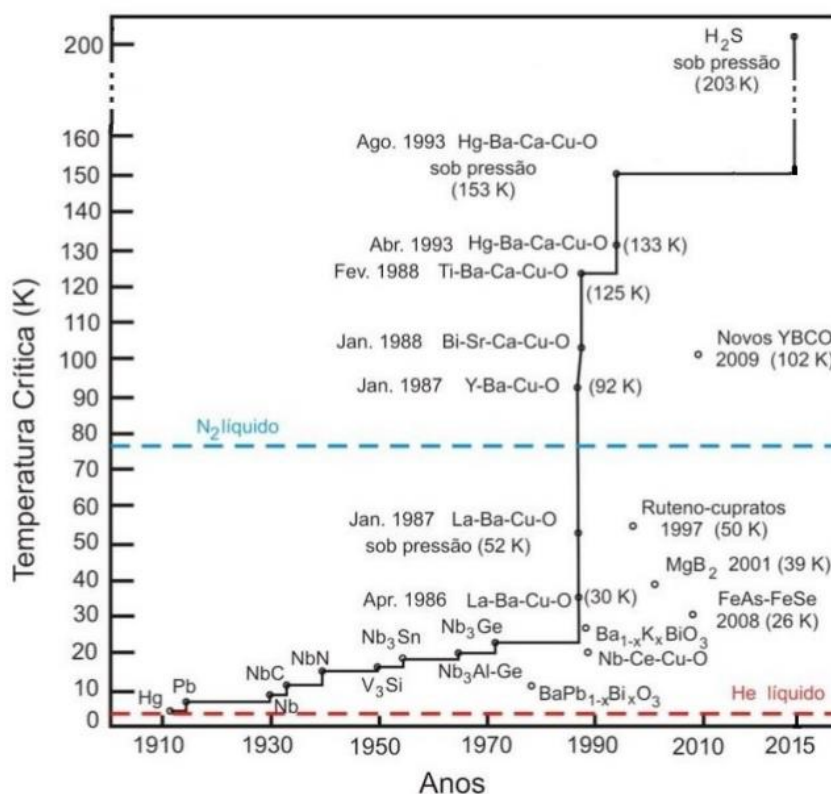
**Quadro 1 - Laureados com o prêmio Nobel de Física por pesquisas realizadas no campo da supercondutividade**

Ano	Premiados	Colaboração
1911	Heike K. Onnes	Abordagem sobre a propriedade da matéria em baixas temperaturas e a descoberta da supercondutividade.
1933	Walther Meissner Robert Ochsenfeld	Verificação do diamagnetismo perfeito abaixo de $T_c$ (efeito Meissner).
1935	Fritz e Heinz London	Primeira descrição teórica para a condutividade e o diamagnetismo perfeito.
1950	Vitaly Ginzburg Lev Landau	Teoria fenomenológica da supercondutividade, baseada em uma transição de fase de segunda ordem.
1957	John Bardeen Leon N. Cooper Robert Schrieffer	Teoria microscópica da supercondutividade denominada BCS, baseada na formação dos Pares de Cooper.
1962	Brian D. Josephson	Teoria do tunelamento dos Pares de Cooper (efeito Josephson).
1986	Karl Alex Muller J. Georg Bednorz	Descoberta da supercondutividade de alta temperatura crítica num cuprato de lantânio de bário.
2003	Vitaly Ginzburg Anthony J. Leggett Alexei A. Abrikosov	Prêmios Nobel da Física pelo desenvolvimento da teoria fenomenológica dos supercondutores do tipo II e da superfluidez.

