

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DO ARAGUAIA
Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física**

**SUPERCONDUTIVIDADE – UMA ABORDAGEM PARA
O ENSINO MÉDIO CENTRADA EM VÍDEOS-
EXPERIMENTOS**

MARCELO DA SILVA PERES

BARRA DO GARÇAS – MT
2021

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DO ARAGUAIA
Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física**

**SUPERCONDUTIVIDADE – UMA ABORDAGEM PARA
O ENSINO MÉDIO CENTRADA EM VÍDEOS-
EXPERIMENTOS**

MARCELO DA SILVA PERES

Orientadora: Profa. Dra. Rosângela B. Pereira

Dissertação apresentada ao Programa de pós-graduação em Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física da Universidade Federal de Mato Grosso - Polo Barra do Garças, para obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

BARRA DO GARÇAS – MT
2021

Dados Internacionais de Catalogação na Fonte.

D111s da Silva Peres, Marcelo.
Supercondutividade – uma abordagem para o ensino médio
centrada em vídeos-experimentos / Marcelo da Silva Peres. -- 2021
102 f. : il. color. ; 30 cm.

Orientadora: Rosângela Borges Pereira.

Dissertação (mestrado profissional) - Universidade Federal de
Mato Grosso, Instituto de Ciências Exatas e da Terra, Programa de
Pós-Graduação Profissional em Ensino de Física, Pontal do
Araguaia, 2021.

Inclui bibliografia.

1. Ensino de Física. 2. Supercondutividade. 3. Vídeos
experimentos. I. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Permitida a reprodução parcial ou total, desde que citada a fonte.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
PRÓ-REITORIA DE ENSINO DE PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM [NOME DO PPG]

FOLHA DE APROVAÇÃO

TÍTULO: SUPERCONDUTIVIDADE – UMA ABORDAGEM PARA O ENSINO MÉDIO CENTRADA EM VÍDEOS-EXPERIMENTOS

AUTOR: MARCELO DA SILVA PERES

Dissertação defendida e aprovada em 26 de fevereiro de 2021.

COMPOSIÇÃO DA BANCA EXAMINADORA

1. **PROFESSORA DOUTORA ROSÂNGELA BORGES PEREIRA** (Presidente Banca / Orientadora)

INSTITUIÇÃO: UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO/ICET/CUA/BARRA DO GARÇAS

2. **PROFESSOR DOUTOR FABRÍZIO MYAKI ALVES** (Membro interno)

INSTITUIÇÃO: UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO/ICET/CUA/BARRA DO GARÇAS

3. **PROFESSOR DOUTOR MARCIONÍLIO TELES DE OLIVEIRA SILVA** (Membro Externo)

INSTITUIÇÃO: UNIVERSIDADE FEDERAL DE CATALÃO/CATALÃO

Barra do Garças, 26 de fevereiro de 2021



Documento assinado eletronicamente por **ROSANGELA BORGES PEREIRA, Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 01/03/2021, às 15:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marcionilio Teles de Oliveira Silva, Usuário Externo**, em 02/03/2021, às 10:31, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **FABRIZIO MYAKI ALVES, Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 02/03/2021, às 11:26, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site



[http://sei.ufmt.br/sei/controlador_externo.php?](http://sei.ufmt.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0)

[acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0](http://sei.ufmt.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **3287038** e o código CRC **FDFEBA67**.

Referência: Processo nº 23108.007313/2021-29

SEI nº 3287038

*O que sabemos, saber que o sabemos.
Aquilo que não sabemos, saber que não o
sabemos: eis o verdadeiro saber.*

.

Confúcio

*À minha família: minha mãe e meu
filho prestes a nascer..*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus pela graça de realizar este curso.

À minha família, Meu Filho prestes a vir e, em especial, Brenda Jesus por entender a minha ausência durante todo o curso.

À minha amada e estimada mãe Cleidemar Batista da Silva que sempre foi grande incentivadora dos meus estudos e dos meus sonhos.

Aos meus amigos de cursos: Gustavo Mocó, Gerson, Devacir, Osmildo Moreira, entre outros, pelo apoio e parceria em sala de aula e fora dela.

À todos os professores do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física Polo Barra do Garças que muito colaboraram para minha formação.

À minha orientadora professora Dra. Rosângela Borges Pereira, pelas orientações, ajuda nos incentivos constantes, paciência e por ser bem objetiva no trabalho científico.

Enfim a todos aqueles que sempre me apoiaram e me ajudaram a chegar a este momento tão gratificante e significativo para minha formação profissional.

À Coordenação da Sociedade Brasileira de Física (SBF), sem a qual não teria sido possível realizar este curso este trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

RESUMO

O presente trabalho intitulado **Supercondutividade – uma abordagem para o ensino médio centrada em vídeos-experimentos** objetivou a elaboração de material didático sobre o tema e sua implementação, na modalidade de ensino remoto, para os egressos do Programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física da Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT) do Campus Araguaia e também para estudantes de Licenciatura em Física do mesmo campus. O tema Supercondutividade, que é bastante complexo e amplo, não é contemplado na grade curricular das disciplinas de Física do ensino médio, o que acarreta uma grande defasagem entre os conteúdos vistos em sala de aula e a realidade da ciência e das aplicações tecnológicas. Como forma de sanar essa carência, elaboramos um detalhado material que traz desde revisão de conceitos importantes ao entendimento da Supercondutividade, como um levantamento histórico, os diferentes tipos de supercondutores, principais efeitos e a primeira explicação de sucesso (a teoria BCS). Nossa metodologia foi centrada em vídeos-experimentos sobre diversos experimentos envolvendo o fenômeno da supercondutividade, numa tentativa de suprir a ausência dos experimentos reais. Os resultados obtidos nos permitem inferir que os estudantes tiveram um bom aprendizado sobre o tema e de modo unânime reconheceram a importância dos vídeos-experimentos em seus processos de aprendizagem.

PALAVRAS-CHAVE: Ensino de Física, supercondutividade, vídeos-experimentos.

ABSTRACT

The present work entitled Superconductivity - an approach to high school centered on video-experiments, aimed to prepare the didactic material on the theme and its implementation, in the remote teaching modality, for graduates of the Professional National Master's Program in Physics Teaching at the Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT) of the Campus - Araguaia, and also of graduate students from the this campus. The theme Superconductivity, which is quite complex and broad, is not included in the curriculum of high school Physics subjects, which leads to a great gap between the content seen in the classroom and the reality of science and technological applications. As a way to remedy this deficiency, we elaborated a detailed material that brings from the review of important concepts to the understanding of Superconductivity, such as a historical survey, the different types of superconductors, main effects and a first explanation of success (the BCS theory). Our methodology was centered on video-experiments on several experiments involving the phenomenon of superconductivity, in an attempt to make up for the absence of real experiments. The results obtained allow us to infer that students have a good learning about the theme and unanimously recognize the importance of videos-experiments in their learning processes.

KEY WORDS: Physics Teaching, superconductivity, videos experiments.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Estruturas cristalinas de alguns sólidos.	22
Figura 2. Movimento desordenado dos elétrons.	23
Figura 3. Movimento desordenado dos elétrons (a). Em (b) o movimento ordenado dos elétrons,	24
Figura 4. Variação da resistividade com a temperatura.	24
Figura 5. Gráfico mostrando a perda de resistividade em uma amostra supercondutora ao atingir a	26
Figura 6. Transição de fase para supercondutores do Tipo I e II.	30
Figura 7. Diamagnetismo perfeito de uma amostra supercondutora.	33
Figura 8. Aplicação de campo magnético, antes do resfriamento, em uma amostra condutora.	34
Figura 9. Aplicação de campo magnético, depois do resfriamento, em uma condutora.	35
Figura 10. Experimento realizado com amostra supercondutora. À esquerda o resfriamento da amostra	37
Figura 11. Esquema do gráfico Campo Magnético Crítico por Temperatura Crítica, mostrando os	38
Figura 12. Dependência do campo crítico em função da temperatura para alguns elementos puros.	39
Figura 13. Esquema simplificado de uma rede cristalina e dois elétrons livres.	41
Figura 14. Esquema mostrando a interação entre os elétrons e a rede cristalina e a deformação da rede.	41
Figura 15. Esquema simplificado mostrando a formação de pares de Cooper.	42
Figura 16. Variação da temperatura crítica com a massa isotópica para o mercúrio.	44
Figura 17. Variação da energia do <i>gap</i> com a temperatura crítica.	45
Figura 18. Variação do calor específico do vanádio em função do inverso da temperatura. A inclinação	46
Figura 19. Esquema de um MAGLEV.	50
Figura 20. Fotografia da tela do computador, aberta no site que armazena um vídeo com.	55
Figura 21. Fotografia da tela do computador, aberta no site que armazena um vídeo com.	55
Figura 22. Fotografia da tela do computador, aberta no site que armazena um vídeo com.	56
Figura 23. Fotografia da tela do computador, aberta no site que armazena um vídeo com.	56
Figura 24. Uma das atividades propostas no produto educacional.	57
Figura 25. Uma das atividades propostas no produto educacional.	58
Figura 26. Gráfico indicando o número de acertos por questão na atividade avaliativa	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Alguns metais e ligas metálicas, por ano de descoberta, e suas temperaturas críticas.....	27
Tabela 2. Alguns materiais (não condutores) por ano de descoberta e suas temperaturas críticas.....	28
Tabela 3. Alguns materiais supercondutores do Tipo I.....	29
Tabela 4. Alguns materiais supercondutores do Tipo II. Em (a) material cerâmicos; em (b) metais e	31
Tabela 5. Alguns dados de Campo magnético crítico e temperatura crítica.....	39

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
1.1 OBJETIVOS	15
1.2 PRODUTO EDUCACIONAL.....	15
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	16
2.1. TECNOLOGIAS EDUCACIONAIS COM RECURSOS VISUAIS.....	16
2.2. SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS, LABORATÓRIOS REMOTOS E VÍDEO- EXPERIMENTOS	17
2.3. A APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA E AS POTENCIALIDADES PEDAGÓGICAS	19
3. A FISICA DA SUPERCONDUTIVIDADE.....	21
3.1. CONCEITOS IMPORTANTES PARA ENTENDER A SUPERCONDUTIVIDADE.	21
3.2. SUPERCONDUTIVIDADE – UMA BREVE HISTÓRIA	25
3.3. TIPOS DE SUPERCONDUTORES	29
3.4. DIAMAGNETISMO, FERROMAGNETISMO E PARAMAGNETISMO	31
3.5. O EFEITOS MEISSNER.....	33
3.6. CAMPO CRÍTICO E CORRENTE CRÍTICA	38
3.7. PARES DE COOPER	40
3.8. TEORIA BCS.....	42
3.9. APLICAÇÕES DA SUPERCONDUTIVIDADE.....	47
4. METODOLOGIA	51
5. RELATOS DA APLICAÇÃO.....	53
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	59
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	64
REFERÊNCIAS	65
APÊNDICE A – PRODUTO EDUCACIONAL.....	67
APÊNDICE B – FORMULÁRIO AVALIATIVO	93
APÊNDICE C – FORMULÁRIO AVALIATIVO.....	100

1. INTRODUÇÃO

Embora estejamos em pleno século XXI, com todas as maravilhas tecnológicas que ele nos oferece, a Física Moderna e Contemporânea não é ensinada de modo regular em nossas escolas de ensino básico. Quando o tema é tratado nos livros didáticos, é feito de maneira introdutória, sem nenhuma formalidade, apenas a nível informativo.

Quando falamos em Física Moderna e Contemporânea, pensamos em Mecânica Quântica e Relatividade. No entanto, diante da abrangência dessas teorias, é possível tratar diversos tópicos, de maneira independente: semicondutores, supercondutores, matéria e energia escuras, partículas elementares, entre outros. Certamente que os conteúdos padrão das disciplinas de Física também são importantes e, com a baixa carga horária destas disciplinas (e não só delas, mas do nosso sistema de ensino) seria necessária uma grande mudança para incluir novas ementas. E não há nada no cenário atual que nos indique que essa realidade de baixa carga horária será modificada.

Diante dessa realidade, tem ficado sob a responsabilidade dos professores levar os conteúdos de Física Contemporânea para suas salas de aula. E esta é uma tarefa exigente porque, como os conteúdos não constam dos livros didáticos, cabe ao professor elaborar esse material – geralmente com base em livros de graduação – e, então fazer a transposição didática para o ensino médio. E é neste cenário que o Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física contribui enormemente com o ensino de Física no país.

Com os mestrandos sendo todos professores de Física ou de Ciências do ensino fundamental, além do ganho com as disciplinas cursadas, há ainda a possibilidade de criar, através do produto educacional, material didático de qualidade, que abordem os mais diversos temas da Física. E, neste caso específico, em que este autor sempre teve interesse em atualizar suas aulas, o Mestrado proporcionou trabalhar com o tema de Supercondutividade.

A implementação de um conteúdo fora dos livros didáticos exige uma grande preparação pedagógica: o conteúdo em si, a transposição didática, a metodologia a ser utilizada, a inclusão de experimentação e os processos avaliativos. Neste trabalho elaboramos um material didático para ser trabalhado com nossos

alunos, mas que também pode ser utilizado por outros professores que tenham os mesmos objetivos.

Nosso material didático apresenta um tratamento detalhado de Supercondutores, trazendo uma revisão de conteúdos necessários ao entendimento da Física que explica esse fenômeno, levantamento histórico desde sua descoberta em 1911 até os excepcionais avanços nos dias de hoje, explicações formais sobre como se dá a supercondutividade e, ainda, as aplicações já existentes e as potenciais aplicações em um futuro próximo. E, como um importante ativo de nosso trabalho, estão os vídeos-experimentos escolhidos para serem inseridos nas aulas teóricas.

Desde sempre acreditamos na experimentação como um grande mediador do ensino dos mais diversos conteúdos de Física e na supercondutividade não seria diferente. No entanto, por limitações operacionais, não se encontram no mercado nacional pastilhas supercondutoras didáticas a preços acessíveis. No mercado americano, onde era possível comprar estas pastilhas pela internet a venda está sob fortes restrições. Então, diante da impossibilidade de realizarmos experimentos reais com os supercondutores, tentamos suprir parte dessa carência com a utilização de vídeos-experimentos de várias partes do mundo que realizam os experimentos com fim de divulgação científica.

Achamos importante registrar que a implementação deste trabalho em sala de aula se deu em um momento em que a humanidade atravessa a grave pandemia de Covid-19 que assola o planeta. Em função do cancelamento das aulas presenciais, escolas, professores, gestores e estudantes tiveram que se reinventar em tempo recorde e migrar do ensino presencial para o ensino remoto emergencial. Nós próprios fomos submetidos a esse desafio, tanto na condição docente quanto na condição de mestrando. E, nesse contexto, a utilização de vídeos-experimentos se mostrou bastante apropriada, como ficará evidenciado no decorrer deste trabalho.

Esperamos que nossa proposta possa contribuir com os professores que buscam inserir o conteúdo de Supercondutividade em suas aulas e também que sirva para despertar nos estudantes o interesse pela Física e pelas Ciências.

Este texto está assim distribuído: ainda neste capítulo apresentamos os objetivos do trabalho e um pequeno resumo acerca do Produto Educacional; no Capítulo 2 detalharemos nossa Metodologia; o relato da implementação será feito no Capítulo 3; o Capítulo 4 traz os Resultados e Discussão e o 5 nossas Conclusões. Na sequência, seguem as Referências e os três Apêndices que complementam o texto.

1.1 Objetivos

A seguir listamos os objetivos geral e específicos de nosso trabalho.

Objetivo Geral

Elaboração e implementação de material didático, centrado em vídeo-experimentação, para tratar do tema supercondutividade em sala de aula do ensino médio.

Objetivos específicos

Almejamos com nossa proposta:

- inserir o importante conteúdo de supercondutividade no currículo mínimo do ensino médio;
- mostrar aos estudantes o potencial de vídeos-experimentos como auxiliar nos processos de aprendizagem;
- contribuir para a divulgação científica da Física.

1.2 Produto Educacional

O produto educacional, fruto deste trabalho, é o material didático *Supercondutores – uma abordagem baseada em vídeos experimentos*, que se encontra no Apêndice A. Os vídeos experimentos tem papel preponderante em nossa metodologia, ilustrando, reforçando ou apenas contextualizando o conteúdo. No material há a descrição detalhada dos vídeos experimentos e atividades de fixação de conhecimento relacionadas a eles e aos conteúdos teóricos abordados. O conteúdo teórico, indissociável e complementar ao Produto, embora não conste diretamente nele¹, pode ser acessado no Capítulo 3 desse texto.

¹ Para que esse texto não ficasse muito extenso, não anexamos o Capítulo 3 – de conteúdo – ao Produto Educacional (assim evitando duplicações). Na versão final do Produto, divulgada em separado deste texto, o Capítulo 3 será colocado como Apêndice, com numeração própria.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo, discorreremos sobre o papel que os vídeos-experimentos podem desempenhar nos processos de ensino-aprendizagem da Física.

Em nossa exposição, embora façamos um levantamento bibliográfico de trabalhos sobre a vídeo-experimentação que abrangem quase uma década, pretendemos enfatizar e discutir a sua importância no mundo de hoje, em pleno século 21. E não podemos deixar de considerar a importância desses objetos aprendizagens nesse momento de ensino remoto emergencial em que o país está inserido, em função da pandemia de Covid-19.

2.1. Tecnologias educacionais com recursos visuais

Os vídeos como objetos de aprendizagem são utilizados nas nossas salas de aula muito antes do surgimento na internet. Temos que lembrar que as tecnologias educacionais existem desde sempre e não se resume às tecnologias digitais. O próprio quadro negro era uma tecnologia. Neste período em que os vídeos ganharam destaque, geralmente falamos de filmes que eram levados para a sala de aula pelo seu teor didático. Com o passar do tempo, foram surgindo vídeos concebidos para a sala de aula, didáticos, voltados para tratar de determinados conteúdos das diversas disciplinas escolares, em todos os níveis de ensino. O vídeo chegava pronto à sala de aula.

Com a popularização das TVs, dos videocassetes, das filmadoras portáteis, foi ficando evidenciado a vantagem de se utilizar a produção de vídeos pelos próprios estudantes, sobretudo nas áreas de Linguagens e Humanas. PIMENTEL *et al* (2011) faz um detalhado levantamento histórico da evolução das formas e categorizações das diferentes modalidades de vídeo utilizadas ao longo do tempo. FERREZ (1996) trata das diferentes metodologias de que o professor poderia se valer para promover melhor interação com os vídeos.

Hoje podemos dizer que os vídeos que se enquadram na categoria de objetos virtuais de aprendizagem (CARNEIRO; SILVEIRA, 2014) e, como tecnologia digital, tem utilização disseminada nos meios de ensino, nas mais diversas áreas com os mais diversos objetivos. Diferentemente do que ocorria em um passado não tão distantes, em

que eram necessárias filmadoras, caras, hoje é possível filmar com um clique em *smartphones* e essa comodidade auxilia na propagação dessa tecnologia.

Neste trabalho nos referiremos exclusivamente a vídeos que retratem experimentos dos mais diversos fenômenos, sobretudo de Física. Por completeza, falaremos também das simulações computacionais que simulam experimentos reais.

2.2. Simulações computacionais, laboratórios remotos e vídeo-experimentos

Achamos apropriado fazer uma breve distinção entre os diferentes tipos de tecnologias educacionais voltadas a dar suporte a práticas experimentais, como aquelas realizadas nas disciplinas de Física e Química. Há na literatura diferentes classificações destas tecnologias (PIERRI *et al*, 2019; CARLOS *et al*, 2018; BERCK E ROCHA, 2019); aqui utilizaremos uma nomenclatura mais intuitiva. São elas:

- **Simulações computacionais que permitem experimentações virtuais (como as do PHET)**

As simulações computacionais reproduzem fenômenos físicos e podem ser apenas animações ou serem mais sofisticadas, permitindo que os usuários interajam com ela, escolhendo valores e realizando medições (ARANTES *et al*, 2010)

Há uma grande discussão entre os pesquisadores do ensino de Física do papel que a experimentação virtual tem no aprendizado, sobretudo quando comparada à experimentação real. Essa discussão foge do escopo de nosso trabalho, mas uma discussão do assunto pode ser vista em (MEDEIROS E MEDEIROS, 2002)

- **Laboratório virtual**

Embora também sejam simulações computacionais, a interface é mais voltada para reproduzir um laboratório real. Diferente das simulações computacionais do PHET que são gratuitas, os softwares dos laboratórios virtuais são pagos e vendidos apenas para instituições de ensino. Um exemplo é o VirtualLab da Pearson. Vídeos de

apresentação podem ser vistos em <https://virtuallab.pearson.com.br/Laboratorios/Fisica>.