**Fonte: Modificado de Costa e Pavão (2012, p. 2602-10).**

Em paralelo com o desenvolvimento das teorias aplicadas ao fenômeno da supercondutividade, as pesquisas experimentais demonstravam que este fenômeno era verificado em diferentes materiais, e em temperaturas que se superavam com o decorrer do tempo, como mostrado na Figura 8. Neste sentido, a evolução cronológica da temperatura crítica dos materiais supercondutores apresentou um marco importante para a descoberta de muitos compostos Nb entre as décadas de 30 e 70, como o difundido  $Nb_3Sn$ , que viabilizou o desenvolvimento de aplicações tecnológicas úteis. Outro marco importante foi obtido em 1986, com a descoberta do  $Ba_xLa_{5-x}Cu_5O_{5(3-\gamma)}$  (LBCO) por Johannes Georg Bednorz e Karl Alexander Müller, o primeiro da classe dos cupratos cerâmicos que superaram a temperatura de liquefação do nitrogênio, 77 K, difundindo ainda mais esse campo de estudo em função da sua abundância e viabilidade econômica.

Figura 8: Evolução do descobrimento dos materiais supercondutores.



Fonte: LEPICH, 2017, p.32

Cabe destacar que na maioria dos casos, os materiais supercondutores não apresentam boas propriedades condutoras no estado normal, como é o caso dos óxidos cerâmicos,  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  ( $T_c = 92 \text{ K}$ ) e  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+\delta}$  ( $T_c = 108 \text{ K}$ ), ou apenas apresentam a supercondutividade próximas da temperatura ambiente quando submetidos à altíssimas pressões, da ordem de centenas de GPa, como é o caso dos hidretos  $\text{YH}_6$ ,  $\text{LaH}_{10}$  e  $\text{H}_2\text{S}$ .

## A TEORIA BCS

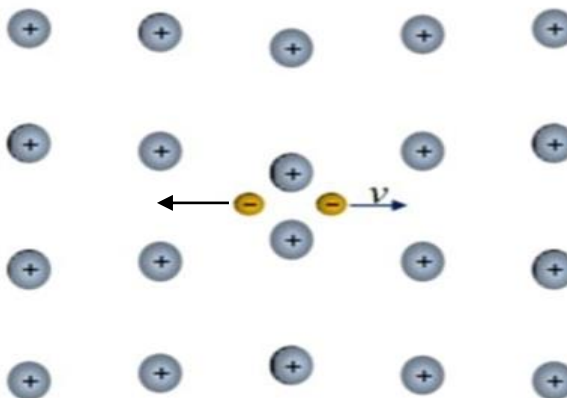
A teoria do BCS, que leva o nome de seus desenvolvedores, John Bardeen, Leon Cooper, e John Robert Schrieffer, é a única teoria que traz uma explicação microscópica do fenômeno da supercondutividade. Nessa teoria o processo de condução de cargas elétricas ocorre por meio do acoplamento de elétrons formando pares, com spins opostos, que são chamados de pares de Cooper. Esse acoplamento é mediado por meio de fônons, ou seja, vibrações da rede de átomos que forma o supercondutor. O Estado supercondutor, portanto, é

descrito por um condensado de pares de Cooper distribuídos homoganeamente ao longo de sua extensão.

Não é comum que dois elétrons se acoplem formando um par de elétron, pois a repulsão Coulombiana gera uma força repulsiva entre cargas de mesmo sinal. No entanto, quando a energia associada à repulsão Coulombiana entre dois elétrons se torna menor que a energia associada aos fônons - vibração da rede cristalina de átomos ( $\hbar\omega$ ) – este acoplamento se torna viável, pois, reduz a energia do sistema, possibilitando que todos os pares de Cooper se condensem para o mesmo nível de energia.

Para entendermos melhor o mecanismo de acoplamento de elétrons por meio de fônons, podemos analisar a Figura 9. Nela um elétron se movendo no supercondutor causa uma deformação na rede de átomos. Essa deformação causa um aumento na densidade cargas positivas locais em função da aproximação dos núcleos dos átomos da rede cristalina que favorece o acoplamento do segundo elétron que compõe o par de Cooper.