- **Laboratório remoto**

Um laboratório remoto é bem diferente da simulação por envolver tomadas de dados reais dos experimentos, embora as medições sejam colhidas ou transmitidas pela internet, ou seja, sempre acontecendo com a mediação de computadores *ou smartphones* (TULHA *et al*, 2019). O experimento é realizado em um determinado local, físico, com transmissão pela internet. Um exemplo é uma estação meteorológica montada com sensores do Arduino que encaminham os dados medidos, 24 horas por dia, para o app *ArduinoDroid* (MOCÓ, 2020).

Este tipo de laboratório tem ganhado destaque durante a vigência do ensino remoto emergencial. Na impossibilidade de os estudantes utilizarem os laboratórios, o professor da disciplina filma a execução dos experimentos. De posse do vídeo e dos dados medidos pelo professor, os estudantes fazem a análise do experimento e elaboram o relatório didático.

Esse laboratório tem se mostrado útil sobretudo na vigência do ensino remoto emergencial (RODINI *et al*, 2020).

- **Vídeos-experimentos**

Essa modalidade se distancia totalmente das anteriores. Aqui a intenção é simplesmente filmar um determinado fenômeno, durante a execução de um experimento. Geralmente há um apelo visual nesse tipo de vídeo e muitos são realizados com equipamentos de difícil aquisição. São executados geralmente com interesse de divulgação científica e alcançam um público de aficionados por ciências e não apenas estudantes. Há inúmeras instituições ao redor do planeta que promovem esses vídeo-experimentos; aqui citaremos o Física na Prática da USP (<https://www.youtube.com/watch?v=oxogOutiqw8>) e o o *The Royal Institution* (<https://www.youtube.com/user/TheRoyalInstitution>).

2.3. A aprendizagem significativa e as potencialidades pedagógicas

Está completamente arraigada nas práticas pedagógicas atuais que a aprendizagem deve ser significativa. Esse “significativo” não necessariamente tem o significado concebido por Ausubel e descrito por Moreira (2011). Entende-se que a aprendizagem para ser significativa deve ser sustentável, vinculada a outros saberes, não mecanizada, que atua para modificar o cognitivo do aprendiz e que permite que esse aprendizado seja construído por ele.

Nesse sentido, as tecnologias de informação, entre elas as simulações e os vídeos experimentos podem atuar de maneira a auxiliar na promoção de uma aprendizagem significativa (SILVA JR. *et al*, 2019). As Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC) permitem que os estudantes possam ser ativos em seus processos de aprendizagem, auxiliando-os a desenvolver novas competências e habilidades. Capacidades de observação, argumentação, percepção, raciocínio lógico podem ser desenvolvidos com a mediação das tecnologias.

É importante separar aqueles que podem se beneficiar dos vídeos-experimentos: professores e estudantes para uma construção de uma aprendizagem com significado.

No que diz respeito aos professores, os vídeo-experimentos se mostram um aliado de peso pois permitem que o professor extrapole as barreiras e limitações de sua sala de aula. Ele não está mais sozinho, mas ligado a muitos outros com preocupações como a sua. Isso porque geralmente os vídeos-experimentos são feitos com motivação pedagógica e de divulgação científica. Por ser uma tecnologia digital, fica armazenada em algum site, geralmente em canais do Youtube e ali o professor encontra uma enorme comunidade para compartilhar impressões, dúvidas, comentários. Como exemplo podemos citar o vídeo-experimento do canal Boaz Almong (<https://www.youtube.com/watch?v=VyOtIsnG71U>), com mais de 3.400.000 visualizações ao redor do planeta! Os vídeos experimentos são particularmente úteis para demonstrar fenômenos quânticos que, por sua própria natureza exigem equipamentos sofisticados para serem reproduzidos, como a supercondutividade, tratada nesse texto.

Cada uma das tecnologias educacionais descritas tem objetivos próprios, podendo ser adequadas às necessidades individuais dos professores que tem total autonomia para decidir como melhor explorá-las: demonstração em sala de aula,

complemento de conteúdo, simulação de experimentação real, investigação, divulgação científica, entre outras. Geralmente, como os currículos não tem aulas experimentais, o professor faz voluntariamente o uso destas plataformas.

Embora sejam um importante recurso pedagógico para que tenham uma função pedagógica, não basta que o professor apresente o vídeo. É necessário que decida o momento de fazê-lo (antes, durante ou depois das explicações teóricas) e também como será feita a exploração do conteúdo de interesse. O planejamento das atividades em que os vídeos experimentos estão inseridos podem contribuir com um aprendizado significativo.

Para o estudante, além de algumas vantagens compartilhadas com aquelas do professor como poder extrapolar os limites de sua sala de aula, acessar materiais produzidos em várias partes do mundo, compartilhar suas dúvidas e impressões com outros, ainda há as vantagens pedagógicas propriamente ditas.

Eles podem usar o aprendizado proporcionado pelos vídeos experimentos em diferentes contextos, fazendo ligações entre o que viram em sala de aula e os fenômenos que se apresentam. Podem, de modo autônomo e independente, buscar novos conhecimentos correlatos.

A curiosidade pode ser despertada, fazendo com que os estudantes tenham interesse em tentar realizar os experimentos por conta própria. No entanto, na impossibilidade dessa realização, eles podem reproduzir o “experimento” quantas vezes quiser, utilizar botões de pausa, de avanço, de câmera lenta, o que traz muitos benefícios para a aprendizagem. Soma-se a essas vantagens os inúmeros vídeos sobre os mesmos fenômenos, que sempre podem mostrar um detalhe ou outro de modo mais evidenciado e o simples processo de busca contribui para o aprendizado.

3. A FÍSICA DA SUPERCONDUTIVIDADE

Neste capítulo pretendemos explicar detalhadamente os princípios físicos da supercondutividade.

Iniciaremos fazendo uma rápida revisão de alguns conceitos necessários ao entendimento dos supercondutores e, em seguida, faremos um levantamento histórico do surgimento do fenômeno e sua evolução até os dias atuais. Na sequência, além de explicar a supercondutividade, apresentaremos uma das teorias que a explica. Finalizaremos o capítulo com algumas aplicações possíveis dos supercondutores e alguns desafios para sua operacionalização.

No produto educacional (apêndice A) há uma proposta didática para fixar e aprofundar os conteúdos aqui explicados.

O conteúdo de Física desse capítulo foi baseado, majoritariamente, nas seguintes obras: o artigo **Tópicos de Física Contemporânea no ensino médio – um texto para professores sobre supercondutividade** (OSTERMANN *et al*, 1997), **Supercondutividade – uma proposta de inserção no ensino médio** (OSTERMANN *et al*, 1998), da coleção *Textos de Apoio ao Professor de Física*, da UFRGS e do livro **Supercondutividade** (OSTERMANN E PUREUR, 2005) da coleção *Temas Atuais em Física*, publicada pela Sociedade Brasileira de Física.

3.1. Conceitos importantes para entender a supercondutividade.

Nesta seção faremos uma breve revisão de alguns conceitos que são importantes para o entendimento da supercondutividade.

Revisão 1 - estrutura cristalina

Os materiais sólidos podem ser classificados de acordo com a regularidade na qual os átomos ou íons se dispõem em relação à seus vizinhos:

CRISTALINOS – Compostos por átomos, moléculas ou íons, organizados segundo um padrão de forma repetitiva e tridimensional (simetria translacional), cuja ordem é de longo alcance. Este tipo de organização é encontrado em vários sólidos.

Estruturas cristalinas são arranjos regulares, tridimensionais, de átomos no espaço. A regularidade com que os átomos se agregam nos sólidos decorre de condições geométricas impostas pelos átomos envolvidos, pelo tipo de ligação atômica e pela compactidade.

Assim, um material cristalino, independentemente do tipo de ligação que o forma, caracteriza-se por apresentar um agrupamento ordenado de seus átomos, íons ou moléculas, que se repete nas três dimensões.

Todos os metais, muitas cerâmicas, os semicondutores e alguns polímeros formam estruturas cristalinas sob condições normais de solidificação

AMORFOS – Compostos por átomos, moléculas ou íons que não apresentam uma ordenação de longo alcance (não possuem simetria translacional). Podem apresentar ordenação de curto alcance. São exemplos os líquidos e os sólidos vítreos.

A estrutura física dos materiais sólidos depende fundamentalmente do arranjo estrutural de seus átomos, íons ou moléculas. A maioria dos materiais, particularmente os metálicos, exibe um arranjo bem definido de seus átomos, o que caracteriza uma estrutura cristalina.

As propriedades dos materiais sólidos cristalinos dependem da estrutura cristalina, ou seja, da maneira na qual os átomos, moléculas ou íons estão arranjados no espaço. Há um número grande de diferentes estruturas cristalinas, desde estruturas simples exibidas pelos metais até estruturas mais complexas exibidas pelos materiais cerâmicos e polímeros

As estruturas cristalinas são formadas por células unitárias que são sua unidade básica, pois constituem o menor conjunto de átomos associados encontrados numa estrutura cristalina.

Exemplos de estrutura cristalina são mostrados na figura 1:

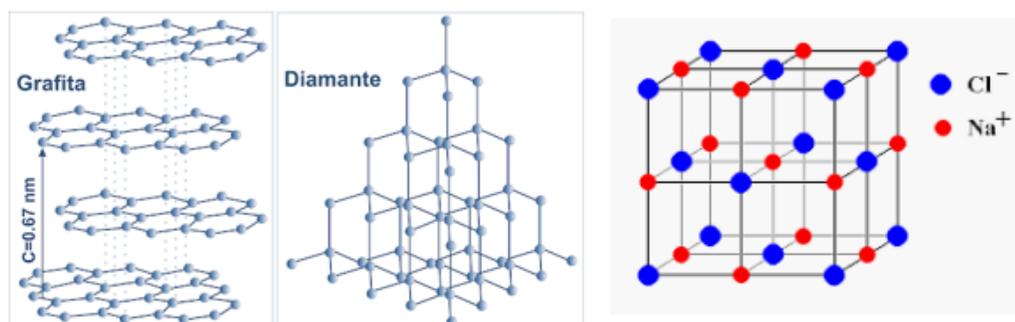


Figura 1. Estruturas cristalinas de alguns sólidos.

Fonte: adaptadas de figuras de domínio público da internet. Acessado em 24/04/21.

As propriedades de alguns materiais estão diretamente associadas à sua estrutura cristalina (ex: Magnésio e Berílio puros, que têm a mesma estrutura, se deformam muito menos que Ouro e Prata que têm outra estrutura cristalina).

Materiais cristalinos e não cristalinos de mesma composição apresentam diferenças em suas propriedades (materiais cerâmicos e poliméricos não-cristalinos tendem a ser opticamente transparentes enquanto cristalinos não).

Revisão 2 - um modelo de metal

De um modo simplificado podemos dizer que um metal consiste de uma rede cristalina de íons positivos envoltos por elétrons que podem mover-se livremente, chamados de elétrons livres.

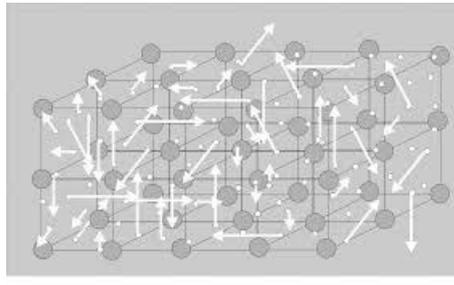


Figura 2. Movimento desordenado dos elétrons.

Fonte: <https://www.if.ufrj.br/~marta/cederj/eletro/fe-cap5.pdf>. Acessado em 24/04/21.

A uma dada temperatura – diferente do zero absoluto – os íons positivos estão em movimento oscilatório em torno de suas posições de equilíbrio devido à sua agitação térmica. Já os elétrons livres, por sua vez, apresentam um movimento desordenado. A figura 2 mostra tanto os íons (esferas cinzas escuras) fixos e os elétrons (pontos brancos). As setas indicam a direção da velocidade de alguns elétrons.

Revisão 3 - a corrente elétrica

O movimento desordenado dos elétrons nos metais pode se tornar ordenado. Vamos pensar em um fio metálico, de cobre, por exemplo, que não esteja submetido a uma diferença de potencial (tomada elétrica, pilhas, baterias). Os elétrons no fio estão em movimento desordenado e assim ficarão até que o fio seja submetido a uma diferença de potencial. Assim que for submetido a uma diferença de potencial, cada elétron ficará submetido a uma força elétrica que obriga os elétrons a se

movimentarem numa mesma direção. E justamente esse movimento ordenado dos elétrons que é chamado de corrente elétrica (figura 3).

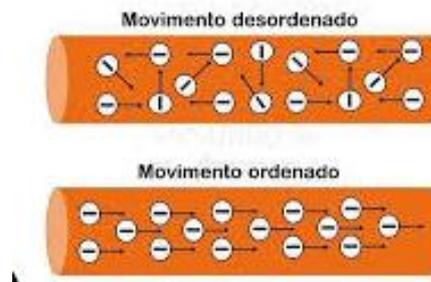


Figura 3. Movimento desordenado dos elétrons (a). Em (b) o movimento ordenado dos elétrons, formando uma corrente elétrica.

Fonte: <https://www.mundodaeletrica.com.br/principais-caracteristicas-da-corrente-eletrica/>. Acessado em 24/04/21.

Revisão 4 - resistividade elétrica

Em seu movimento no interior do material, a corrente elétrica sofre oposição (resistência) devido às vibrações térmicas que tiram os íons de suas posições de equilíbrio e também pela presença de impurezas na rede cristalina. Como consequência desses efeitos, os elétrons livres que compõe a corrente elétrica sofrem espalhamento em outras direções. Essa dificuldade imposta ao movimento dos elétrons livres é chamada de resistividade elétrica do material.

Como um dos responsáveis pela resistividade elétrica é a agitação térmica, podemos inferir sobre a resistividade que ela é dependente da temperatura, diminuindo quando a temperatura diminui (tendo em vista que a agitação térmica diminui). A figura 4 mostra um gráfico com a dependência da resistividade com a temperatura.

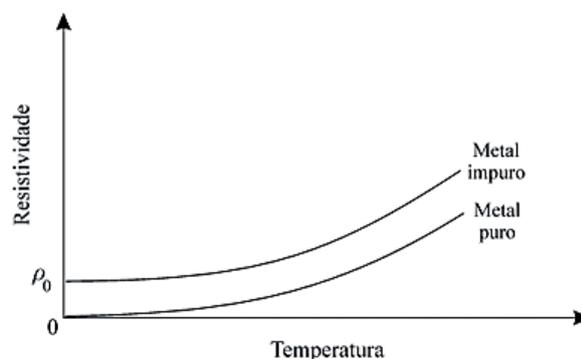


Figura 4. Variação da resistividade com a temperatura.

Fonte: https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Comportamento-resistivo-de-um-metal-puro-e-de-um-metal-contendo-impurezas-e-ou_fig1_237635959. Acessado em 24/04/21.

É importante observar uma diferença entre os dois casos mostrados na figura 4. No caso do metal puro, a resistividade iria a zero, para temperaturas iguais a 0 K. Para os metais impuros isso não ocorre. A explicação é que no zero absoluto não há vibrações da rede e, como o material é puro, não haveria oposição á corrente elétrica.

Temos que lembrar que o zero absoluto é uma impossibilidade da Física. Ao condutor que tem resistividade nula na temperatura do zero absoluto, chamamos **condutor ideal**. Adiantamos aqui que um condutor ideal e um supercondutor são coisas distintas, conforme será detalhado na seção 3.5.

Revisão 5 – Magnetização

A magnetização mede o grau em que uma amostra está magnetizada, ou seja, o quanto seus momentos de dipolo magnético estão orientados (em material paramagnético). Detalharemos mais sobre a magnetização adiante.

3.2. Supercondutividade – uma breve história

Nesta seção vamos apresentar o fenômeno da supercondutividade e fazer um breve levantamento histórico sobre seu desenvolvimento

Ao pesquisar, em 1911, a resistividade elétrica do mercúrio, Heike Kamerlingh Onnes descobriu que sua resistividade caía abruptamente a zero à temperatura de 4K, ou seja, de -269°C . Esse fenômeno era radicalmente diferente do apresentado pelos condutores e foi nomeado por Onnes com o termo supercondutividade. Apenas dois anos após sua descoberta Onnes foi agraciado com o Prêmio Nobel de Física (BRANÍCIO, 2001).

Uma implicação imediata do fato da resistência ser nula é que é possível sustentar correntes em materiais supercondutores por anos, sem qualquer perda.

A temperatura T_c , na figura 5, é a temperatura crítica na qual o fenômeno da supercondutividade ocorre. A temperatura crítica depende de cada material. Há

outras características que definem um supercondutor, mas estas serão vistas adiante nesse texto.

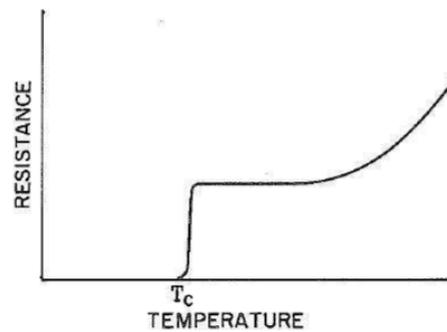


Figura 5. Gráfico mostrando a perda de resistividade em uma amostra supercondutora ao atingir a temperatura crítica.

Fonte: OSTERMANN, 1998.

Logo após esta descoberta inicial, houve uma corrida para descobrir novos materiais supercondutores, ou seja, materiais que apresentassem um comportamento similar ao apresentado pelo mercúrio: quando resfriados sua resistividade diminui do mesmo modo que para os condutores mas, a uma temperatura de poucos graus acima do zero absoluto, a resistividade cai abruptamente a zero e o material passa, então, ao estado supercondutor. Os primeiros materiais pesquisados foram os metais, por serem bons condutores de eletricidade (COSTA e GALVÃO, 2012).

Praticamente todos os metais com propriedades supercondutoras foram identificados, bem como muitas ligas metálicas. Há 30 metais puros que exibem comportamento supercondutor. A Tabela 1 mostra alguns metais e ligas simples que, com o passar do tempo, foram sendo recordistas em altas temperaturas, o ano em que foram descobertos e a temperatura crítica de cada um.

A liga de Nióbio-Germânio manteve o recorde de mais alta temperatura crítica por 13 anos. Essa é a chamada supercondutividade a baixas temperaturas.

Um marco importante ocorreu em 1962 com o primeiro fio supercondutor comercial composto de liga de nióbio e titânio. Voltaremos a tratar dessa liga ainda neste capítulo.

Ano	Material	T _c
1911	Mercúrio	4K
1929	Niobio	9,25
1941	Nitreto de Nióbio	16 K
1953	Vanádio-Silício	17,5
1973	Nióbio-Germânio	23,2

Tabela 1. Alguns metais e ligas metálicas, por ano de descoberta, e suas temperaturas críticas.
Fonte: <http://superconductors.org/History.htm>. Acessado em 14/04/21.

Somente 46 anos após a descoberta da supercondutividade é que houve uma explicação bem sucedida esse fenômeno. Os três físicos John Bardeen, Leon Cooper e Robert Scriver, em 1957, apresentaram um modelo teórico que concordava muito bem com as observações experimentais observadas nos supercondutores. Esse modelo ficou conhecido por Teoria BCS (das iniciais dos autores). Os três receberam o prêmio Nobel ² por essa descoberta, em 1972.