**Figura 9 - Íons positivos atraídos pelo elétron que passa pela rede cristalina do material supercondutor, fazendo interação elétron-fóton e finalmente formando par de Cooper.**



Fonte: Adaptado de Miranda (2013, p. 32)

Conforme a teoria BCS, as propriedades do estado supercondutor são definidas por uma função de onda, cujo módulo elevado é proporcional à densidade de Pares de Cooper no interior do supercondutor. Essa teoria foi desenvolvida em 1957 e explica o estado supercondutor da amostra, que está separado do estado normal por um Gap de energia. Neste cenário, qualquer forma de energia pode ser utilizada para destruir o estado supercondutor, desde que seja maior que o Gap

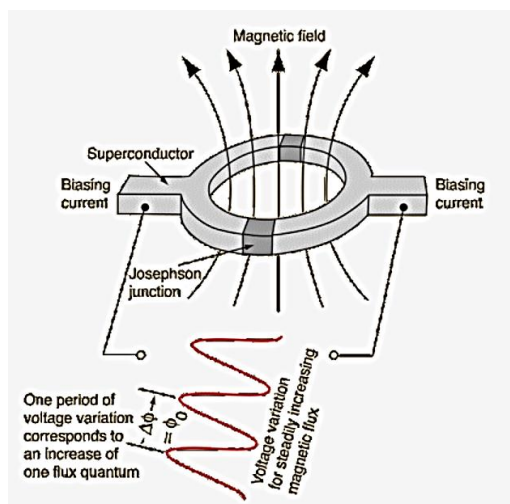
supercondutor. Seus autores receberam um Prêmio Nobel pelo trabalho realizado em 1972.

## O EFEITO JOSEPHSON

Uma junção Josephson pode ser construída em um supercondutor a partir de uma constrição, uma região na qual o supercondutor apresenta um ponto de fragilidade, ou de uma junção entre as superfícies supercondutora/normal/supercondutora. A partir de uma junção Josephson podemos construir um dispositivo chamado sensor SQUID, *Superconducting Quantum Interference Device*, que permite a determinação de fluxo magnético com extrema sensibilidade, capaz de detectar campos magnéticos da ordem de  $10^{-15}$  T. A título de comparação, o campo magnético da terra é da ordem de  $10^{-6}$  T enquanto o campo do cérebro é da ordem de  $10^{-13}$  T.

Um sensor SQUID pode ser criado a partir de um anel supercondutor que contenha no mínimo uma junção Josephson em seu perímetro, conforme mostrado na Figura 10.

**Figura 10: representação de um sensor SQUID.**



Fonte: LE ROUX; MACNAE (2007, p. 419)

As principais aplicações dos sensores SQUIDS envolvem a construção de magnetômetros usados em laboratórios de pesquisa, equipamentos de prospecção geológica e em metrologia em equipamentos para diagnóstico médico. Cabe destacar que para o funcionamento de sensores SQUID, é necessário que o uso de



técnicas de criogenia capazes de resfriar o sensor em temperaturas abaixo da temperatura crítica do material.

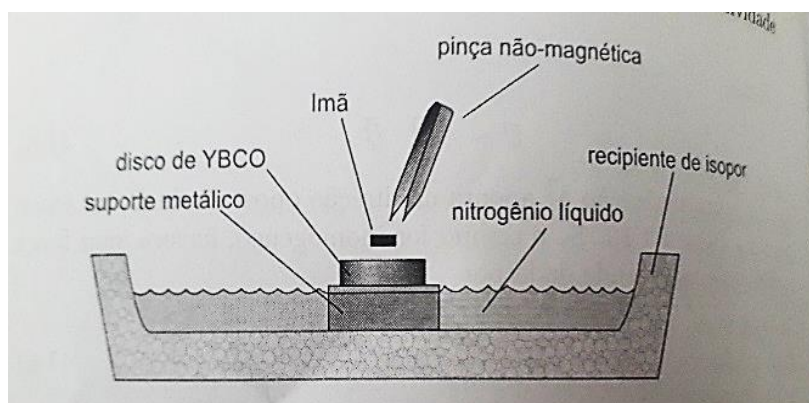
## **A LEVITAÇÃO MAGNÉTICA**

Uma das aplicações da supercondutividade de alta temperatura está baseada na levitação magnética, que originou os veículos levitados magneticamente, como por exemplo, o trem de MAGLEV (Magnetic levitation) que opera experimentalmente no Japão. O seu funcionamento está baseado na repulsão promovida entre solenoides supercondutores localizados dentro do trem e campos magnéticos gerados por correntes de Foucault. Os Eletroímãs supercondutores são usados no sistema de guia, estabilidade e propulsão do trem. Este mecanismo acaba por eliminar o atrito entre as rodas do trem e os trilhos, fazendo que ele possa alcançar velocidade superior 500km/h.

Para exemplificar melhor este fenômeno, abaixo detalhamos como foi realizado o procedimento realizado neste trabalho. Com um pequeno ímã de neodímio – terra rara e um disco cerâmico de YBCO, com massa de aproximadamente 5g, 2 cm de diâmetro e 3 mm de espessura, realizamos a demonstração de levitação magnética. Para isto, acomodamos o disco sobre uma peça metálica colocada no interior de um recipiente raso de isopor. Após, colocar nitrogênio líquido (cuja temperatura de ebulição é de 77K, ou seja, - 196°C) no recipiente, até que o nível alcance a face inferior da pastilha de YBCO.

Depois que cessar a ebulição turbulenta do nitrogênio, o conjunto suporte metálico e pastilha estarão na temperatura de 77K e o YBCO se encontrará no estado supercondutor. Aproxima-se, então, o ímã da face superior do disco, usando uma pinça não magnética. Basta soltar o ímã e este permanecerá levitando a uma distância de alguns milímetros sobre um supercondutor, conforme mostrado na Figura 11. Se for dada uma leve impulsão ao ímã, ele realizará um movimento de rotação livre de atrito, o que fornece um efeito visual muito interessante à experiência.

**Figura 11: Montagem para levitação de um pequeno ímã sobre um disco supercondutor de YBCO.**



Fonte: Pureur, 2004, p.18

### **INSTRUMENTALIZAÇÃO**

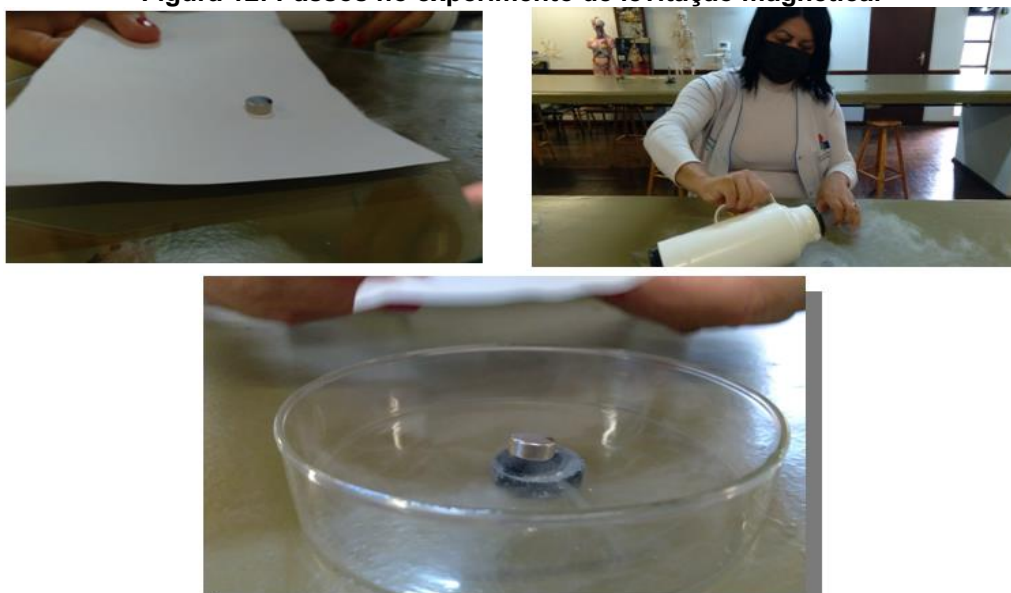
**PASSO 3: O experimento de levitação magnética**