Existia um sentimento na época de que seria impossível encontrar materiais com temperaturas críticas acima desses 23 K, até porque a maioria dos metais já haviam sido testados.

No entanto, em 1986 houve uma “revolução” nas pesquisas envolvendo supercondutividade. Alex Muller e Georg Bednorz descobriram que uma cerâmica feita de lantânio, bário, cobre e oxigênio ($Ba_x La_{5-x} Cu_5 O_{5(3-y)}$) apresentava comportamento supercondutor em 30 K. O notável era que:

- o novo material descoberto tinha comportamento isolante em temperatura ambiente;
- a temperatura crítica era maior que a obtida com os metais e ligas metálicas, bons condutores!

² John Bardeen também recebeu o prêmio Nobel pela invenção do transistor. Até hoje é o único a receber dois prêmios Nobel de Física.

A partir daí, surge uma nova corrida para encontrar novos materiais que, embora fossem isolantes em temperaturas “normais”, fossem supercondutores em uma dada temperatura crítica. Já em janeiro de 1987 foi descoberto um material ($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$) que apresentava temperatura crítica acima de 90K. Esses materiais, que apresentavam cobre em sua composição, foram chamados de Cupratos.

A Tabela 2 mostra alguns desses materiais (não condutores) que, com o passar do tempo mantiveram o recorde de altas temperaturas, o ano em que foram descobertos e a temperatura crítica de cada um.

Ano	Material	T _c
1986	$\text{La}_{2-z}\text{Ba}_x\text{CuO}_4$	30 K
1987	$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$	92 K
1993	$\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8+\delta}$	138 K
2016	$\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{TeCu}_3\text{O}_8$	147 K

Tabela 2. Alguns materiais (não condutores) por ano de descoberta e suas temperaturas críticas.
Fonte: <http://superconductors.org/History.htm>. Acessado em 14/04/21.

A cerâmica YBCO é obtida substituindo o lantânio por ítrio na formula de Muller e Bednorz. Essa descoberta foi de extrema importância porque sua temperatura crítica excedia a do nitrogênio líquido (que é de 77 K), um líquido comum de refrigeração.

Até 2001 pode-se dizer que as pesquisas em supercondutividade estavam voltadas à busca por compostos de materiais não condutores, tendo em vista o sucesso das sucessivas descobertas, que culminavam em temperaturas críticas cada vez maiores, com incríveis 138K. Em 2001 surge um novo marco nas pesquisas: é descoberto um novo composto metálico, o MgB_2 , que tem temperatura crítica de 39,2 K.

Embora essa temperatura seja baixa comparada com as temperaturas críticas dos compostos isolantes, é alta em relação à temperatura das ligas metálicas conhecidas até 1986. A partir dessa descoberta os supercondutores passam a ser classificados como do Tipo I e do Tipo II, que detalharemos na próxima seção.

3.3. Tipos de supercondutores

Como vimos acima, os supercondutores são divididos em dois tipos – chamados de Tipo I e Tipo II – de acordo com as suas propriedades. No que segue veremos como se distinguem os dois tipos.

Supercondutores do Tipo I:

- são formados principalmente pelos metais e algumas ligas metálicas;
- em geral, são condutores de eletricidade à temperatura ambiente;
- suas temperaturas críticas são muito baixas;
- o campo magnético crítico (acima do qual a supercondutividade cessa) é relativamente baixo;
- a mudança para o estado supercondutor ocorre abruptamente e é acompanhada pelo efeito Meissner (que será detalhado adiante)
- consegue-se a temperatura crítica com hélio líquido (caro)
- são explicados pela teoria BCS.

A tabela 3 mostra os 27 metais supercondutores do Tipo I com suas respectivas temperaturas críticas. Praticamente a metade dos metais exhibe comportamento supercondutor.

Mat.	T _c (K)	Mat.	T _c (K)	Mat.	T _c (K)
Rh	0	Gd*	1.1	Zr	0.546
W	0.015	Al	1.2	Cd	0.56
Be**	0.026	Pa	1.4	U	0.2
Ir	0.1	Th	1.4	Ti	0.39
Lu	0.1	Re	1.4	Zn	0.85
Hf	0.1	Tl	2.39	Ga	1.083
Ru	0.5	In	3.408	Ta	4.47
Os	0.7	Sn	3.722	La	6.00
Mo	0.92	Hg	4.153	Pb	7.193

Tabela 3. Alguns materiais supercondutores do Tipo I.

Fonte: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Solids/scond.html>. Acessado em 06/05/21.

Três metais que inicialmente foram classificados como sendo do Tipo I, hoje sabe-se que são do Tipo II. São eles: o Vanádio ($T_c = 5,38$ K) o Nióbio ($T_c = 9,46$ K) e o Tecnésio ($T_c = 7,77$ K)

Uma observação importante é que nem todos os bons condutores à temperatura ambiente (como o cobre, o ouro e a prata) apresentam comportamento supercondutor, mesmo em temperaturas baixíssimas.

Embora sua importância histórica e também para o entendimento da própria supercondutividade, os supercondutores do Tipo I tem aplicações práticas limitadas, tanto por suas baixas temperaturas muito difíceis e caras de alcançar como pelos baixos campos magnéticos críticos com que deixam o estado supercondutor.

Supercondutores do Tipo II:

- são formados por ligas metálicas e outros compostos, como óxidos de cobre
- não necessariamente são condutores a temperatura ambiente;
- as temperaturas críticas são muito mais altas que as dos supercondutores do Tipo I;
- campo magnético crítico (acima do qual a supercondutividade cessa) é bem mais alto do que aqueles do Tipo I;
- a mudança para o estado supercondutor ocorre de forma gradual e o efeito Meissner (que será detalhado adiante) não é perfeito.
- consegue-se a temperatura crítica com Nitrogênio líquido (barato)
- Não são explicados pela teoria BCS e os mecanismos que levam à supercondutividade ainda não são completamente explicados.

A Figura 6 mostra como se dá a transição para a fase supercondutora para os supercondutores. À esquerda, para o Tipo I e à direita para o Tipo II.

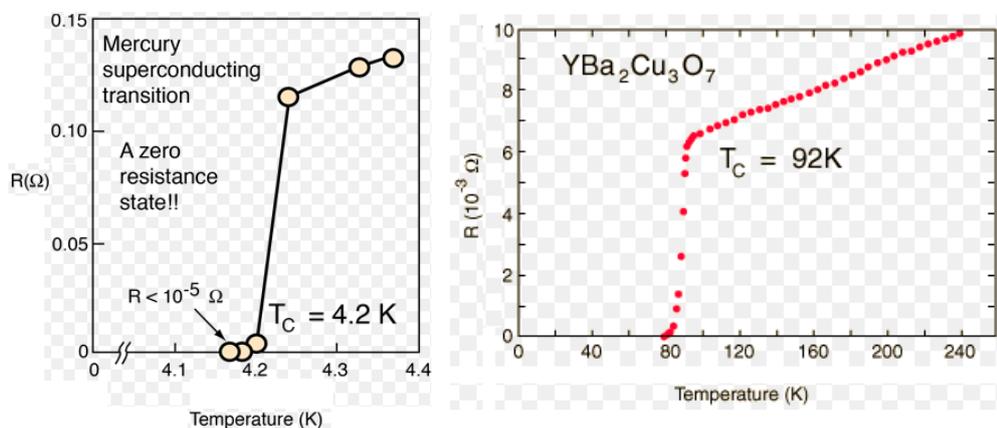


Figura 6. Transição de fase para supercondutores do Tipo I e II.

Fonte: adaptado de <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Solids/scex.html>. Acessado em 24/04/21.

A tabela 4 mostra alguns supercondutores do Tipo II. Em (a) estão compostos cerâmicos; em (b) estão os metais e ligas metálicas.

Material cerâmico	T _c recorde (K)	Metais (ligas)	T _c recorde (K)
Hg _{0,8} Tl _{0,2} Ba ₂ Ca ₂ Cu ₃ O _{8,33}	138	MgB ₂	39,2
Bi ₂ Sr ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₁₀	115	Nb ₃ Ge	23,2
Ca _{1-x} Sr _x CuO ₂	110	Nb	9,25
TmBa ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₇	101	Tc	7,80
YBa ₂ Cu ₃ O ₇	93	V	5,40
La _{1,85} Ba _{1,15} CuO ₄	35		

Tabela 4. Alguns materiais supercondutores do Tipo II. Em (a) material cerâmicos; em (b) metais e ligas.

Fonte: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/3565134/mod_resource/content/1/QFL-1101%20-%2016a%20aula%20-%20Supercondutores%20%2829-05-2017%293.pdf. Acessado em 06/05/21.

3.4. Diamagnetismo, ferromagnetismo e paramagnetismo

Além da resistividade nula, outra característica dos supercondutores é que são um diamagnético perfeito. Nesta seção, explicaremos as diferenças entre os materiais ferromagnéticos, paramagnéticos e diamagnéticos; na próxima seção trataremos do efeito Meissner, uma consequência do diamagnetismo perfeito dos supercondutores.

Antes de definirmos um dos importantes efeitos da supercondutividade é necessário entendermos como os materiais reagem à ação de um campo magnético externo. Neste caso, há três tipos de materiais: os diamagnéticos, os paramagnéticos e os ferromagnéticos (HALLIDAY *et al*, 2016).

Materiais ferromagnéticos

São ferromagnéticos os elementos que são “fortemente” atraídos por um ímã, como o ferro. Outros exemplos são o Cobalto e o Níquel e ligas metálicas desses elementos. É o tipo comum de magnetismo que estamos acostumados (ímã atraindo pregos)

Nestes materiais, em temperatura ambiente, o alinhamento dos momentos magnéticos é tão rigoroso que não é perturbado pela agitação térmica.

O magnetismo de materiais ferromagnéticos só é perdido acima da temperatura de Curie (e o material torna-se paramagnético). Exemplo: o ferro deixa de ser ferromagnético a temperaturas acima de 770 °C.

O ferromagnetismo é uma função do átomo individual e também uma consequência da interação desses átomos com seus vizinhos na rede cristalina.

Materiais paramagnéticos

Estes materiais são fracamente atraídos por um ímã (campo magnético externo).

Quando uma amostra de material paramagnético é colocada num campo magnético externo, os dipolos magnéticos tendem a se orientar paralelamente com o campo, intensificando-o. Essa tendência de alinhamento é o paramagnetismo.

No entanto, essa tendência de alinhamento é prejudicada pela agitação térmica (temperatura). Em função da agitação térmica os átomos colidem entre si; em algumas colisões a energia cinética se transfere para os átomos que estão com os momentos alinhados e rompe o seu alinhamento.

São exemplos de materiais paramagnéticos: Alumínio, Magnésio, Sulfato de Cobre.

Materiais diamagnéticos

Os materiais diamagnéticos são aqueles que, quando submetidos a um campo magnético externo tem o campo magnético em seu interior enfraquecido, ou seja, esses materiais repelem o campo magnético externo.

Esta característica é consequência da Lei de Indução de Faraday e está presente em todos os átomos. Devido ao movimento orbital dos elétrons em torno do núcleo, estes criam um campo magnético (induzido pelo movimento orbital dos elétrons); quando um campo externo é aplicado no material, o sentido do campo induzido tende a se alinhar em direção contrária ao campo aplicado, enfraquecendo-o.

Os materiais diamagnéticos interagem fracamente com ímãs e devido ao fato de seus momentos de dipolo magnético tenderem a se alinhar antiparalelamente ao campo externo aplicado eles são repelidos pelo campo (e não atraídos). Esse efeito geralmente é bastante fraco comparado aos outros dois.

Um conceito importante é o de diamagnético perfeito: é aquele material que quando submetido a um campo externo não apresenta campo resultante em seu interior.

São exemplos de materiais ferromagnéticos: Bismuto, Mercúrio, Prata, Chumbo, Diamante, Grafite, Cobre.

3.5. O efeitos Meissner

Quando um supercondutor é submetido a um campo magnético externo o campo magnético é totalmente “expulso” de seu interior, ou seja, o supercondutor é um diamagnético perfeito. Esse é o chamado efeito Meissner. Ele foi descoberto, em 1933, por dois físicos alemães, Walther Meissner e Robert Ochsenfeld.

A figura 7 mostra como as linhas de campo são expulsas do interior de uma amostra supercondutora.

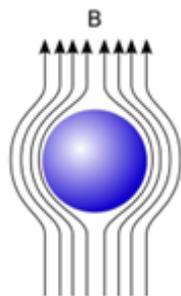


Figura 7. Diamagnetismo perfeito de uma amostra supercondutora.
Fonte: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Diamagnetismo>. Acessado em 13/05/21.

Mostraremos a seguir as diferenças entre um condutor perfeito e um supercondutor.

3.5.1. Propriedades magnéticas de um condutor perfeito

O primeiro ponto a esclarecer é que condutor perfeito e supercondutores são estados distintos. Vamos esclarecer a diferença.

Em primeiro lugar, resistividade nula não implica, necessariamente, em diamagnetismo perfeito: **o estado de magnetização de um condutor perfeito depende da sequência em que o campo magnético externo é aplicado ao material**, conforme representado. Vejamos.

Campo magnético aplicado após o resfriamento – Figura 8

De acordo com a Figura 8, observa-se o momento em que um campo magnético é aplicado na amostra condutora.

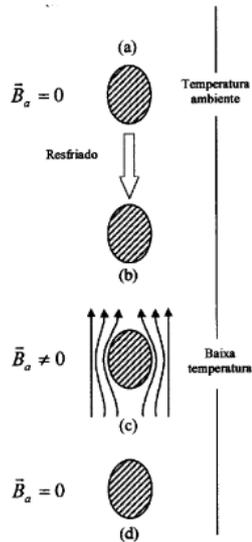


Figura 8. Aplicação de campo magnético, antes do resfriamento, em uma amostra condutora.

Fonte: OSTERMANN *et al*, 1998a.

Observa-se da figura 8 que o campo magnético foi aplicado após o resfriamento a baixas temperaturas, (de tal modo que a resistividade fique desprezível) e depois retirado; neste caso o material condutor ficará não magnetizado. Vejamos um passo-a-passo do procedimento experimental:

- Na figura 8a o material está em temperatura ambiente e não há campo magnético aplicado;
- A figura 8b indica que, ainda na ausência de campo magnético externo, a amostra será resfriada a baixas temperaturas até que fique com resistividade desprezível;
- A figura 8 c mostra um campo magnético externo sendo aplicado na amostra resfriada. As linhas de campo também são mostradas. Observe que no interior da amostra não há campo magnético.
- O campo é retirado (figura 8d). O material não fica magnetizado.

Campo magnético aplicado antes do resfriamento – Figura 9

Nesta nova situação, o momento em que o campo magnético é aplicado muda: ele é aplicado antes do resfriamento, conforme indica a Figura 9.

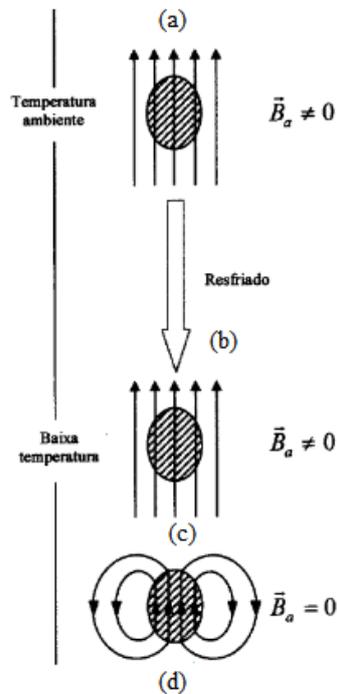


Figura 9. Aplicação de campo magnético, depois do resfriamento, em uma condutora.
Fonte: OSTERMANN *et al*, 1998a.

Na situação mostrada na Figura 9, quando o campo magnético é retirado o material condutor fica magnetizado. Vejamos um passo-a-passo do procedimento experimental:

- A Figura 9a mostra que ainda em temperatura ambiente o material é submetido a um campo magnético externo;
- Ainda na presença do campo o material é resfriado até que fique com a resistividade desprezível. As linhas de campo (figura 9b) mostram que há campo magnético no interior da amostra, ou seja, ela está magnetizada;
- A figura 9c mostra a amostra quando o campo aplicado magnético aplicado foi retirado. Observe-se que a amostra permanece magnetizada.

A explicação para o campo magnético no interior da amostra mesmo quando o campo magnético é retirado reside na Lei da Indução Eletromagnética. Durante a redução do campo magnético (até chegar ao valor zero), o fluxo magnético varia e, como consequência da Lei da Indução, correntes parasitas são induzidas no material, resultando numa magnetização permanente do material.

Comparando as figuras 8c e 9c observa-se que, embora submetidos às mesmas condições externas (mesmas temperatura e campo magnético externo) a condição de magnetização é diferente. O mesmo acontece quando o campo magnético é retirado (figuras 8d e 9d). A conclusão é que, para um condutor perfeito, o estado de magnetização não é determinado apenas pelas condições externas, mas sim pela **sequência** em que as condições foram obtidas.

Na próxima seção veremos como se dá o processo de magnetização para um supercondutor.

3.5.2. Propriedades magnéticas de um supercondutor

Durante bastante tempo acreditou-se que a magnetização dos supercondutores fosse similar à do condutor perfeito. Foram Meissner e Ochsenfeld que, em 1933, descobriram que os comportamentos não eram similares. Eles fizeram um procedimento similar ao descrito anteriormente para condutores perfeitos, mas agora com amostras supercondutoras de Estanho e Chumbo. O resultado obtido foi independente da sequência em que o campo magnético foi aplicado em relação ao resfriamento: em ambos os casos, as amostras ficavam magnetizadas enquanto o campo era mantido e quando o campo foi retirado ambas as amostras não ficaram magnetizadas (figura 10), ou seja, em ambos os casos os supercondutores se tornaram diamagnéticos perfeitos.

Podemos concluir dizendo que, diferente dos condutores perfeitos, para os supercondutores a condição de magnetização depende apenas das condições externas a que o material está submetido (temperatura e campo magnético externo).

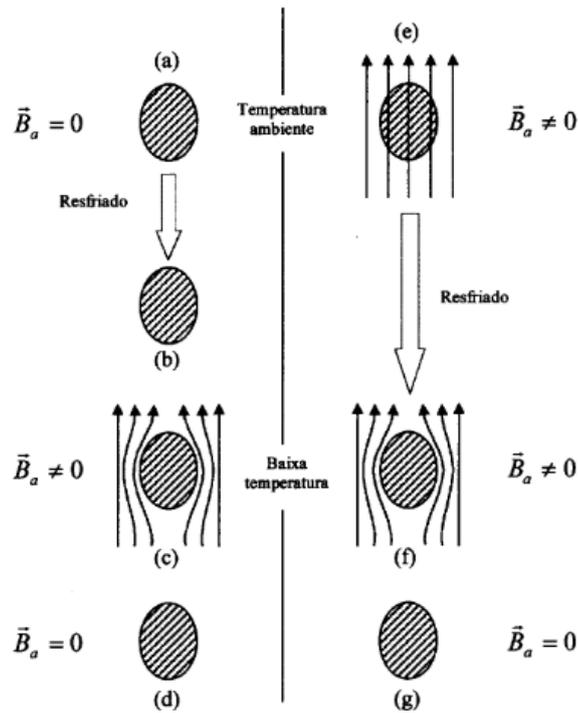


Figura 10. Experimento realizado com amostra supercondutora. À esquerda o resfriamento da amostra é feito antes da aplicação do campo magnético. À direita a amostra é resfriada depois da aplicação do campo.

Fonte: OSTERMANN *et al*, 1998a.

Dentro de um material no estado supercondutor, o campo magnético é sempre zero. Essa expulsão das linhas de campo do interior de um supercondutor é o chamado Efeito Meissner.

Conclusão importante advindo dos experimentos acima é que *um supercondutor não é tão somente um condutor com resistividade nula e sim um novo estado da matéria com propriedades particulares.*

O Efeito Meissner somente acontece quando o campo magnético externo tem um determinado valor limite (campo crítico); o valor desse campo crítico depende de cada supercondutor. Caso o campo aumente em demasia, superando o campo crítico, o campo penetrará no material (e o estado supercondutor se perde, como veremos adiante). Ainda neste capítulo veremos uma importante consequência do Efeito Meissner: a levitação magnética.

3.6. Campo crítico e corrente crítica

Na seção em que os supercondutores dos tipos I e II foram diferenciados, foi ressaltado que uma das diferenças entre esses dois tipos é que os campos críticos no qual a supercondutividade cessa é maior nos supercondutores do Tipo I em relação aos supercondutores do Tipo II. Agora mais detalhes serão apresentados.

Experimentalmente verifica-se que a aplicação de um campo magnético externo ao supercondutor provoca uma diminuição da temperatura crítica. Se o campo magnético for suficientemente forte, o estado supercondutor cessa, ou seja, o material passa a ter um comportamento elétrico normal, com resistividade diferente de zero em qualquer temperatura. Pode-se então, concluir que, existe um campo crítico (à semelhança da existência da temperatura crítica) acima do qual a supercondutividade deixa de existir.

A figura 11 mostra um esquema geral do comportamento do campo magnético crítico em função da temperatura para supercondutores do Tipo I. Os supercondutores do Tipo II se comportam de um modo diferente, tendo uma região intermediária.

Consequência das constatações acima é que a supercondutividade e o magnetismo são “inimigos” o que leva a não existência de supercondutividade em metais magnéticos³.

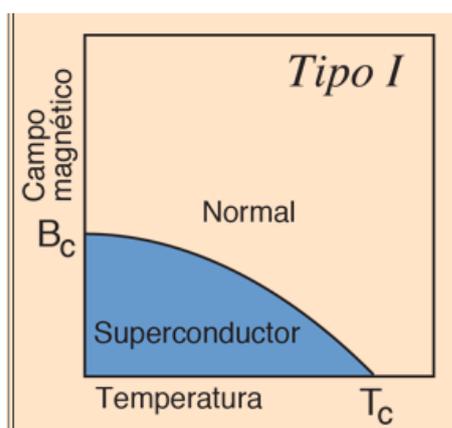


Figura 11. Esquema do gráfico Campo Magnético Crítico por Temperatura Crítica, mostrando os intervalos de valores dos estados normal e supercondutor.

Fonte: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/Solids/scbc.html>. Acessado em 05/05/21.

³ Há exceções, entre eles o ferro.

A figura 12 mostra o gráfico do campo crítico em função da temperatura para vários materiais que apresentam comportamento supercondutor

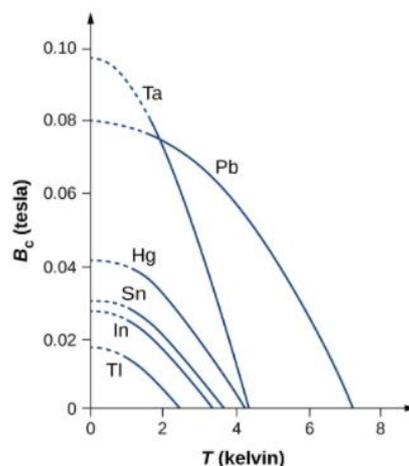


Figura 12. Dependência do campo crítico em função da temperatura para alguns elementos puros.
Fonte: <https://openstax.org/books/university-physics-volume-3/pages/9-8-superconductivity>.
 Acessado em 24/04/21.

Além do campo magnético crítico há também uma corrente elétrica contínua⁴ crítica, ou seja, um valor de corrente elétrica que, ao percorrer o material destrói a supercondutividade. A tabela 5 mostra a temperatura crítica e o campo magnético crítico para alguns materiais do Tipo I e do Tipo II.

Material	Critical Temperature (K)	Critical Magnetic Field (T)
Type I		
Al	1.2	0.011
Ga	1.1	0.0051
Hg (α)	4.2	0.041
In	3.4	0.029
Nb	9.3	0.20
Pb	7.2	0.080
Sn	3.7	0.031
Th	1.4	0.00016
Zn	0.87	0.0053
Type II		
Nb ₃ Al	18	32
Nb ₃ Ge	23	38
Nb ₃ Sn	18	25
NbTi	9.3	15
YBa ₂ Cu ₃ O ₇	92	>100

Tabela 5. Alguns dados de Campo magnético crítico e temperatura crítica.
Fonte: <https://openstax.org/books/university-physics-volume-3/pages/9-8-superconductivity>.
 Acessado em 13/05/21.

⁴ Para correntes alternadas o comportamento é diferente.

É importante frisar uma diferença importantes na escala dos campos críticos entre os supercondutores do Tipo I e do Tipo II. Os campos críticos dos supercondutores do Tipo II são algumas ordens de grandeza maior que os do Tipo I. Essa característica faz que os supercondutores do Tipo II sejam de interesse para aplicações envolvendo campos magnéticos, ao passo que as do Tipo I não tem interesse porque a supercondutividade seria facilmente destruída mesmo pela presença de campos magnéticos muito fracos.

3.7. Pares de Cooper

Antes de apresentarmos a teoria BCS é necessário explicar o que são os pares de Cooper.

O fenômeno da supercondutividade começou realmente a ser entendido em 1956, quando Leon Cooper teve a ideia de que os elétrons que transportam a “supercorrente” se associam em pares enquanto se deslocam pelo material. Vejamos a diferença do que acontece para um material em estado normal e para aqueles em estado supercondutor.

Um elétron normal que se desloca pela rede cristalina de um condutor vai se chocando com os átomos da rede, perdendo energia e aquecendo o material. Isso é chamado de “efeito Joule” e ocorre em todo condutor normal. Ainda, normalmente, dois elétrons, ambos com carga negativa, não podem chegar perto um do outro por causa da forte repulsão Coulombiana. E é justamente aqui que entra Cooper.

Cooper sugere que, dentro de um sólido metálico, dois elétrons poderiam vencer essa repulsão mútua com a ajuda de uma excitação da rede cristalina do material⁵.

É importante entender que os átomos da rede cristalina de um metal não são eletricamente neutros pois normalmente eles perdem elétrons e se tornaram positivamente carregados. São esses elétrons perdidos que transportam a corrente elétrica pelo sólido.

⁵ Um fônon é uma excitação mecânica que se propaga, como uma onda pela rede cristalina de um sólido. Geralmente essa excitação é causada pela agitação natural existente em todo sistema sujeito a uma temperatura finita.

A figura 13 mostra a rede cristalina e dois elétrons que possuem momentos lineares iguais em módulo e direção, mas com sentidos contrários⁶. Numa situação real existe um número alto de elétrons (em certos elementos supercondutores, esse número pode alcançar centenas de milhares, ou milhões).

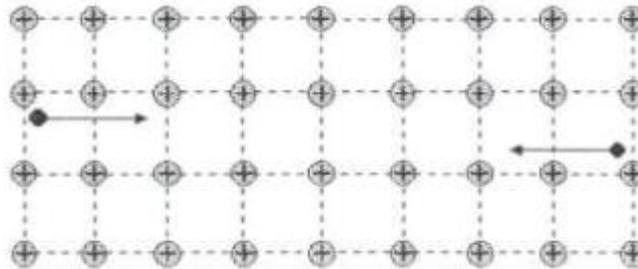


Figura 13. Esquema simplificado de uma rede cristalina e dois elétrons livres.
Fonte: adaptado de OSTERMANN e PUREUR, 2005.

Enquanto se propagam os elétrons interagem com os íons positivos da rede, produzindo uma deformação localizada na configuração da rede (figura 14).

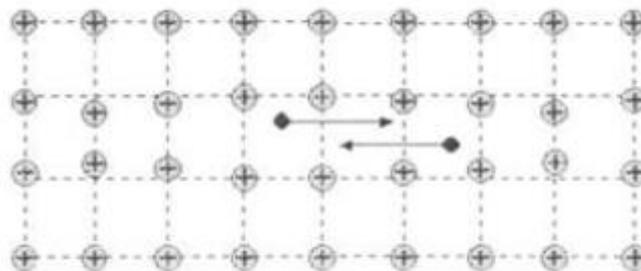


Figura 14. Esquema mostrando a interação entre os elétrons e a rede cristalina e a deformação da rede.
Fonte: adaptado de OSTERMANN e PUREUR, 2005.

Como consequência dessa deformação, há um aumento localizado da densidade de cargas positivas que foram atravessadas pelos elétrons que vinham de direções contrárias (figura 15). Em condições de baixa temperatura (baixa vibração atômica) essa atração pode produzir um par de elétrons fracamente ligados, que viajam em conjunto pelo sólido. O que acontece é que, para cada elétron, a atração destes com as regiões de alta densidade de íons positivos é maior que a repulsão entre eles. Esses são os chamados pares de Cooper.

⁶ Os spins dos elétrons do par são opostos, ou seja, os momentos magnéticos intrínsecos do par apontam em direções opostas.

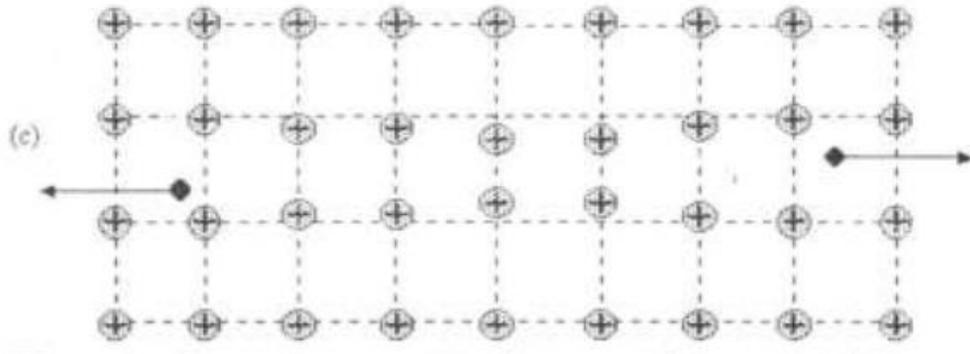


Figura 15. Esquema simplificado mostrando a formação de pares de Cooper.
Fonte: adaptado de OSTERMANN e PUREUR, 2005.

Embora formados por elétrons de condução, estes não podem ser considerados como entidades isoladas (partículas independentes); eles formam um estado de elétrons interdependentes cujos movimentos são complexamente interconectados uns aos outros. Essa é a essência da teoria microscópica da supercondutividade, a teoria BCS, que detalharemos na próxima seção.

O condensado resultante se comporta como um coletivo quântico que se estende por escalas de tamanho macroscópico (PUREUR, 2012).

Um campo elétrico aplicado altera a propagação de elétrons individualmente, mas não desse condensado como um todo. Isso explica porque em um supercondutor uma corrente elétrica se propaga sem encontrar resistência.

3.8. Teoria BCS

Vimos que quase cinco décadas se passaram entre a descoberta da supercondutividade e uma teoria bem sucedida que a explicasse.

A ideia central da teoria consiste na formação dos pares de Cooper, conforme mostrado na seção anterior. O que a teoria BCS faz é explicar os motivos que fazem os pares de Cooper conseguirem se deslocar sem impedimentos pela rede cristalina, ao passo que os elétrons individuais, sofrem resistência.

A teoria BCS mostra que os elétrons dos pares de Cooper têm energia ligeiramente inferior à energia dos elétrons individuais (que não formam par). Em termos técnicos, diz-se que existe um “gap” de energia separando os elétrons do par (par de Cooper) dos elétrons normais (não emparelhados).

Quando um elétron, em um condutor normal, interage com os átomos da rede, dá-se uma troca de energia entre eles; essa troca de energia geralmente acontece em toda interação. Como resultado da interação os elétrons podem transferir energia para os átomos; dizemos, então que os átomos estão em um estado excitado (ou simplesmente, “excitados”). Essa energia de interação é responsável pela vibração dos átomos da rede, que provoca aquecimento do material; como consequência há uma resistência ao deslocamento dos elétrons livres.

Com os pares de Cooper a situação descrita acima é diferente. Se os elétrons já tiverem formado o par de Cooper, a interação com os outros átomos da rede só será possível se a energia trocada (entre o par e os átomos da rede) for maior que a energia do “gap”. Assim, quando a temperatura é alta os pares de Cooper não conseguem se formar ou quando se formam são logo aniquilados.

No entanto, ao baixar a temperatura é possível chegar a um valor em que a energia disponível para trocas térmicas seja menor que a energia do “gap”; nessa condição, alguns dos pares de Cooper não são aniquilados pela agitação térmica e mesmo que os elétrons de um par se choquem com átomos da rede, não haverá troca de energia entre eles. Só poderá haver troca de energia se o “gap” for vencido. Havendo choque, ele será elástico (a energia cinética se conserva).

Como vimos, existe uma temperatura, – a temperatura crítica, T_c – diferente para cada material, na qual o material se torna supercondutor. Essa temperatura crítica é uma medida do tamanho do “gap” de energia. Em supercondutores típicos conhecidos até a década de 80, a energia do “gap” era da ordem de centésimos de elétron-volts, o que explica que suas temperaturas críticas eram tão baixas.

Até aqui a teoria propõe a existência dos pares de Cooper e como se dá a interação entre os elétrons e os átomos da rede. A fim de verificar essa hipótese, foram feitas medidas de temperaturas críticas em materiais onde alguns os átomos eram trocados por seus isótopos, mais leves ou mais pesados. Se a explicação estivesse correta, essa troca por isótopos deveria afetar a temperatura crítica.

A teoria prevê que a temperatura crítica cai para isótopos mais pesados, de acordo com a relação

$$T_c = AM^{-\alpha} \quad (1)$$

onde A é uma constante, o expoente α é próximo de 0,5 e M é a massa atômica. Observa-se que a relação mostra de um lado uma propriedade dos elétrons (a

temperatura crítica) e de outro uma propriedade nuclear (a massa atômica). Essa relação será explicada a seguir.

Supondo que os átomos vibram em torno de suas posições de equilíbrio como osciladores harmônicos acoplados, tem-se que a frequência angular de vibração é dada por

$$\omega = \sqrt{\frac{K}{M}} \quad (2)$$

onde K é uma constante de mola, relacionada às forças eletrostáticas de interação entre os átomos do sólido.

A energia associada às vibrações da rede é escrita como

$$E_r = hf = \frac{h}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}} \quad (3)$$

Portanto, se a força atrativa que une um par de Cooper tiver origem nas vibrações da rede então, tem-se que a temperatura crítica é proporcional a E_r , o que nos leva a

$$T_c \propto \frac{1}{\sqrt{M}} \quad (4)$$

que está de acordo com a equação (1), que reproduz o efeito de isótopo, com $\alpha=0,5$.

A figura 16 mostra um gráfico da temperatura crítica para o Mercúrio⁷ em função de sua massa isotópica. Observe que a temperatura crítica cai para isótopos mais pesados, confirmando a teoria que prevê uma dependência com o inverso da raiz da massa atômica.

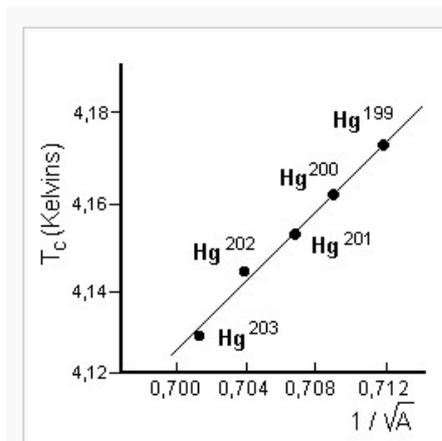


Figura 16. Variação da temperatura crítica com a massa isotópica para o mercúrio.
Fonte: <https://seara.ufc.br/pt/secoes-especiais-de-ciencia-e-tecnologia/secoes-especiais-fisica/supercondutividade/>. Acessado em 12/06/21.

⁷ Os isótopos do Mercúrio têm massas que variam entre 198 e 203.

A teoria BCS também prevê que é o “gap” de energia que controla o valor da temperatura crítica: quanto maior o “gap”, maior a temperatura de transição. De acordo com a teoria:

$$E_{gap} = \frac{7}{2} k_B T_c \quad (5)$$

onde k_B é a conhecida constante de Boltzmann.

A teoria expressa muito bem os resultados experimentais. No gráfico da figura 17 são mostrados a energia do *gap* em função da temperatura crítica para vários supercondutores do Tipo I. A linha reta é a previsão teórica e os pontos são os valores medidos experimentalmente.

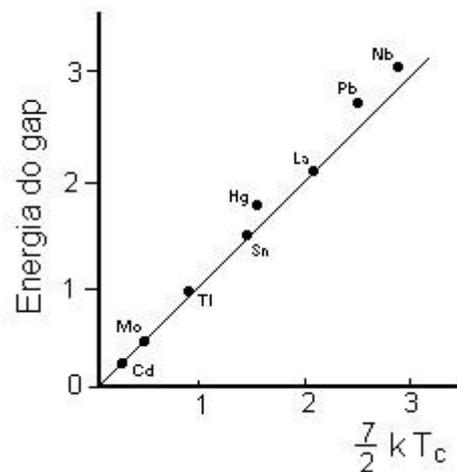


Figura 17. Variação da energia do *gap* com a temperatura crítica.

Fonte: <https://seara.ufc.br/pt/secoes-especiais-de-ciencia-e-tecnologia/secoes-especiais-fisica/supercondutividade/>. Acessado em 12/06/21.

Um outro resultado que a teoria BCS explica é o crescimento exponencial do Calor Específico do condutor quando este se aproxima da temperatura crítica. A relação é dada por:

$$c = A e^{-b/k_b T}, \quad (6)$$

onde A e b são constantes que dependem do material supercondutor.

A figura 18 mostra o resultado experimental de medições do Calor Específico do Vanádio ($T_c = 5,4 K$) em função do inverso da temperatura (para que a curva fique linearizada).

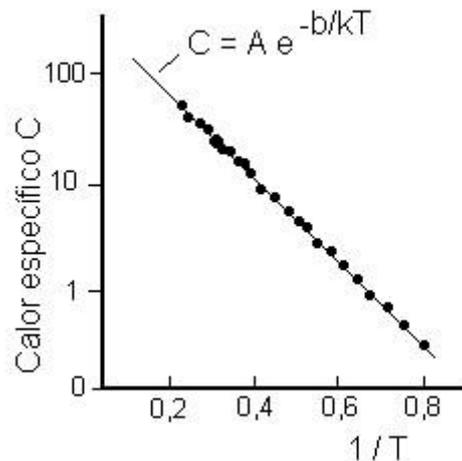


Figura 18. Variação do calor específico do vanádio em função do inverso da temperatura. A inclinação da curva dá a energia de *gap* para o vanádio, que é de 1,3 MeV.

Fonte: <https://seara.ufc.br/pt/secoes-especiais-de-ciencia-e-tecnologia/secoes-especiais-fisica/supercondutividade/>. Acessado em 12/06/21.

Sempre que uma reta é obtida em um gráfico uma informação importante pode ser extraída. Neste caso, é a energia do *gap* que para o Vanádio é de 1,3 meV, que está em acordo com os resultados experimentais.

Além do detalhado acima, a teoria prevê a ocorrência da transição de fase na temperatura crítica, o Efeito Meissner, o campo crítico, o salto do Calor Específico na temperatura crítica, entre outros.

A teoria BCS explicou bem o comportamento dos materiais condutores conhecidos até que, em 1886, um novo tipo de supercondutor foi descoberto. A teoria BCS não explica esse tipo de supercondutividade.