**DURAÇÃO: 2h/a**

De acordo com Gasparin (2003, p.17), no terceiro passo, a instrumentalização, acontece o contato mais aprofundado com o conhecimento teórico em suas diferentes dimensões, relacionando as afirmações baseada nas experiências cotidianas com o conteúdo concreto e mais sistematizado. Neste sentido, considerando a realidade enfrentada pela pandemia causada pelo vírus causador da COVID-19, ações como o ensino remoto se tornaram necessárias. Sendo assim, no terceiro encontro foi disponibilizado um vídeo no site: <http://www.toocastelobranco.seed.pr.gov.br/modules/noticias/>, de autoria própria, sobre o fenômeno de Levitação magnética, para em seguida conduzir uma discussão sobre o assunto com base no texto fornecido na etapa anterior. A seguir, na Figura 5, apresentamos algumas fotos sobre os passos envolvidos no processo de levitação magnética, na qual foi usada uma pastilha de YBCO ( $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ ), nitrogênio líquido e um ímã de neodímio.

Além da demonstração do fenômeno da levitação magnética, propomos uma forma relativamente aproximada de acompanhar o comportamento da resistência elétrica do supercondutor, durante o resfriamento até atingir temperatura menor que  $T_c$ . Para tanto usamos um multímetro, nitrogênio líquido e um recipiente isolante térmico para resfriar o supercondutor conforme mostrado na Figura 12.

**Figura 12: Passos no experimento de levitação magnética.**



Fonte: Autoria própria (2022).

#### **CATARSE**

**PASSO 4: A história em quadrinhos**

**DURAÇÃO: 3h/a**

O quarto passo, a catarse, determina qual nível de aprendizagem o estudante atingiu. Para tanto foram conduzidas exposições orais possibilitando que os alunos apresentem uma síntese demonstrando o seu grau de assimilação dos novos conteúdos. Neste sentido, foi conduzida uma atividade voltada para a elaboração de uma história em quadrinhos, permitindo que os estudantes sistematizem o conteúdo, que será apresentada e discutida com os estudantes no quinto momento.

#### **A PRÁTICA SOCIAL FINAL**

**PASSO 5: O questionário final**

**DURAÇÃO: 1h/a**

Neste passo, foi reservado um intervalo de tempo para a socialização das atividades de elaboração da história em quadrinhos entre os estudantes. Também foi retomado o questionário final (idêntico aquele aplicado no passo 1) para observação da aprendizagem dos alunos durante o desenvolvimento do trabalho.

Esse questionário está disponível no link:

<https://quizizz.com/admin/quiz/60eb83e0547e91001b6ac9a1>

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por meio do desenvolvimento desse trabalho objetivou-se apresentar uma proposta para o ensino da supercondutividade na educação básica de forma relevante para a construção do conhecimento, considerando como justificativa as bases de dados levantados. Através deste trabalho busca-se elaborar e avaliar uma unidade de conteúdo sobre o ensino da supercondutividade com referenciais na teoria histórico crítico e espera-se que essa proposta possa ser disponibilizada a professores e estudantes como alternativa para desenvolvimento do conteúdo. A supercondutividade apresenta-se como um dos temas e serve como suporte para o desenvolvimento de muitos conteúdos, ressaltando assim, a importância da relação desse conteúdo para o conhecimento científico, bem como, do reconhecimento da sua aplicação para os avanços tecnológicos.

Neste sentido, esperamos que este material possa ser usado por outros professores, de modo a fornecer uma alternativa viável e diferenciada para implementar o ensino de supercondutividade na educação básica.

## REFERÊNCIAS

BRASIL. Ministério da Educação e do Desporto. **Parâmetros Curriculares Nacionais**. Brasília: MEC/SEF, 1997.

CARVALHO, S. H. M. ; ZANETIC, J. Ciência e arte, razão e imaginação: complementos necessários à compreensão da física moderna. 2004, **Anais...** São Paulo: SBF, 2004. Disponível em: <http://www.sbf1.sbfisica.org.br/eventos/epenf/ix/sys/resumos/T0094-1.pdf>. Acesso em: 18 out. 2022.

COSTA, M. B. S.; PAVÃO, A. C. Supercondutividade: um século de desafios e superação. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 34, n. 2, p.2602, 2012.