Embora um quarto de século tenha se passado desde a descoberta de Müller e Bednorz, o entendimento das propriedades eletrônicas dos Cupratos supercondutores ainda representa um grande desafio científico. Não há consenso sequer sobre a natureza do mecanismo que leva à formação dos pares de Cooper nesses sistemas. Diversos argumentos sugerem que a interação indireta, mediada pelas vibrações da rede cristalina seja a responsável pelo pareamento nos supercondutores clássicos que, por si só, seria incapaz de assegurar a estabilidade de um par de Cooper em temperaturas da ordem de 100 K. Assim, diversos cenários envolvendo excitações de natureza puramente eletrônica têm sido propostos. Contudo, até o momento, nenhum deles logrou reproduzir todos os aspectos experimentais conhecidos. Além

das dificuldades relativas à descrição do estado supercondutor, a compreensão das propriedades desses sistemas na fase normal também se constitui num dos mais relevantes problemas da Física do Estado Sólido contemporânea. Os Cupratos, segundo o entendimento corrente, não são metais no sentido usual (PUERUR, 2012). Esses sistemas derivam de fases isolantes e magnéticas. Por meio de um processo denominado de dopagem, produzido pela substituição atômica, como no caso do *La-Ba-Cu-O*, ou pela variação no conteúdo de oxigênio, como no caso do YBCO, uma fração dos elétrons de valência se desvincula dos átomos de origem. Tais elétrons ficam aptos a transportar corrente. Porém, entre eles subsistem fortes correlações mútuas. Assim, não é adequado descrever o movimento dos elétrons de condução nos Cupratos supercondutores segundo a concepção válida para os metais clássicos, em que tais partículas podem ser descritas como elétrons independentes e quase livres. Contrastando com a temática científica polêmica e desafiadora, os Cupratos têm decepcionado do ponto de vista tecnológico. Em razão da instabilidade química e de propriedades mecânicas desfavoráveis, tem sido difícil conformar esses materiais em dispositivos práticos. Um exemplo dessas dificuldades é a produção de fios. O desafio consiste, em termos simples, na transformação de uma cerâmica dura e quebradiça em fios flexíveis e contínuos, com propriedades homogêneas em extensões da ordem de alguns quilômetros.

3.9. Aplicações da supercondutividade

Nesta seção apresentamos aplicações possíveis (e potenciais) dos materiais supercondutores. O texto é baseado nas seguintes obras: *O fascinante mundo dos materiais supercondutores* (ARAUJO-MOREIRA, 2002).

A comunidade científica vislumbra inúmeras aplicações para os supercondutores de alta temperatura quando os desafios operacionais forem vencidos. Essas aplicações tecnológicas se baseiam em 04 vantagens que os supercondutores têm em relação aos condutores. São elas:

- Não há perdas de energia na condução de eletricidade o que permite criar dispositivos com altos rendimentos;

- Não dissipam calor, implicando numa melhora de eficiência dos circuitos elétricos;
- Podem gerar campos magnéticos muito intensos;
- Poderiam ser utilizados para fabricar as junções Josephson⁸, uma alternativa mais eficiente que os transistores.

Antes de falar nas aplicações propriamente ditas, é importante observar que elas podem ser agrupadas em dois grandes grupos: aplicações de pequena e de grande escala. Via de regra, as aplicações se relacionam a dispositivos que utilizam grandes valores de campo magnético.

Aplicações de pequena escala

Entre as possíveis aplicações de pequena escala estão aplicações em biomedicina, metrologia, geofísica, processamento digital e dispositivos eletrônicos, como sensores e detectores.

Entretanto, ainda não há aplicações significativas em dispositivos eletrônicos, justamente pela necessidade de operar em baixas temperaturas. No entanto, já estão em desenvolvimento aplicações de materiais supercondutores em circuitos de altíssima integração, que funcionam refrigerados por nitrogênio líquido, nos quais a redução das dimensões dos componentes limita a dissipação térmica.

Somando-se ao transistor e aos circuitos integrados, a supercondutividade propiciará um grande avanço tecnológico para a indústria eletrônica.

Os supercondutores tem potencial como materiais ideais para conexões elétricas, uma vez que conduzem eletricidade sem resistência elétrica, o que reduziria grandemente a dissipação de calor nos circuitos elétricos. Ainda, devido ao diamagnetismo nulo, os supercondutores poderiam eliminar interferência magnética em circuitos integrados.

Um anel de material supercondutor contendo uma ou duas junções Josephson constitui um dispositivo denominado *SQUID* (*Superconducting Quantum interference device*), que é extremamente sensível a sinais magnéticos de fraquíssima

⁸ A junção Josephson é composta pela sequência de materiais supercondutor/isolante/supercondutor.

intensidade. Assim, equipamentos baseados em *SQUIDS* são amplamente empregados na pesquisa de materiais magnéticos em laboratório, na prospecção geológica, na indústria petrolífera e até na área médica, onde atuam como sensores em equipamentos de Magnetoencefalografia⁹. Outra aplicação importante das junções Josephson é na geração e detecção sintonizável de radiação eletromagnética na faixa de frequências de centenas de gigahertz. Também digna de atenção é a possibilidade de emprego de redes de junções Josephson como elementos lógicos em computadores quânticos, que teoricamente têm capacidade de processamento muito superior à dos computadores de lógica binária tradicional.

Aplicações de grande escala

Aqui encontram-se os magnetos multifilamentares para diversas aplicações em:

- física de altas energias,
- imagens por ressonância magnética (MRI),
- reatores de fusão nuclear,
- geradores de magnetohidrodinâmica (MHD),
- usinas de armazenamento de energia,
- magnetos para separação magnética,
- veículos de levitação magnética

Somam-se a essas aplicações as que estão em desenvolvimento em termos de motores elétricos e cabos e linhas de transmissão de eletricidade.

Em termos de intensidade de campo magnético, hoje é possível fabricar magnetos enrolados com fio supercondutor que atingem campos de até 60 T (teslas) operando no modo contínuo, e de até 250 T no modo pulsado.

⁹ Magnetoencefalografia (MEG) é uma técnica de mapeamento da atividade do cérebro humano por meio de detecção de campo magnético produzido por correntes elétricas que existem naturalmente no cérebro

O MAGLEV

Motores elétricos supercondutores eficientes poderiam ser usados em uma nova classe de transportes terrestres e marítimos, dando lugar a uma nova geração de trens, carros e navios. Um exemplo é o *Magnetic Levitation Transport* – MAGLEV – esquematizado na figura 19.

O MAGLEV é um trem de levitação magnética que podem alcançar, atualmente, velocidades da ordem de 600 km/h. Os trens MAGLEV são mais rápidos que os convencionais porque flutuam cerca de dez centímetros acima dos trilhos, em um "colchão magnético". Eliminando as rodas convencionais e fazendo o trem flutuar, o atrito já não limita a velocidade. Nesse caso, apenas existiria o atrito com o ar, que é quase eliminado por meio da aerodinâmica do veículo.

Embora haja inúmeros protótipos, atualmente existe uma única linha comercial em operação, que liga duas cidades chinesas, distantes cerca de 30 km, em apenas 8 minutos! (o que implica numa velocidade de 431 km/h). O Japão anunciou no início de 2020, que terá em operação um MAGLEV em 2027, com velocidade de cerca de 500 km/h. Outros países, como Estados Unidos e Austrália, trabalham para ter MAGLEVS em operação no futuro.

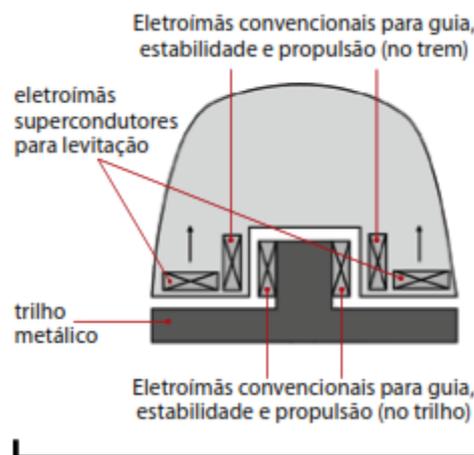


Figura 19. Esquema de um MAGLEV
Fonte: PUREUR, 2012.

4. METODOLOGIA

Inicialmente esse projeto foi desenvolvido para ser aplicado em uma turma de terceiro ano do ensino médio. No entanto, em função da pandemia de covid-19 que assola o planeta e as várias implicações nas escolas brasileiras que estão com o ensino presencial suspenso, foi adaptado para ser aplicado – de modo remoto – a egressos do curso do MNPEF e alunos de graduação em Física.

O produto educacional foi concebido para que a impossibilidade de ministrar aulas experimentais envolvendo supercondutores (devido a não ser possível comprar pastilhas supercondutoras didáticas no mercado nacional) pudesse ser amenizada através de vídeos-experimentos de alta qualidade técnica e instrucional. Assim, para cada grupo de aulas foi elencado os vídeos que deveriam ser assistidos após a leitura do material teórico e das videoaulas correspondentes.

É importante ressaltar que a escolha dos vídeos-experimentos passou por um processo rigoroso de seleção, sendo que buscamos vídeos produzidos por diferentes instituições científicas/acadêmicas em diferentes países. Embora não tenha sido nosso critério de escolha, a maioria dos vídeos que escolhemos foram assistidos por centenas de milhares de pessoas.

O material instrucional consta de duas partes indissociáveis: a parte conceitual que neste texto está no Capítulo 3 e o Produto Educacional propriamente dito, que conforme já mencionamos está no Apêndice A. O conteúdo foi distribuído em 15 horas-aulas, com a estruturação indicada no Quadro 1.

Além dos vídeo-experimentos as atividades foram desenvolvidas de modo a contribuir para que os participantes pudessem fixar o conteúdo e ter oportunidade de revisar os conceitos aprendidos na aula, além de explorar os temas abordados nos vídeos. Também primamos por proporcionar momentos lúdicos durante a realização das atividades, com caça-palavras, palavras cruzadas e a proposta de *Quiz* rápido (a ser ministrado preferencialmente de modo online, com uso de plataformas como o *Kahoot!*).

Diante da necessidade de adequação ao ensino remoto, as aulas foram configuradas do seguinte modo:

- as aulas teóricas foram ministradas de forma assíncrona, ou seja, através de videoaulas. Para cada aula foi disponibilizado na plataforma Google Sala de Aula:

arquivo com conteúdo teórico, slides em *power point* que foram utilizados na gravação, o arquivo com a videoaula e as atividades correspondentes;

- todos os vídeos foram inseridos na íntegra na videoaula, de modo que os estudantes entendessem que eles estavam incorporados à aula;

- as aulas reservadas a esclarecimentos de dúvidas e resolução das atividades foram ministradas de forma síncrona, em diferentes horários, de modo a contemplar as necessidades dos diversos participantes;

- as atividades avaliativas foram realizadas de forma assíncrona com a utilização da plataforma Google Formulários.

A atividade avaliativa consistiu de 02 partes: uma de avaliação de conteúdo e outra em que os participantes deveriam expressar suas opiniões sobre o ensino remoto e sobre o papel que os vídeos experimentos possam ter desempenhado em suas aprendizagens. As respostas obtidas foram analisadas e tratadas estatisticamente e serão apresentadas no Capítulo 6.

Quadro 1 - Cronograma de encontros e aplicações

CONTEÚDO	Horas-aula
<ul style="list-style-type: none">• Introdução ao curso• Revisão de conceitos importantes	01
<ul style="list-style-type: none">• História de Supercondutividade• Propriedades magnéticas da matéria	02
<ul style="list-style-type: none">• O efeito Meissner• Temperatura, campo e corrente críticos	01
<ul style="list-style-type: none">• Pares de Cooper• Teoria BCS	02
<ul style="list-style-type: none">• Aplicações da supercondutividade	01
<ul style="list-style-type: none">• Aulas de resolução de atividades	06
<ul style="list-style-type: none">• Atividade avaliativa	02
Total	15

5. RELATOS DA APLICAÇÃO

Apresentaremos neste capítulo um relato crítico da aplicação de nosso produto educacional em sala de aula.

Para acompanhar esse capítulo é necessário recorrer aos Apêndices A (Produto Educacional) e ao capítulo 3 dessa dissertação.

Diante do convite feito aos egressos e estudantes da graduação para que participassem de nosso trabalho, 12 estudantes se inscreveram, sendo 3 deles estudantes de graduação do curso de Física. No entanto, diante de toda a complexidade do momento que estamos vivendo, apenas seis participantes frequentaram o curso..

Já antevendo problemas de agendas, tendo em vista a ecleticidade da turma, pois a maioria dos inscritos era composta de professores em pleno exercício da atividade laboral, optamos por ofertar as aulas teóricas de forma assíncrona de modo a garantir a maior participação possível. Além da questão de agenda, a maioria estava vivenciando a necessidade de se adequar, em tempo recorde, às novas tecnologias educacionais, para que pudessem ministrar suas próprias aulas também no ensino remoto. Para as aulas de resolução de exercícios reservamos 04 horários distintos, de modo também a abranger o maior número possível de participantes. A avaliação e a pesquisa de opinião, pelos mesmos motivos facilitadores, também foram aplicadas de maneira assíncrona.

Como o material foi disponibilizado em uma turma na plataforma Google Sala de Aula foi possível acompanhar como estava o acesso ao material, uma vez que a plataforma registra toda a atividade dos participantes. Percebemos que a maioria dos estudantes não baixou o material na frequência sugerida nas instruções. Acreditamos que este fato se deu por absoluta falta de tempo, tendo em vista que de início estavam bastante empolgados com a participação.

A metodologia que sugerimos que os participantes seguissem, para cada uma das aulas foi a seguinte:

- assistir a videoaula com conteúdo teórico;
- na sequência assistir – criticamente – os vídeos didáticos indicados;
- iniciar a resolução dos exercícios referentes ao conteúdo da aula;
- postar dúvidas e comentários nos chats e participar da aula síncrona.

Como uma característica do ensino remoto, a interatividade com o professor se dá através de plataformas virtuais (*whatsapp*, e-mail, chats do Google Sala de Aula). Em nosso caso foi amplamente sugerido que a interação se desse através do Sala de Aula, através do fórum e de chats. Outra possibilidade seria por troca de e-mails entre toda a turma. Dos participantes apenas um utilizou estes recursos de maneira sistemática, embora os demais tenham utilizado de maneira esporádica.

Já em meados do curso percebemos uma preferência dos participantes por um estudo individualizado. Apesar das exortações a que manifestassem dúvidas ou comentários, à exceção dos casos já citados, só pudemos ter a dimensão de como os estudantes estavam processando o material estudado nas aulas síncronas.

Na primeira aula síncrona foi possível perceber que os participantes tinham estudado o material didático e que tiveram um bom proveito. Disseram que o assunto era complexo, mas que o texto estava escrito de maneira clara, objetiva e direta - o que facilitou a compreensão. A participação dos presentes foi segura. Eles mostraram confiança ao discorrer sobre o assunto e na resolução das atividades da aula. Outro ponto a ser destacado é que os alunos expressaram espontaneamente a importância dos vídeos-experimentos para a compreensão do conteúdo e como motivador para continuar com as aulas.

Os vídeos apresentados foram feitos por universidades, como a UCLA (Universidade da Califórnia em Los Angeles) e também por canais de divulgação científica, como o *TED*, a *Brittanica* e o *Royal College*. Alguns vídeos foram vistos por milhões de pessoas ao redor do planeta e discutimos o significado de ter esse tipo de material a um clique. Voltaremos a esse ponto no próximo capítulo. As figuras 20 – 23, mostram uma montagem com a tela de apresentação de alguns vídeos, evidenciando o número de visualizações.



Figura 20. Fotografia da tela do computador, aberta no site que armazena um vídeo com experimentação com supercondutores.
Fonte: https://www.ted.com/talks/boaz_almog_the_levitating_superconductor. Acessado em 24/06/21.



Figura 21. Fotografia da tela do computador, aberta no site que armazena um vídeo com experimentação diferenciando materiais diamagnéticos, paramagnéticos e ferromagnéticos.
Fonte: <https://www.youtube.com/watch?v=u36OpPvEh2c>. Acessado em 24/06/21.



Figura 22. Fotografia da tela do computador, aberta no site que armazena um vídeo com experimentação mostrando o amortecimento magnético.

Fonte: <https://www.youtube.com/watch?v=5BeFoz3Ypo4>. Acessado em 24/06/21.



Figura 23. Fotografia da tela do computador, aberta no site que armazena um vídeo com experimentação mostrando a levitação supercondutora.

Fonte: <https://www.youtube.com/watch?v=VyOtIsnG71U>. Acessado em 24/06/21.

As demais aulas síncronas seguiram a mesma dinâmica da primeira. Os participantes já estavam mais à vontade e conseguiram participar bem ativamente da aula, sempre se referindo aos vídeos-experimentos e sua importância para a compreensão do conteúdo, que entendiam como complexo.

Na metade do curso percebemos que os estudantes estavam bem familiarizados com a terminologia dos conceitos que envolvem a Supercondutividade, tendo incorporado o vocabulário específico sobre o tema e que já verbalizaram alguns conceitos espontaneamente.

Como foi nossa intenção desde a concepção do material didático, os momentos de resolução das atividades foram bastante descontraídos, o que favoreceu a aprendizagem, pois além do caráter lúdico havia também a ideia de competitividade entre os participantes, como na resolução do caça-palavras ou do *Quiz*. A figura 24 mostra uma atividade concebida para que os participantes pudessem, ao mesmo tempo que fixavam o conteúdo, descontraír e interagir uns com os outros, ainda que virtualmente.

IV. Observe os cartões abaixo. Agrupe dois números de tal forma a completar as informações. Cada informação em um cartão só se complementa por uma outra de um único cartão.

Material Paramagnético paramagnético 1	Passagem ao estado supercondutor de maneira abrupta 2	são repelidos por um campo externo 3	bons condutores elétricos 4
São os chamados Supercondutores De alta temperatura 5	perde o magnetismo acima da temperatura de Curie 6	supercondutor do tipo I 7	material diamagnético 8
O alinhamento dos Momentos magnéticos É perturbado pela Agitação térmica 9	baixa resistividade elétrica 10	material paramagnético 11	supercondutor do tipo II 12

Pares: _____

Figura 24. Uma das atividades propostas no produto educacional.
Fonte: o autor.

Um momento de crucial importância na utilização de material de apoio às aulas teóricas e que foi corroborado pelos estudantes foi a utilização da simulação sobre os pares de Cooper. Apresentamos uma simulação que mostra com mestria como se formam os pares de Cooper e como estes pares são bósons e não férmions (como os elétrons individuais). Esse foi o único vídeo que editamos, legendando-o e armazenando em arquivo próprio. A figura 25 mostra uma fotografia da tela da simulação (original).

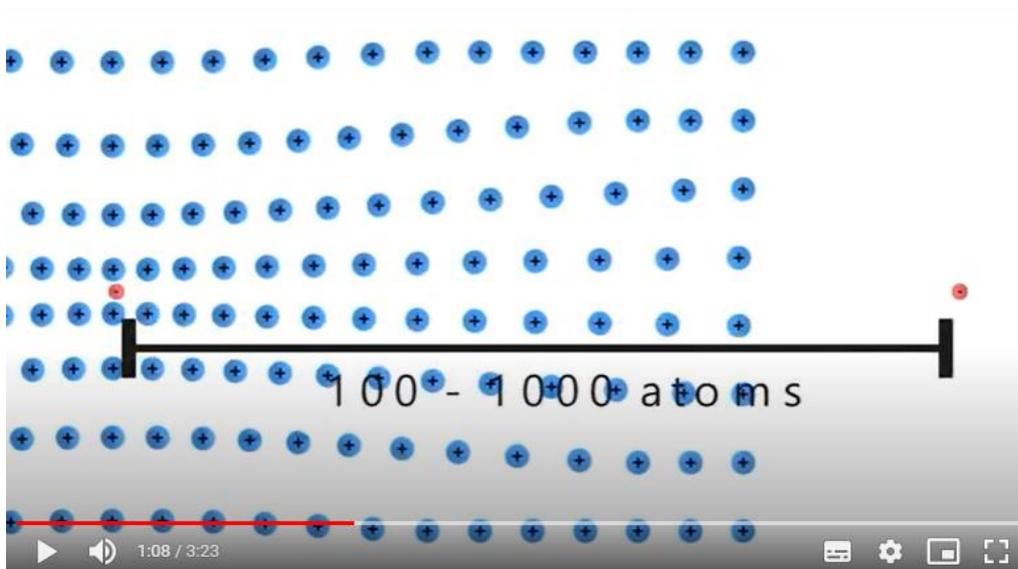


Figura 25. Uma das atividades propostas no produto educacional.

Fonte: https://www.reddit.com/r/Physics/comments/a4aaz/new_animated_video_about_the_physics_of/. Acessado em 24/06/21.

Finalizamos o conteúdo solicitando aos participantes que pesquisassem como está o estado de arte na pesquisa sobre aplicações da supercondutividade e tivemos um bom engajamento.

O momento avaliativo foi composto por duas partes. A primeira dizia respeito à avaliação dos participantes quanto a aprendizagem do conteúdo. O segundo tratou de verificar que importância os alunos dariam na utilização dos vídeos experimentos durante as aulas e ainda, como enxergam o ensino remoto, na condição de alunos e não de professores (perguntas para os que já são professores). A íntegra dos questionários está nos Apêndices B e C. Os resultados e discussões acerca das respostas serão vistos no próximo capítulo.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Tendo feito um relato da implementação de nosso produto educacional em sala de aula apresentaremos os resultados – qualitativos e quantitativos – obtidos no processo avaliativo e nossa análise sobre os resultados assim resultados assim obtidos.

Antes de prosseguir, é importante tecer algumas considerações sobre o que estamos entendendo como processo avaliativo. Um dos quesitos que podem mensurar o sucesso de nosso trabalho, por certo, é a aprendizagem técnica dos conteúdos ministrados, culminando com uma visão geral do fenômeno da supercondutividade. Diante da complexidade do tema e da natureza de nossas aulas, é de se esperar que os participantes tenham adquirido uma visão geral, qualitativa do assunto. Também esperamos que as aulas tenham contribuído para promover divulgação científica, despertado a curiosidade e o interesse por assuntos extracurriculares. Tudo isso em consonância com os objetivos propostos neste trabalho. E como nosso público foi composto por professores de Física e também por formandos em Licenciatura em Física, a própria Metodologia que utilizamos centrada em vídeo-experimentos deve ser avaliada para tentarmos medir seu potencial como facilitador do ensino-aprendizagem. E ainda, um novo fator a ser mensurado: o ensino remoto emergencial, que foi um desafio tanto para este professor regente quanto para os participantes do curso.

Fizemos essas considerações para evidenciar que entendemos o processo avaliativo, neste trabalho, como algo complexo, envolvendo diferentes atores e várias variáveis. Ao final o resultado é mais do que conseguimos quantificar num teste ou numa prova, embora entendamos que esses recursos sejam importantes. Enfim, é preciso analisar o todo e esse todo, na nossa análise, foi bastante satisfatório.

Com isso em mente, faremos agora a discussão quantitativa, que corrobora nossa análise de “conjunto da obra”. Conforme já informamos no texto, o processo avaliativo consistiu de duas etapas: i) teste de conteúdo; e ii) pesquisa de opinião sobre importância dos vídeos-experimentos e sobre o ensino remoto. Começaremos por descrever o teste avaliativo de conteúdo.

O teste, apesar de seu caráter também avaliativo, objetivou ser mais um momento para que os estudantes pudessem se debruçar sobre o tema e, dessa forma, aprofundar o entendimento sobre o mesmo. No teste constavam questões que pudessem efetivamente ser respondidas com um conhecimento base sobre supercondutividade, evitando questões complexas e numéricas que, num curso tão curto, onde se objetivava que os alunos entendessem conceitos básicos, não foram tratadas com profundidade.

O teste foi respondido diretamente no Google Formulário, de forma assíncrona, com tempo suficiente para que os estudantes revisitassem o conteúdo, caso achassem necessário. A íntegra do teste pode ser visualizada no Apêndice B ou diretamente no link https://docs.google.com/forms/d/1cGc_9jimtqhoLFIYpWtMD7qTlzZgzETScnEgL6bxwDE/edit.

Elaboramos um total de 12 questões que englobaram todo o conteúdo ministrado. As questões foram elaboradas de modo a verificar o entendimento de conceitos básicos necessários à compreensão da supercondutividade, das condições necessárias para que o material atinja o estados condutor, do efeito Meissner e do que são os pares de Cooper. A íntegra das respostas pode ser vista no link https://docs.google.com/forms/d/1cGc_9jimtqhoLFIYpWtMD7qTlzZgzETScnEgL6bxwDE/edit#responses. O resultado assim obtido está apresentado na figura 26.

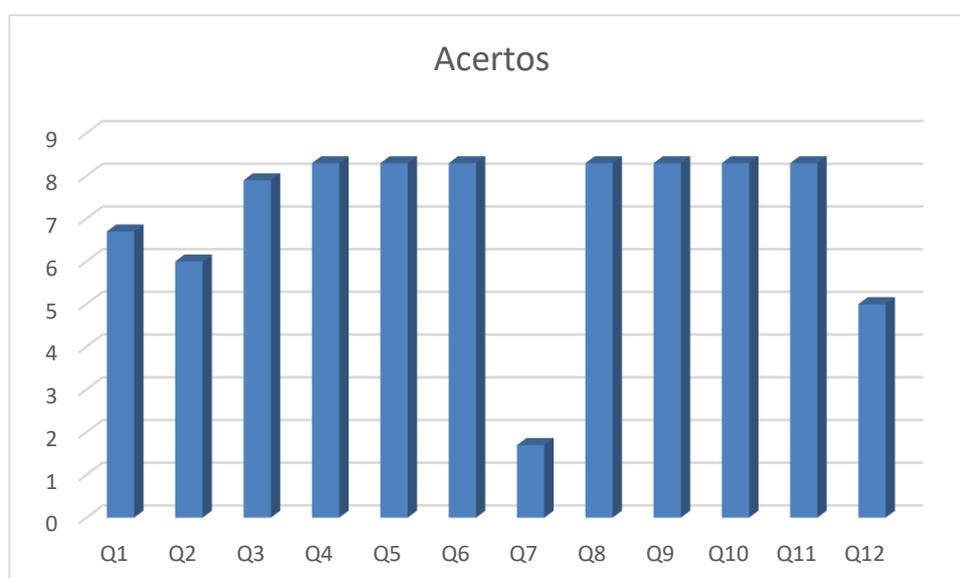


Figura 26. Gráfico indicando o número de acertos por questão na atividade avaliativa
Fonte: o autor.

O enunciado de cada questão pode ser visto no Apêndice B ou no link disponibilizado acima. A questão 3 é de associação entre linhas e colunas. Para chegar ao resultado de acertos fizemos uma média das respostas corretas; a questão 10 aceitava mais de uma alternativa correta e também fizemos um média dos acertos.

No processo de correção, identificamos que parte dos erros estavam relacionados à confusão entre os conceitos de corrente elétrica e resistividade (inclusive na questão 7, que apresentou um número muito baixo de acertos). Quando chamamos a atenção para esse equívoco os estudantes alegaram descuido na hora de responder. De qualquer forma, ressaltamos cada um dos conceitos, a diferença entre eles e a condição para a formação do estado supercondutor.

Embora não seja uma medida da aprendizagem por si só, o resultado geral do teste se mostra satisfatório. Acreditamos que a discussão do gabarito possa ter auxiliado a dirimir algumas dúvidas e que os estudantes que apresentavam dúvidas conceituais possam tê-las sanado. Além do mais, esse é assunto complexo e foge do senso comum e, portanto, é de se esperar que seja necessário muito empenho e tempo para ter um conhecimento mais aprofundado,

Quanto à pesquisa de opinião. Tivemos dois momentos distintos. No primeiro deles queríamos entender como os participantes entendiam o papel que a utilização sistemática dos vídeos-experimentos pudesse ter em suas aprendizagens. Se o respondente fosse também professor, perguntas eram feitas para saber se utilizam ou utilizariam os vídeos em suas salas de aula. No segundo momento, fizemos uma pergunta geral para todos os participantes e uma específica para os que são também professores, ambas relacionadas a como enxergavam o ensino remoto. A íntegra do questionário está no Apêndice C e também pode ser consultado no link <https://docs.google.com/forms/d/1JwbDw71viGPpfbhLl4TwyB4xEWG73aRWiJPVh15wNBI/edit>. No próximo parágrafo detalharemos melhor as respostas..

Quando perguntados se achavam que os vídeos didáticos apresentados como um forte complemento do material didático contribuiu para o entendimento dos conteúdos, a resposta afirmativa foi unânime. No detalhamento das respostas – que pode ser vista na íntegra no link <https://docs.google.com/forms/d/1JwbDw71viGPpfbhLl4TwyB4xEWG73aRWiJPVh15wNBI/edit#responses> – foi mencionado o fato de que os vídeos: *prendem a*

atenção dos alunos e despertam o interesse, fazendo com que o conteúdo seja melhor absorvido; que tornam o conteúdo mais palpável; que ajudam a abstrair o conteúdo e são ‘uma ferramenta a mais’; que dinamizam o que está no material didático; que uma imagem vale mais por mil palavras e a possibilidade de pausar, rever, favorece o aprendizado.

Para os que são professor foi feita a pergunta se eles utilizam ou utilizariam vídeos em suas aulas de forma sistemática e a resposta foi afirmativa para todos os respondentes. No detalhamento de suas respostas podemos resumir que aparece como motivação o fato que *nessa época cibernética, em que os alunos estão inseridos na internet, os vídeos tem forte apelo e que os vídeos são recursos absolutamente necessários pois permitem a visualização dos conteúdos e sua revisão sempre que necessário.*

A resposta dos participantes vai ao encontro do nosso próprio entendimento sobre a importância dos vídeos em sala de aula, sobretudo em um conteúdo que, devido a impossibilidade de experimentação real, pode ficar muito abstrato.

Quanto à análise sobre o ensino remoto, perguntou-se aos alunos como eles enxergavam (na condição de alunos do curso) a aula remota. As respostas foram diversificadas, tais como: Algumas opiniões elencadas foram: *há vantagens e desvantagens e que embora haja preferência por estudar sozinho, as aulas síncronas não perdem a essência; que ainda é cedo para ter padrão de comparação uma vez que o ensino remoto é recente; que problemas técnicos e operacionais dificultam a interação; que é uma ótima oportunidade ao aprendizagem, que por sua natureza já é mais atraente, e exige que o professor seja criativo para poder prender a atenção dos alunos, que as aulas presenciais com a interação próxima será sempre melhor e que as condições precárias de internet dificulta ainda mais.* Um dos participantes respondeu (transcrição na íntegra) que *“Falando na condição de aluno, (estou vivenciando o ensino remoto), posso dizer, que é muito difícil obter sucesso no aprendizado e na execução de todas as atividades. Nem sempre temos um ambiente favorável ao estudo em casa (falta de internet, barulho, equipamentos). Outro fator que dificulta é o fato de estarmos acostumados a ter os professores sempre conosco, nos orientando pessoalmente, os colegas que acabam ajudando,*

muitas vezes um professor vai sanar a dúvida de um colega em sala e acaba nos ajudando também. Percebo que ser privado dessa interação é muito prejudicial. Sem contar que em aulas Síncronas é muito difícil manter a atenção à tela”.

Analisando as respostas acima, observa-se que as opiniões são diversas, como já esperávamos, tendo em vista a complexidade da situação que obrigou que alunos e professores migrassem, de modo sumário, do ensino presencial para o remoto. Pode ser que essa transição tivesse sido mais suave e em outras circunstâncias, as opiniões pudessem ser mais favoráveis.

Na última pergunta enfatizamos aos participantes que alguns estavam vivenciando um momento ímpar, que era a oportunidade de se colocar no lugar de seus alunos, estando eles próprios participando de aulas remotas. Solicitamos que fizessem uma autoavaliação e analisassem se sua visão sobre o ensino remoto enquanto participante de curso e como professor eram compatíveis. Uma das respostas que obtivemos (transcrição na íntegra) foi *“Totalmente compatíveis, todos nós temos as mesmas dificuldades, de acesso, de tecnologia e estamos todos no mesmo barco, alunos e professores”*; a outra resposta diz que *as dificuldades se apresentam a alunos e professores e que, ao final, ambos [atores] são prejudicados*; outra resposta mencionou que *por ser estimulante ao seu aprendizado, acaba sendo estimulante à sua prática docente e acaba sendo um auxiliar para quem precisa aprender a aprender.*

Analisando as respostas anteriores observa-se que elas têm em comum o fato de evidenciar que alunos e professores estão sob desafios, que todos estão sendo testados, todos estão trilhando novos caminhos e, que sempre há vantagens e desvantagens em qualquer empreitada, mas que com vontade, método, afincado e perseverança é possível seguir em frente.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ministrar aulas de Física é sempre um desafio. Esse desafio está presente mesmo quando estamos em condições idealizadas, seguindo o livro texto e a programação regular das aulas. Maior desafio ainda num momento de pandemia, em que as metodologias, a interação social e a própria Escola estão sendo ressignificadas.

Ensinar conteúdos de Física Moderna no Ensino Médio, quando diretrizes e o material didático não dão a devida importância ao assunto também é um desafio para o professor. Trabalhar o assunto de Supercondutividade com um nível adequado de profundidade, sem ficar superficial é também desafiador. É preciso estar muito imbuído da importância desses conteúdos e da necessidade de colocar as aulas de Física no século XXI para percorrer todos os caminhos necessários para fazer a implementação dessas aulas. Caminho esse facilitado pelo Mestrado que participamos.

Além do aprendizado dos conteúdos, em livros voltados a estudantes de cursos de graduação, é necessário fazer a transposição didática para as salas de aula do Ensino Médio. É também necessário elaborar material didático próprio, tendo em vista que o assunto não é abordado nos livros-texto do ensino médio e, quando o são, é de maneira bem introdutória, voltados à divulgação científica. No nosso caso específico, houve ainda a necessidade de adequação das aulas ao ensino remoto.

No entanto, apesar da complexidade da tarefa e dos desafios a que fomos submetidos – tanto esse professor regente como os participantes – podemos dizer, baseando-nos em nossa análise dos resultados e no feedback dos participantes, que nossos objetivos foram cumpridos. Ganhamos eu, como professor, e os participantes, que puderam se engajar em uma atividade de educação continuada aprendendo sobre um tema tão importante, e isso num momento de inflexão, difícil, em função da pandemia de Covid-19.

REFERÊNCIAS

ARANTES, A. R.; MIRANDA, M. S.; STUDART, N. **Objetos de aprendizagem no ensino de física: usando simulações do PhET**. Física na Escola, v. 11, n. 1, p. 27-31, 2010.

BERK, A.; ROCHA, M.. **O uso de recursos audiovisuais no ensino de ciências: uma análise em periódicos da área**. Revista Contexto & Educação, v. 34, n. 107, p. 72-87, 2019.

BRANÍCIO, P. S. **Introdução à Supercondutividade, Suas Aplicações e a Mini-Revolução Provocada Pela Redescoberta do MgB₂: Uma Abordagem Didática**. Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 23, no. 4, 2001.

CARLOS, L. M.; SILVA, J. B.; ALVES, J. B. M.; FERENHOF, H. A.. **Uma análise de interatividade sob a ótica dos laboratórios online**. Anais do Simpósio Ibero-Americano de Tecnologias Educacionais, p. 32-39, 2018.

CARNEIRO, M. L. F.; SILVEIRA, M. S. **Objetos de Aprendizagem como elementos facilitadores na Educação a Distância**. Educar em Revista, [s.l.], n.4, p.235-260, 2014.

COSTA, M. B.S.; PAVAO, A. C.. **Supercondutividade: um século de desafios e superação**. Rev. Bras. Ensino Fís., São Paulo , v. 34, n. 2, 2012.

FERRÉS, J. **Vídeo e Educação**. 2. ed. Tradução Juan Acuña Llorens. Porto Alegre: Artes Médicas, 1996.

HALLIDAY, D., RESNICK R., WALKER, J. **Fundamentos de Física**, Vol. 4, 10ª edição, LTC, 2016.

MEDEIROS, A; MEDEIROS, C. F. Possibilidades e limitações das simulações computacionais no ensino da física. Revista Brasileira de Ensino de Física, São Paulo, v. 24, n. 2, p. 77-86, jun. 2002.

MOCÓ. G. S., **Estudo de termodinâmica por uma estação meteorológica experimental em Arduino**. Dissertação de Mestrado. UFMT (2020).

MOREIRA, F., LANFREDI, A., CARDOSO, C., MALUF, W., MOMBRÚ, A., NAVAU, C. **O fascinante mundo dos materiais supercondutores**. Revista Univerciência, n. 2, p. 39-48, 2002.

MOREIRA, Marco A. **Teorias de aprendizagem**. 2. ed. São Paulo: EPU, 2011.

OSTERMANN, Fernanda; PUREUR, Paulo. **Supercondutividade**. Editora Livraria da Física, 2005.

OSTERMANN, F.; FERREIRA, L. M.; CAVALCANTI, C. J. H. **Tópicos de Física Contemporânea no ensino médio: um texto para professores sobre supercondutividade.** Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 20, no.3, 1998a.

OSTERMANN, F.; FERREIRA, L. M.; CAVALCANTI, C. J. H. **Supercondutividade: uma proposta de inserção no ensino médio.** Porto Alegre: Instituto de Física–UFRGS, 1998b.

PIERRI, L. D.; DORNELES, R. K.; MENDONÇA, I. T. M.; GRUBER, C. **Experimentação remota como estratégia para o ensino híbrido.** Redin-Revista Educacional Interdisciplinar, v. 8, n. 1, 2019.

PIMENTEL, E. C. B.; CARVALHO, L. S.; CARNEIRO, M. H. S. Imagem em movimento para a Educação: Alguns potenciais e algumas limitações. Disponível em http://abrapecnet.org.br/atas_enpec/viii/enpec/resumos/R0734-1.pdf. Acessado em 12/01/2021.

PUREUR, P. **Supercondutividade: cem anos de desafios.** Revista USP, n. 92, p. 142-156, 2012.

RONDINI, C.A.; PEDRO, K.M.; DUARTE, C. S. (2020). Pandemia do Covid-19 e o ensino emergencial; **Mudanças na praxis docentes.** Interfaces Científicas- Educação, 10(1),41-57.

SILVA JR, R.; N. C. S., LIMA, A. J. A., & CHAHINI, T. H. C. **Tecnologias Digitais e Metodologias Ativas na Educação Básica: a relevância das TIC para uma aprendizagem significativa.** Revista Tecnologias na Educação, v.30, 2019.

TULHA, Carinna Nunes; DE CARVALHO, Marco Antônio Garcia; COLUCI, Vitor Rafael. **Uso de Laboratórios Remotos no Brasil: uma revisão sistemática.** Informática na educação: teoria & prática, v. 22, n. 2, 2019.

APÊNDICE A

PRODUTO EDUCACIONAL

SUPERCONDUTIVIDADE – UM ROTEIRO DE ESTUDOS

Marcelo da Silva Peres

Produto Educacional da Dissertação de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física intitulado *Supercondutividade – uma abordagem para o ensino médio centrado em vídeo-experimentos* sob a orientação da Profa. Dra. Rosângela Borges Pereira, junto ao Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal do Mato Grosso, Campus Universitário do Araguaia.

Barra do Garças – MT
2020

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO	02
1ª aula	03
2ª aula	07
3ª aula	10
4ª aula	17
5ª aula	21
REFERENCIAS	23

APRESENTAÇÃO

Este material instrucional apresenta uma sequência de aulas, para tratar o conteúdo de Supercondutividade a nível do ensino médio. São abordados desde a descoberta da supercondutividade, os materiais que ao longo do tempo foram sendo descobertos, importantes efeitos, bem como a primeira explicação de sucesso para explicar o novo fenômeno.

Esse material é composto de duas partes: o texto **Supercondutividade, uma abordagem para o ensino médio centrada em vídeos experimentos** e este material complementar, que chamaremos de **Roteiro de Atividades**. Eles são indissociáveis e se complementam; um com a parte teórica e o outro com propostas de atividades para fixação do conhecimento.