GASPARIN, J. L. **Uma Didática para a Pedagogia Histórico-Crítica**. 2ªed. Campinas, SP: Autores Associados, 2003.

HEPPNER, M. R. S. **Supercondutividade**. 2022. Disponível em: <https://quizizz.com/admin/quiz/60eb83e0547e91001b6ac9a1>. Acesso em: 12 de mar. 2022.

HESSEL, R.; FRESCHI, A. A.; SANTOS, F. J. Lei de indução de Faraday: Uma verificação experimental. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 37, n. 1, 1506 (2015)

LEPICH, R. S. **Caracterização da deposição de pó cerâmico supercondutor de SmBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> em aço inoxidável lean duplex**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). UFES - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2017.

LE ROUX, C.; MACNAE, J. SQUID sensors for EM systems. In: "Proceedings of Exploration 07: Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration". Edited by B. Milkereit, 2007, p. 417-423

LÜDKE, M; ANDRÉ, M. E. D. A. **Pesquisa em educação: abordagens qualitativas**. São Paulo: Pedagógica e Universitária LTDA, 2014.

MAROUCHKINE, A. Supercondutividade à temperatura ambiente. Cambridge International Science Publishing, Cambridge, Reino Unido, 2004, p. 82-93.

MENEGOTTO, F.N. **Supercondutividade**. (2012). Disponível em: <https://pt.slideshare.net/meneguinha/supercondutividade>. Acesso em: 01 abr. 2022

MIRANDA, A. G. **Estudo sobre a teoria de Ginzburg-Landau e o conhecimento de mapas conceituais**. 2013. Dissertação (Mestrado em Física). Universidade Federal do Amazonas. Manaus, 2013.

MLA style: **Heike Kamerlingh Onnes - Facts. Nobel Prize.org. Nobel Prize**

**Outreach AB 2022.** Disponível em:

<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1913/annes/facts/>. Acesso em 01/04/2022.

OSTERMANN, F. Tópicos de Física Contemporânea em Escolas de Nível Médio e na Formação de Professores de Física. 2000. Tese (Doutorado em Ciências), Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

OSTERMANN, F.; PUREUR, P. **Supercondutividade**. 1ªed. São Paulo: livraria da Física: Sociedade Brasileira de Física, 2005 (Temas Atuais de Física).

PARANÁ. Secretaria de Estado da Educação. **DCEs - Diretrizes Curriculares de Física**. Curitiba: SEED, 2008

POOLE, C. P.; FARACH, H. A.; CRESWISK, R. J.; PROSOROV, R. **Superconductivity**. 2 ed. San Diego - CA: Academic Press, 2007.

PUREUR, P. **Supercondutividade e Materiais Supercondutores**. Parte I: Supercondutividade. Porto Alegre: Instituto de Física-UFRGS, 2004.

PUREUR, P. **Supercondutividade**: uma introdução. IXa. ESCOLA do CBPF. Julho de 2012. Disponível em:  
[https://mesonpi.cat.cbpf.br/e2012/arquivos/pg13/Supercondutividade\\_aula\\_1.pdf](https://mesonpi.cat.cbpf.br/e2012/arquivos/pg13/Supercondutividade_aula_1.pdf). Acesso em: 6 de jun. 2022.

RODRIGUES, E. I. B. **Fórmula de Lichnerowicz-Weitzenböck aplicada a supercondutores de uma e duas componentes**. Dissertação (Mestrado em Física) Programa de Pós-graduação em Física Aplicada, UFRPE, Pernambuco, 2013.

SAVIANI, D. **Educação escolar, currículo e sociedade**: o problema da base nacional comum curricular. (Org.) Julia Malanchen, Neide da Silveira Duarte de Matos, Paulino José Orso. In: A pedagogia histórico-crítica, às políticas educacionais e a Base Nacional Comum Curricular. Campinas, S.P: Autores Associados, 2020.

SAVIANI, D. **Pedagogia histórico-crítica**: primeiras aproximações. 11. ed. rev. Campinas: Autores Associados, 2011. 137 p.