Tendo em vista a dificuldade em realizar experimentos em supercondutividade, causada pela indisponibilidade de adquirir pastilhas supercondutoras no mercado interno e, levando em consideração, em pleno Século 21, a importância da experimentação para os processos de ensino-aprendizagem, optamos por suprir parte dessa carência através de vídeos experimentos. Assim, no roteiro de atividades correspondente a cada aula, há uma série de vídeos que ilustram, reforçam ou apenas contextualizam o conteúdo.

Esperamos que nossa proposta possa efetivamente contribuir com os professores que buscam inserir o conteúdo de Supercondutividade em suas aulas e também que sirva para despertar nos estudantes o interesse pela Ciência.

- **Objetivos – revisar alguns conceitos importantes necessários para entender a supercondutividade**

- Texto de apoio – Seção 1 do texto *Supercondutividade para o Ensino Médio*
- Texto Para Saber Mais – Estrutura cristalina
- **Vídeos** – 1. https://www.ted.com/talks/graham_baird_how_do_crystals_work
2. <https://www.britannica.com/technology/resistance-electronics>
3. <https://www.youtube.com/watch?v=IUgS7Uw-qBI>
4. https://www.ted.com/talks/lina_marieth_hoyos_what_is_the_coldest_thing_in_the_world (*opcional; para curiosos*)

- **Descrição (oficial da página TED) do vídeo 1 - duração 4:46 min**

Muitos cristais têm formas características - como a cascata de quartzo pontiagudo ou uma pilha de cubos de galena. Os átomos de cada cristal têm uma característica definidora: seu padrão organizado e repetitivo. O padrão não se restringe a minerais - areia, gelo, metais e DNA também têm estruturas cristalinas. Então, o que os faz crescer nessas formas repetidas vezes? Graham Baird mergulha nas propriedades únicas dos cristais.

- **Descrição do vídeo 2 – duração 2:44 min**

O vídeo, produzido pela *Brittanica*, uma das maiores enciclopédias do mundo detalha como a resistência elétrica afeta o fluxo de elétrons em um circuito elétrico (feito com material condutor)

- **Descrição do vídeo 3 – duração 5min09s**

Viagem à Eletricidade (Voyage em Électricité, em francês) é uma série de televisão de animação francesa em 26 episódios, de cerca de cinco minutos cada, que explica o funcionamento de todo o sistema elétrico. Foi criado por Jacques Rouxel, produzido pela empresa AAA (Animation Art-Graphique Audiovisuel) e pela CSI (Cidade da Ciência e Indústria. Esse é o terceiro episódio da série. A série completa pode ser acessa em <https://www.youtube.com/watch?v=1fdEgkVaNdY>.

- **Descrição (oficial do site TED) do vídeo 4– duração 4min18s**

Os materiais mais frios do mundo não estão na Antártica ou no topo do Monte Everest. Eles estão em laboratórios de física: nuvens de gases mantidas apenas frações de grau acima do zero absoluto. Lina Marieth Hoyos explica como temperaturas tão baixas dão aos cientistas uma janela para o funcionamento interno da matéria e permitem que os engenheiros construam instrumentos incrivelmente sensíveis que nos dizem mais sobre o universo

Para Saber Mais - Estrutura cristalina

Vimos que em um cristal cada um de seus átomos estão dispostos num padrão repetitivo, altamente organizado. Apesar do uso corriqueiro do termo "cristais", a estrutura cristalina não se restringe aos nossos conhecidos cristais (diamantes, pedras preciosas, quartzo, etc). Como vimos no vídeo 1, na voz de Graham Baird, "a areia, o gelo, o açúcar, o chocolate, a cerâmica, os metais, o ADN, e mesmo alguns líquidos" também apresentam estruturas cristalinas.

Conhecer a estrutura dos cristais é de fundamental importância para a ciência contemporânea, auxiliando no desenvolvimento de novos materiais e da indústria tecnológica. A parte da Física que estuda o crescimento de cristais é a Cristalografia.

Apesar de toda a variedade de cristais e de materiais existente na natureza, existem apenas 07 células unitárias (as células unitárias são a menor unidade repetitiva que reproduz a estrutura de um cristal: São eles: cúbico, trigonal, tetragonal, ortorrômbico, monoclinico, triclinico e hexagonal.

No vídeo, vimos detalhes da estrutura cristalina cúbica da Galena (formada por átomos de Enxofre e Chumbo). Outro exemplo mostrado é a estrutura hexagonal do Quartzo: pirâmides compostas por um átomo de Silício e quatro átomos de Oxigênio.

Essa configuração ou exibição espacial é determinada pelas condições físicas iniciais da temperatura e pressão exercidas sob o arranjo atômico da estrutura do material cristalino e sob outras condições ambientais-químicas da matéria. Um exemplo dessa dependência é o diamante.

Há evidências que os diamantes crescem em forma cúbica em temperatura mais baixas e em octaedros a temperaturas mais altas. Ainda, a presença de outros átomos, mesmo que em quantidades pequenas, também influencia na forma do diamante.

Em contraposição aos cristais estão os materiais amorfos. Estes materiais possuem, dentre outros fatores, a predisposição de formação de misturas minerais. Por exemplo, muitos materiais heterogêneos com formas indefinidas/irregulares crescem muito rápido ou próximos de outros cristais ocasionando uma desorganização do empacotamento dos átomos; este é o caso do granito.

Um outro exemplo de material amorfo é o vidro. Embora feito de pó de quartzo derretido, o vidro não é um cristal. O motivo é que o pó esfria relativamente rápido não dando tempo aos átomos para se arranjamem de maneira ordenada num cristal de quartzo.

ATIVIDADES DE FIXAÇÃO DE CONTEÚDO

Tendo lido e discutido os textos de apoio e assistido aos vídeos, vamos pesquisar.

I. Sobre a estrutura cristalina

Pesquise cristais que tenham as seguintes células unitárias. Cite 02 de cada.

- Cúbico

- Trigonal

- Tetragonal

- Ortorrômico

- Monoclínico

- triclínico

- Hexagonal

II. Você já deve ter ouvido falar no "poder de cura das pedras preciosas". Por exemplo, em sites na internet é possível encontrar informações como: "a ametista influencia os que querem se libertar dos vícios"; "a hematita promove desbloqueios energéticos"; "a turmalina negra traz proteção, cura e vitalidade" O que você acha dessas informações

III. Corrente elétrica

Responda rápido:

a) Todo movimento de elétrons em um material condutor implica em uma corrente elétrica nesse condutor?

() Sim () Não

b) Uma das condições para que se estabeleça uma corrente elétrica em um condutor é que _____

IV. - Sobre elétrons livres

Sobre os elétrons livres é correto afirmar que:

() são quaisquer elétrons no metal

() são aqueles elétrons que podem se movimentar pela rede cristalina

() são elétrons que "perderam" a ligação com o átomo ao qual pertence

() todo material possui elétrons livres

V. Resistividade elétrica

Vimos que a resistividade elétrica é dependente da temperatura. Abaixo segue uma informação importante sobre essa dependência. Organize a

Diminui a temperatura resistividade quando elétrica diminui

É resistividade condutor temperatura ideal absoluto aquele que tem nula na do zero

V- Sobre magnetização

A magnetização está relacionada ao grau de orientação dos dipolos magnéticos em um material magnético. () sim () Não

- **Objetivos – Fixar os conhecimentos sobre os diferentes tipos de Supercondutores e de propriedades magnéticas da matéria**

- Texto de apoio – Seções 2 a 4 do texto *Supercondutividade*
- **Videos** – 1. <https://www.youtube.com/watch?v=u36QpPvEh2c>
2. <https://www.britannica.com/video/185491/dependence-properties-temperature>
3. <https://www.youtube.com/watch?v=jtLkIcHVHic>
4. <https://www.youtube.com/watch?v=eY6D2LjYKzw>

- **Descrição do vídeo 1 - duração 4min:30s**

O professor da Universidade da Califórnia em Los Angeles (UCLA), James Lincoln, explica as propriedades magnéticas da matéria que fazem com que diferentes materiais se comportem de diferentes maneiras quando submetidos a campos magnéticos externos. Os materiais podem ser classificados em ferromagnéticos, paramagnéticos e diamagnéticos. Além de explicações teóricas o professor também faz demonstrações rápidas do comportamento de diversos materiais quando submetidos ao campo magnético (de um ímã).

- **Descrição do vídeo 2 - duração: 01min58s**

O vídeo foi produzido pelo canal *Minute Physics* (Minuto de Física) que aborda diversos temas interessantes da Física um torno de 1 minuto. Ele está hospedado no site da *Britannica*. Esse vídeo aborda como a temperatura afeta materiais com diferentes propriedades magnéticas

- **Descrição dos vídeos 3 e 4 - duração 59min08s (cada)**

Documentário produzido pela BBC mapeando o progresso dos cientistas que, ao longo da história, tentaram controlar o limite máximo do frio, conhecido como zero absoluto.

Vídeo 3 – Episódio 1

Vídeo 4 – Episódio 2

ATIVIDADES DE FIXAÇÃO DE CONTEÚDO

I. Abaixo segue uma lista de características de diferentes elementos e ligas. Classifique-as como não supercondutor (0), supercondutor do Tipo I (1) e supercondutor do Tipo II (2). **Descubra o nome de cada um dos materiais/compostos**

- () Ouro _____
- () Tl-Ba-Cu-oxide _____
- () La-Ba-Cu-oxide _____
- () NbN _____
- () Y-Ba-Cu-oxide _____
- () Zn _____
- () NbTi _____
- () V _____ () Tc _____ () Nb _____

II. Assinale materiais que são bons condutores de eletricidade em temperatura ambiente mas que não apresentam comportamento supercondutor em nenhuma temperatura crítica.

- () Gálio () Índio
- () Cobre () Chumbo
- () Estanho () Ouro
- () Prata () Alumínio

III. Classifique os materiais quanto a paramagnéticos (P), ferromagnéticos (F) ou diamagnéticos (D).

- () Grafite () Alumínio
- () Ferro () Níquel
- () Oxigênio () Supercondutores
- () Vidro () Sulfato de cobre
- () Cobalto () Bismuto

IV. Observe os cartões abaixo. Agrupe dois números de tal forma a completar as informações. Cada informação em um cartão só se complementa por uma outra de um único cartão.

Material Paramagnético paramagnético 1	Passagem ao estado supercondutor de maneira abrupta 2	são repelidos por um campo externo 3	bons condutores elétricos 4
São os chamados Supercondutores De alta temperatura 5	perde o magnetismo acima da temperatura de Curie 6	supercondutor do Tipo I 7	material diamagnético 8
O alinhamento dos Momentos magnéticos É perturbado pela Agitação térmica 9	baixa resistividade elétrica 10	material paramagnético 11	supercondutor do Tipo II 12

Pares: _____

V. Pesquise quais são as temperaturas críticas recordes para os supercondutores do Tipo I e do Tipo II, bem como seu ano de descoberta.

Supercondutor do Tipo I

1º lugar - _____

2º lugar - _____

3º lugar - _____

Supercondutor do Tipo II

1º lugar - _____

2º lugar - _____

3º lugar - _____

- **Objetivos – diferenciar o processo de magnetização em um condutor perfeito e um supercondutor. O efeito Meissner. Campo crítico**

- Texto de apoio – Seções 5 e 6 do texto *Supercondutividade*
- **Para saber mais – Correntes parasitas (de Foucault)**
- **Videos** – 1. <https://www.youtube.com/watch?v=5BeFoz3Ypo4>
2. <https://youtu.be/keMpUaoA3Tg>
3. <https://www.youtube.com/watch?v=-IPJtuVrOLc>
4. <https://www.youtube.com/watch?v=VyOtIsnG71U>
5. facebook.com/quantumlev/videos/335254814307074/

- **Descrição do vídeo 1 – Duração: 2min16s**

O vídeo mostra um experimento clássico em que atuam correntes parasitas. Observe-se que o vídeo tem mais de 1 milhão de visualizações! Um ímã de neodímio é solto no interior de um tubo de cobre. Com o ímã em queda, o fluxo do campo magnético é variável e, portanto, surgem correntes parasitas circulantes no tubo de cobre. A consequência é que aparece uma força atuando no ímã em sentido contrário à força gravitacional, retardando o tempo de queda do ímã no interior do tubo.

- **Descrição do vídeo 2 – Duração: 2min:28s**

O vídeo mostra alguns efeitos das correntes parasitas quando um forte ímã de neodímio é aproximado de um tubo de cobre. Observe-se que o vídeo tem mais de 8 milhões de visualização!

- **Descrição do vídeo 3 – Duração 2min22s**

O vídeo é parte de um artigo da The Physics Teacher “Superconductors in the high school classroom”, de David Lincoln, 2017 (<https://aapt.scitacion.org/doi/10.1119/1.5008355>). O artigo discute como introduzir o tema dos supercondutores no ensino médio e como fazer demonstração da levitação magnética.

- **Descrição do vídeo 4 – Duração 5min08s**

O vídeo do canal Quantum Levitation, mostra um experimento de levitação magnética. O vídeo tem mais de 4 milhões de visualização.

- **Descrição do vídeo 5 – Duração 1min04s**

O vídeo mostra como montar um experimento simples de levitação magnética. (é necessário dispor de uma pastilha supercondutora, ímãs de neodímio e nitrogênio líquido).

Para saber mais - Correntes parasitas (de Foucault)

Texto retirado da dissertação de Mestrado de Lucio Costa (Costa, 2019).

Em 1822, durante uma pesquisa de campo para determinação da intensidade magnética, François Arago (1786-1853) observou que o movimento de uma agulha magnética cessava mais depressa quando estava dentro de uma caixa metálica do que quando estava dentro de uma caixa de madeira ou então afastada de qualquer outro corpo (Guedes, 1996). Ele fez uma série de experiências com agulhas magnéticas, ímãs permanentes e placas de diversos materiais que lhe permitiram concluir que: i) quando um ímã ou agulha magnética está parado paralelo a uma placa de metal colocada na sua vizinhança e então coloca-se a placa em rotação, o ímã tende a acompanhar o movimento da placa; ii) se o contrário acontece, ou seja, se a placa está parada e o ímã passa a girar então a placa tende a acompanhar o movimento do ímã; iii) se não houver movimento relativo entre o ímã e a placa, nada acontecerá, apesar da proximidade entre ambos. Arago nomeou esse fenômeno de magnetismo de rotação.

Michael Faraday (1791-1867), tendo conhecimento desses experimentos, viu a oportunidade de gerar eletricidade e de construir uma nova máquina elétrica. A essa altura, Faraday já havia obtido eletricidade a partir de ímãs permanentes. Um de seus muitos experimentos, consistiu em fixar dois ímãs e entre eles colocar para girar um disco de cobre (na vertical). Criando um circuito com o sistema e inserindo um galvanômetro neste circuito, ele percebeu que quando o disco estava girando aparecia uma corrente no galvanômetro.

Invertendo o sentido de rotação do disco, o sentido da corrente também se inverteia. Outro fato observado foi que quando os polos do ímã cobriam completamente o disco, a corrente era mais forte que quando os polos apenas o cobriam parcialmente. Faraday substituiu os ímãs permanentes por eletroímãs e obteve o mesmo efeito.

Através da lei da indução eletromagnética, Faraday explica o aparecimento de correntes elétricas circulantes na placa de Arago e o fato que essas correntes interagem com o campo magnético da agulha criando uma força que tende a anular o movimento relativo dos dois corpos.

Jean Foucault (1819-1868) percebe, em 1855, que era necessário mais força para colocar em rotação um disco de cobre quando este é colocado entre os polos de um ímã e que as correntes ali induzidas (experimento de Faraday) eram capazes de aquecer o disco. Essas correntes, tardiamente, receberam o nome de correntes de Foucault.

Como se formam as correntes parasitas (ou correntes de Foucault)?

Vimos que uma *fem* e uma corrente são induzidas em um condutor quando este se move em um campo magnético ou quando um campo magnético se move em relação ao condutor, ou seja, quando o fluxo magnético é variável. Agora veremos um dos importantes efeitos advindos desse fenômeno, as correntes de Foucault. Vejamos:

As correntes circulantes chamadas de correntes de Foucault, correntes parasitas (ou *eddy current*, em inglês) são induzidas em objetos de metal, que se movem através de um campo magnético.

Devemos ainda nos lembrar que correntes elétricas (que nada mais são que cargas elétricas em movimento) criam campo magnético. Estas correntes parasitas podem produzir aquecimento e arrastos significativos, chamados de freio ou amortecimento magnéticos, no movimento do objeto metálico que se movimenta por um campo magnético variável e tem grandes aplicações práticas, como veremos mais adiante.

Para saber mais ainda assista ao vídeo do Brilliant: <https://www.youtube.com/watch?v=sENqdsF8ppA>

ATIVIDADES DE FIXAÇÃO

Depois de fazer a leitura dos textos e assistir aos vídeos recomendado, você deve responder os exercícios abaixo de modo *Vapt-Vupt*. O professor fará a pergunta oralmente e você terá 5 s para marcar cada resposta. Preferencialmente a atividade será desenvolvida de modo colaborativo com o aplicativo Kahoot.

1. Condutores perfeitos e supercondutores são termos sinônimos?
 Sim Não
2. Pode-se dizer que a supercondutividade é um novo estado da matéria?
 Sim Não
3. Há uma relação direta entre uma amostra condutora ideal ou uma amostra supercondutora apresentar resistividade nula e ser um diamagnético perfeito?
 Sim Não
4. Todo condutor de eletricidade (em temperatura ambiente) apresenta comportamento supercondutor em alguma temperatura crítica?
 Sim Não
5. É possível que materiais não condutores de eletricidade em temperatura ambiente apresentem comportamento supercondutor para uma determinada temperatura crítica?
 Sim Não
6. O estado de magnetização dos condutores perfeitos é sempre idêntico aos dos supercondutores?
 Verdadeiro Falso
7. A Lei da Indução de Faraday diz que, quando houver variação do fluxo magnético através de um circuito fechado (como numa espira condutora), uma corrente induzida será estabelecida no circuito.
 Verdadeiro Falso
8. A lei de Lenz diz que uma corrente induzida surgirá numa espira condutora fechada com um sentido tal que o campo magnético por ela criado se somará à variação que a produziu.
 Verdadeiro Falso
9. A sequência com que uma amostra condutora ideal é resfriada e o campo magnético é aplicado influencia na sua magnetização quando o campo magnético é retirado?
 Sim Não
10. A sequência com que uma amostra supercondutora é resfriada e o campo magnético é aplicado influencia na sua magnetização quando o campo magnético é retirado?
 Sim Não
11. O efeito Meissner se caracteriza pela expulsão das linhas de campo de uma amostra supercondutora quando está é submetida a um campo magnético externo?
 Sim Não
12. Todo material em estado condutor é um diamagnético perfeito?
 Sim Não

13. A magnetização em um condutor perfeito depende apenas das condições externas a que ele é submetido?
() Sim () Não
14. A magnetização em um supercondutor depende apenas das condições externas a que ele é submetido?
() Sim () Não
15. O Ferromagnetismo é responsável pelos fenômenos corriqueiros que estamos acostumados com ímãs naturais ou artificiais permanentes?
() Sim () Não
16. O Paramagnetismo é responsável pelos fenômenos corriqueiros que estamos acostumados com ímãs naturais ou artificiais permanentes?
() Sim () Não
17. Existe um campo magnético crítico a partir do qual o efeito Meissner deixa de acontecer (ou seja, o supercondutor deixa de ser um diamagnético perfeito).
() Verdadeiro () Falso
18. O efeito Meissner acontece tanto para supercondutores quanto para condutores perfeitos.
() Verdadeiro () Falso
19. Para alcançar o estado supercondutor os supercondutores do Tipo I são resfriados com hélio líquido.
() Verdadeiro () Falso
20. Um condutor perfeito se caracteriza apenas pela resistividade elétrica nula.
() Verdadeiro () Falso
21. Um condutor perfeito se caracteriza pela resistividade elétrica nula e por ser um diamagnético perfeito.
() Verdadeiro () Falso
22. Um condutor perfeito se caracteriza pela resistividade elétrica nula e por ser um diamagnético perfeito.
() Verdadeiro () Falso
23. Devido a Lei de Indução eletromagnética correntes de Foucault se formam em uma amostra supercondutora à medida que o campo magnético ao qual a amostra está submetida vai a zero e são estas correntes a responsável pela magnetização do material.
() Verdadeiro () Falso
24. É possível trabalhar com uma amostra supercondutora sem que essa esteja resfriada numa temperatura abaixo de sua temperatura crítica.
() Verdadeiro () Falso
25. Podemos facilmente levar um experimento com amostras supercondutoras para demonstração em sala de aula.
() Verdadeiro () Falso

• **Em sala de aula será promovida uma discussão sobre a questão 25.**

ATIVIDADE 2. SOBRE UNIDADES, CAMPO CRÍTICO E ANÁLISE GRÁFICA

A. Sobre unidades

A1. Antes de prosseguirmos é importante tratarmos das unidades de medida de campo magnético e da relação de conversão entre elas.

- a) A unidade do SI para campo magnético é o Tesla (T).
Use a equação de Lorentz para identificar o Tesla em função das unidades básicas. Apresente o resultado em função do Coulomb (C) e do Ampere (A)

- b) Apresente o resultado em função do Newton (N).

- c) Uma unidade antiga para campo magnético é o Gauss (G). Qual a relação de conversão entre o Tesla e o Gauss?

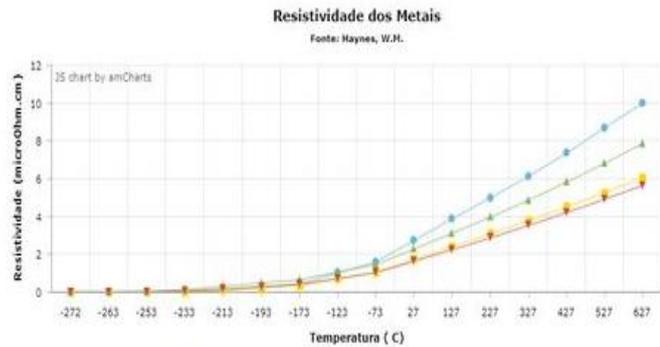
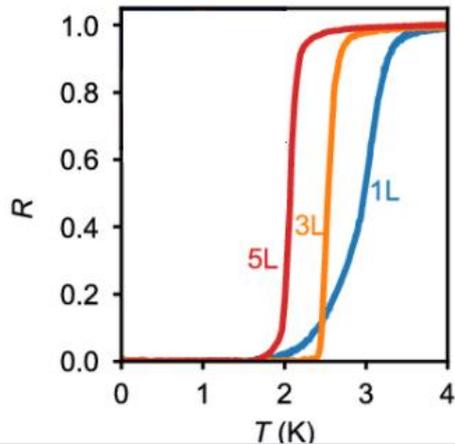
A2. Pesquise os valores dos campos magnéticos em diversos casos. Dê a resposta em Tesla e em Gauss.

Sistema	Tesla	Gauss
Na superfície da Terra		
Próximo a uma pequena barra imantada		
Próximo a um grande eletroímã		
Próximo a um ímã supercondutor		
Pequeno ímã de neodímio		
Mais potente ímã de neodímio		
Recordede intensidade de campo magnético em laboratório		
Próximo a um fone de ouvido		

B. Análise gráfica

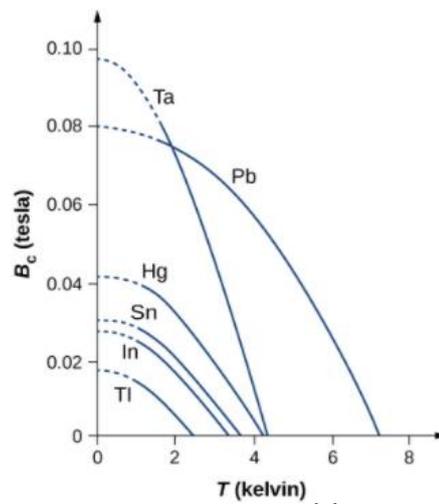
B1. Analise os gráficos 1 e 2 e responda às perguntas, justificando as respostas.

O gráfico está sem título e sem a indicação das grandezas propositadamente.



- No contexto de nosso estudo sobre supercondutores, quais as grandezas que são plotadas em ambos os gráficos?
- Qual gráfico representa materiais supercondutores?
- Qual material tem resistividade maior no gráfico 2?
- É possível falar em temperatura crítica no gráfico 2?
- Qual a menor temperatura crítica apresentada nessa questão?
- Você diria que os materiais supercondutores da figura são do Tipo I ou do tipo II?
- Qual a influência da temperatura nos condutores (metais)?
- Você consegue formar uma hipótese do motivo dos valores no gráfico 1 serem tão próximos?

B2. Vimos que existe um campo magnético crítico a partir do qual a supercondutividade é destruída. Observe o gráfico abaixo que mostra a variação do campo magnético crítico em função da temperatura para vários materiais. Responda justificando sua resposta.



a) Qual a temperatura crítica para cada um dos elementos químicos mostrados no gráfico?

b) O que significa a existência de um campo magnético crítico, dependente da temperatura, a partir do qual a supercondutividade é destruída?

c) É possível generalizar a informação do gráfico e dizer em que regiões os elementos químicos apresentam comportamento supercondutor e comportamento normal?

d) Vamos analisar os dados do Mercúrio (Hg).

- Qual o valor do campo magnético máximo a que o mercúrio pode ser submetido para que apresente supercondutividade a 4,2 K?

- Estime qual o valor da temperatura crítica para o mercúrio quando está sob um campo magnético externo de 0,03 T.

e) Vamos analisar os dados do Chumbo (Pb).

- Qual o valor do campo magnético máximo a que o chumbo pode ser submetido para que apresente supercondutividade a 7,1 K?

- Estime qual o valor da temperatura crítica para o chumbo quando está sob um campo magnético externo de 0,06 T.

f) Pesquise como fica o gráfico do campo crítico em função da temperatura crítica para supercondutores do Tipo II.

- **Objetivos – Pares de Cooper e a Teoria BCS.**

- Texto de apoio – Seções 7 e 8 do texto *Supercondutividade*
- **Videos –**
 1. https://drive.google.com/file/d/1cV4jVbejy67C1ypJs8VOX3r3ITE2_Bvt/view?usp=sharing
 2. <https://www.youtube.com/watch?v=PXHczjOg06w>
 3. <https://youtu.be/zPqEEZa2Gis>

- **Descrição do vídeo 1**

Este vídeo descreve com animações simples e didática como se formam os pares de Cooper e como estes pares, com comportamento coletivo, se distinguem dos elétrons individuais. O vídeo é um recorte do vídeo original (cujo endereço eletrônico encontra-se apresentada na própria edição)

- **Descrição (oficial da *TED*) do vídeo 2 – Duração 10min25s**

Como é que pode um disco superfino, de 7,6 cm, levantar por meio de levitação algo 70.000 vezes seu próprio peso? Numa demonstração fascinante e futurística, Boaz Almog, numa palestra *TED* mostra como um fenômeno conhecido por “prisão quântica” permite que um disco supercondutor flutue sobre um trilho (levitação magnética).

- **Descrição do vídeo 3**

Este vídeo é produzido pela *Royal Institute* (RI), de Londres. Nele Andy Marmery, técnico da instituição, mostra um supercondutor levitando em uma faixa Mobius com mais de 2000 ímãs de neodímio.

Atividade 2 . Para resolver as questões abaixo, retorne ao material didático: Assista a vídeo aula, leia o texto Supercondutividade e assista novamente o vídeo 1

1. O vídeo mostra um circuito constituído com um fio supercondutor em que a resistência elétrica será zero. Qual a condição para que a resistência chegue a zero?

2. Em linhas gerais, qual a consequência imediata do resfriamento do material e que desencadeará todo o processo que se segue?

3. Por que, em um circuito elétrico, os átomos da rede cristalina do condutor ficam ligeiramente positivos?

4. Por que os elétrons de condução são atraídos para os átomos da rede cristalina?

5. Como consequência da atração que os elétrons promovem nos átomos da rede cristalina, a rede ficará deformada e, com isso, a região ficará ligeiramente mais positiva. Quando um elétron individual passar por essa região ele será atraído ou repellido? Explique.

6. Por que a força eletrostática atrativa com a rede vence a repulsão entre os elétrons individuais?

7. Que interação, afinal, faz os elétrons ficarem ligados, formando um par de Cooper?

8. Os pares de Cooper são ligações fracas ou fortes? Explique?

9. Como as interações entre os elétrons do par de Cooper são fracas e até mesmo a agitação térmica pode rompê-las, qual uma solução necessária para que os pares continuem existindo?

10. Vamos falar de nomenclatura. Dizer que os dois elétrons estão emparelhados é o mesmo que dizer que eles formam um par de Cooper?

11. Por que os pares de Cooper tem comportamento tão diferente dos elétrons individuais?

12. Vimos que para que os pares de Cooper se mantenham o material deve estar resfriado a uma temperatura muito baixa (cada material tem sua T_c). Qual seria o(s) efeito(s) de aumentar a temperatura do material?

- **Objetivos – Estado de arte – Aplicações e desafios**

- Texto de apoio – Seção 3.9 do texto *Supercondutividade*
- **Videos** – 1. <https://www.youtube.com/watch?v=HGfsbQ7uzL8>
2. <https://www.youtube.com/watch?v=-3rEGlyZwAc>
3. <https://www.youtube.com/watch?v=ViT6bSmMY6A>
4. <https://www.youtube.com/watch?v=EDCGX3thpa05>
5. https://www.youtube.com/watch?v=qzv_wQBkSvM

- **Descrição do vídeo Copper – Duração: 2min08s**

O filme mostra o projeto do primeiro veículo de levitação magnética em desenvolvimento no Brasil. O projeto é do Coppe, da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

- **Descrição dos vídeos 2, 3 e 4 – Duração total: 25min**

Esses fantásticos vídeos (do ano de 2000!) mostram uma das muitas aplicações dos supercondutores. Ainda, faz uma breve revisão sobre estes, com animação explicando a formação dos pares de Cooper e também mostra alguns experimentos de Física Básica. Imperdível.

- **Descrição do vídeo 5– Duração total: 08min09s**

O vídeo traz um ranking com os 10 trens mais velozes do mundo. Foi assistido por quase 12 milhões de pessoas? Qual será a tecnologia vencedora? Qual o recorde de velocidade? Assista o vídeo e descubra!

Atividades

1. Pesquise, individualmente ou com seus colegas sobre:
 - Aplicações, além daquelas vistas na sala de aula, que usam a supercondutividade
 - Aplicações futuras que dependem de vencer desafios tecnológicos
 2. Em sala de aula, as diversas aplicações serão elencadas e a turma deverá criar um ranking sobre o que acreditam que estará em operação primeiro.
 3. No material didático do curso e também em suas próprias pesquisas, descobrimos sites ou canais que tratam temas científicos, às vezes até espinhosos, de maneira magistral.
 - Faça uma lista desses sites, ordenando-os pelos que estão no topo de sua preferência.
 - Pense em se inscrever nos sites para ficar antenado com grandes propostas de criam material didático para divulgação científica.
 - Incentive seus alunos a também se inscrever
- *****
4. Para finalizar o curso, pense sobre a importância, se é que houve alguma, dos vídeos experimentos no seu processo de aprendizagem do conteúdo ministrado.

REFERÊNCIAS

BRANÍCIO, P. S. **Introdução à supercondutividade, suas aplicações e a mini-revolução provocada pela redescoberta do MGB2: uma abordagem didática.** Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 23, n. 4, p. 381-390, 2001.

COSTA, Lúcio M. **Correntes parasitas - uma abordagem para o ensino médio com ênfase na experimentação.** Dissertação de Mestrado. UFMT. 2019.

COSTA, Marconi; PAVAO, Antonio C. **Supercondutividade: um século de desafios e superação.** Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 34, n. 2, p. 2602-2615, 2012.

OSTERMANN, F.; PEREIRA, L. M.; CAVALCANTI, C. J. H. Tópicos de física contemporânea no ensino médio: um texto para professores sobre supercondutividade. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 20, n. 3, p. 270-288, set. 1998.

OSTERMANN, F. & PUREUR, P. **Supercondutividade.** 1 ed. São Paulo: Editora Livraria da Física: Sociedade Brasileira de Física, 2005. 78 p

PUREUR, P. Supercondutividade: cem anos de desafios. Revista USP, Brasil, n. 92, p. 142-156, fev. 2012.

APÊNDICE B

FORMULÁRIO AVALIATIVO

Teste - Supercondutividade

Caros colegas e alunos, tendo chegado o fim de nosso breve curso sobre os princípios básicos da Supercondutividade chegou o momento de realizarmos uma breve verificação da aprendizagem. No que segue estão perguntas básicas sobre o fenômeno da supercondutividade. Elas foram elaboradas com o intuito maior de servir como mais uma alternativa à fixação do conhecimento; por isso você pode responder às perguntas consultando o material didático do curso. Agradeço a todos pela participação!

***Obrigatório**

1. Endereço de e-mail *

2. Qual o seu nome? *

3. 1) O estado supercondutor de um material é alcançado quando:

1 ponto

Marcar apenas uma oval.

- a resistividade do material cai abruptamente a zero em uma dada temperatura crítica
- numa dada temperatura sua resistividade tende a zero
- o material não suporta campos magnéticos
- a resistividade do material cai abruptamente a zero em qualquer temperatura

4. 2) Associe características dos materiais

7 pontos

Marcar apenas uma oval por linha.

	Ferromagnético	Paramagnético	Diamagnético
O campo magético interior é enfraquecido quando submetido a um campo externo	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Os dipolos magnéticos se alinham antiparalelamente ao campo externo	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Só perdem a magnetização na temperatura de Curie	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
São fortemente atraídos por um ímã	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
São repelidos pelo campo magnético externo	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
São fracamente atraídos por um ímã	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
O alinhamento dos dipolos magnéticos é prejudicado pela agitação térmica	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

5. 3) Algumas características dos supercondutores do tipo 1 e 2

7 pontos

Marcar apenas uma oval por linha.

	Tipo I	Tipo II
São formados principalmente pelos metais e algumas ligas metálicas	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Em geral, são condutores de eletricidade à temperatura ambiente;	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
O campo magnético crítico acima do qual a supercondutividade cessa são muito baixos	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Consegue-se a temperatura crítica com hélio líquido	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Consegue-se a temperatura crítica com nitrogênio líquido	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
São formados por compostos como óxidos de cobre	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Não necessariamente são condutores a temperatura ambiente	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

6. 4) Sobre o efeito Meissner, podemos dizer que:

Marcar apenas uma oval.

- ocorre tanto para condutores quanto para supercondutores
- é consequência direta da existência da temperatura crítica
- se caracteriza pelo reforçamento das linhas de campo de uma amostra supercondutora quando está submetida a um campo magnético externo
- se caracteriza pela expulsão das linhas de campo de uma amostra supercondutora quando está submetida a um campo magnético externo

7. 5) Condutor perfeito e supercondutor são palavras sinônimas que designam o mesmo estado físico. 1 ponto

Marcar apenas uma oval.

- Verdadeiro
 Falso

8. 6) Além de apresentar resistividade nula, um material em estado supercondutor também apresenta: 0 pontos

Marcar apenas uma oval.

- paramagnetismo perfeito
 diamagnetismo perfeito
 ferromagnetismo
 diamagnético

9. 7) Para que o estado supercondutor seja alcançado são necessários uma combinação de valores críticos de: 1 ponto

Marcar apenas uma oval.

- campo magnético, corrente elétrica e resistividade
 temperatura, resistividade e campo magnético
 temperatura, campo magnético e corrente elétrica
 temperatura, corrente elétrica e resistividade

10. 8) Num material em estado supercondutor, uma corrente elétrica pode fluir por anos, sem nenhum tipo de efeito resistivo (aquecimento Joule). Isso se deve: 1 ponto

Marcar apenas uma oval.

- à corrente elétrica estar sujeita ao efeito Meissner
- à corrente elétrica ser nula
- à resistividade elétrica ser nula
- ao diamagnetismo perfeito

11. 9) É possível que materiais não condutores de eletricidade em temperatura ambiente apresentem comportamento supercondutor para uma determinada temperatura crítica? 1 ponto

Marcar apenas uma oval.

- Sim
- Não

12. 10) Sobre os pares de Cooper é correto afirmar que (pode haver mais de uma alternativa correta). 3 pontos

Marque todas que se aplicam.

- são formados por dois elétrons que agem de modo coletivo
- são a base da explicação da teoria BCS
- os elétrons no par sofrem atração elétrica e não repulsão
- são formados por entes desconhecidos dos demais estados da matéria

13. 11) Como as interação entre os elétrons do par de Cooper são fracas e até mesmo a agitação térmica pode rompê-las, uma solução necessária para que os pares continuem existindo é: 0 pontos

Marcar apenas uma oval.

- que o material seja resfriado a temperaturas suficientemente baixas para impedir a agitação térmica
- que o material seja aquecido, o que favorecerá a agitação térmica e a formação dos pares
- que o material seja resfriado, o que favorecerá a agitação térmica
- que o material seja aquecido a temperaturas suficientemente altas para impedir a agitação térmica

14. 12) A teoria BCS mostra que os elétrons dos pares de Cooper têm energia ligeiramente inferior à energia dos elétrons individuais (que não formam par), de modo que há um "gap" de energia entre eles. A interação dos pares de Cooper com os átomos da rede só será possível se: 1 ponto

Marcar apenas uma oval.

- a energia trocada entre o par e os átomos da rede for menor que a energia do "gap".
- a energia trocada entre o par e os átomos da rede for maior que a energia do "gap".
- a energia trocada entre o par e os átomos da rede for igual a energia do "gap".
- a energia trocada entre o par e os átomos da rede for nula

Este conteúdo não foi criado nem aprovado pelo Google.

Google Formulários

APÊNDICE C
FORMULÁRIO DE OPINIÃO

Enquete - Supercondutividade

Caros colegas e alunos, tendo chegado ao fim de nosso breve curso de Supercondutividade venho até vocês para que possam opinar sobre o papel que os vídeos didáticos utilizados nas aulas possam ter tido em seus processos de aprendizagem. Como a maioria de vocês são professores, vou também perguntar sua opinião como professor (e não como participante desse curso), Outro ponto que também trataremos aqui é sobre suas opiniões sobre o ensino remoto. Mais uma vez, pediremos que responda com duas visões distintas: como participante do curso e como professor. Agradeço pela participação ▪

1. Seu nome .

Sobre os vídeos didáticos

2. 1) Você acha que os vídeos didáticos apresentados como um forte complemento do material didático contribuiu para seu entendimento sobre os conteúdos por eles abordados?

Marcar apenas uma oval.

Sim

Não

3. 2) Por favor, detalhe sua resposta anterior .

4. 3) Você é professor?

Marcar apenas uma oval.

Sim

Não

5. 4) Se você é professor, por favor, responda a esta pergunta. Você utiliza ou utilizaria vídeos didáticos (de forma sistemática e não esporádica) em suas aulas de Física?

Marcar apenas uma oval.

Sim

Não

Talvez

6. 5) Por favor, explique sua resposta anterior, evidenciando os motivos da resposta.

Sobre
o
ensino
remoto

Alguns dos participantes desse curso estão vivenciando um momento ímpar, que é a oportunidade de se colocar no lugar de seus alunos, no que diz respeito às particularidades do ensino remoto, em vigor no corrente ano letivo. Abaixo solicitamos sua opinião tanto como participante/aluno do curso, e também como professor.

7. 6) Na condição de participante/aluno do curso, o que você tem a dizer sobre a aula remota? Ao responder trace um panorama detalhado de sua visão como aprendiz (e não como professor).

8. 7) Fazendo uma autoavaliação quanto ao ensino remoto, você acha que sua visão como participante desse curso e como professor são compatíveis? Por favor, explique.

Este conteúdo não foi criado nem aprovado pelo Google.

Google Formulários