

NARA GRACY TRAVESSA BARBOSA  
Autora

Profa. Dra. ROSA OLIVEIRA MARINS DE AZEVEDO  
Orientadora

Prof. Dr. IGOR TAVARES PADILHA  
Co-orientador

# Proposta para o Ensino de

# **SUPERCONDUTIVIDADE**

# no Ensino Médio



NARA GRACY TRAVESSA BARBOSA  
Autora

Profa. Dra. ROSA OLIVEIRA MARINS DE AZEVEDO  
Orientadora

Prof. Dr. IGOR TAVARES PADILHA  
Co-orientador

# Proposta para o Ensino de

# **SUPERCONDUTIVIDADE**

# no Ensino Médio

**NARA GRACY TRAVESSA BARBOSA**

Autora

Profa. Dra. **ROSA OLIVEIRA MARINS DE AZEVEDO**

Orientadora

Prof. Dr. **IGOR TAVARES PADILHA**

Co-orientador

PROJETO GRÁFICO E DIAGRAMAÇÃO:

**Projeto Sala de Criação da Coordenação de Comunicação Social  
do Instituto Federal do Amazonas - Campus Manaus Centro**

**ERLISON SOARES LIMA**

Designer/Coordenador

**RAFAEL MELGUEIRO RAMOS**

Acadêmico de Tecnologia em Produção Publicitária

**CAIO VITOR SILVA DA COSTA**

Acadêmico de Tecnologia em Produção Publicitária

Ficha Catalográfica

**LAYDE DAYELLE DOS SANTOS QUEIROZ**

CRB – 11/980

B238p Barbosa, Nara Gracy Travessa.

Proposta para o ensino de supercondutividade no ensino médio. / Nara Gracy Travessa Barbosa. – Manaus: IFAM, 2016.

43 f.: il.; 30 cm.

Produto Educacional da Dissertação: supercondutividade no ensino médio: uma proposta fundamentada na aprendizagem baseada em problemas. (Mestrado Profissional em Ensino de Física) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas. Campus Manaus Centro, 2016.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Rosa Oliveira Marins de Azevedo.

1. Supercondutividade 2. Física 3. Ensino Médio I. Azevedo, Rosa Oliveira Marins de (Orient.) II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas III. Título.

CDD 537.623

## SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO .....	7
<b>I</b> TEXTO DE APOIO AO PROFESSOR: SUPERCONDUTIVIDADE NO ENSINO MÉDIO .....	9
1. Contexto histórico .....	9
<hr/>	
2. Corrente e resistividade elétrica .....	12
2.1 Corrente elétrica .....	12
2.2 Resistividade elétrica .....	13
<hr/>	
3. Resistividade nula e efeito Meissner .....	15
3.1 Modelo de Drude .....	15
3.2 Condutividade elétrica nos metais .....	16
3.3 Resistividade Nula .....	17
3.4 Efeito Meissner .....	17
3.5 A Teoria de London .....	18
3.6 Teoria de Ginzburg-Landau .....	18
<hr/>	
4. Supercondutor x condutor perfeito .....	19
4.1 Comportamento magnético em um Condutor Perfeito .....	19
4.2 Comportamento magnético em um Supercondutor .....	21
<hr/>	
5. Tipos de supercondutores .....	21
5.1 Supercondutores Tipo I .....	22
5.2 Supercondutores Tipo II .....	22
<hr/>	
6. Teoria BCS .....	23

<b>II</b>	PLANO DE TRABALHO PARA DESENVOLVIMENTO DO CONTEÚDO .....	25
<b>III</b>	CONSIDERAÇÕES SOBRE A PROPOSTA .....	31
	REFERÊNCIAS .....	32
	APÊNDICE A – Questionário de Identificação e de verificação de conhecimentos sobre a temática Supercondutividade .....	34
	APÊNDICE B – Atividade escrita sobre Supercondutividade .....	36
	APÊNDICE C – Textos sobre os conceitos de corrente elétrica e resistência elétrica.....	38
	APÊNDICE E – Questionário Final.....	42
	APÊNDICE F – Problema Central .....	45
	APÊNDICE G – Questionário de Auto Avaliação .....	46

## APRESENTAÇÃO

A necessidade de mudança no ensino de Física aumentou com o avanço da tecnologia. Os alunos se faziam cada vez mais participativos e questionadores de aplicações atuais de diversas áreas da Física. Ficava mais clara a importância do ensino de tópicos da Física Contemporânea, como a Supercondutividade, para o Ensino Médio de uma forma diferente, onde o aluno pudesse aprender de forma criativa e mais autônoma. Acreditamos que para reverter essa situação era importante pensar na aprendizagem desse conteúdo como o enfrentamento de um problema e busca por sua resposta.

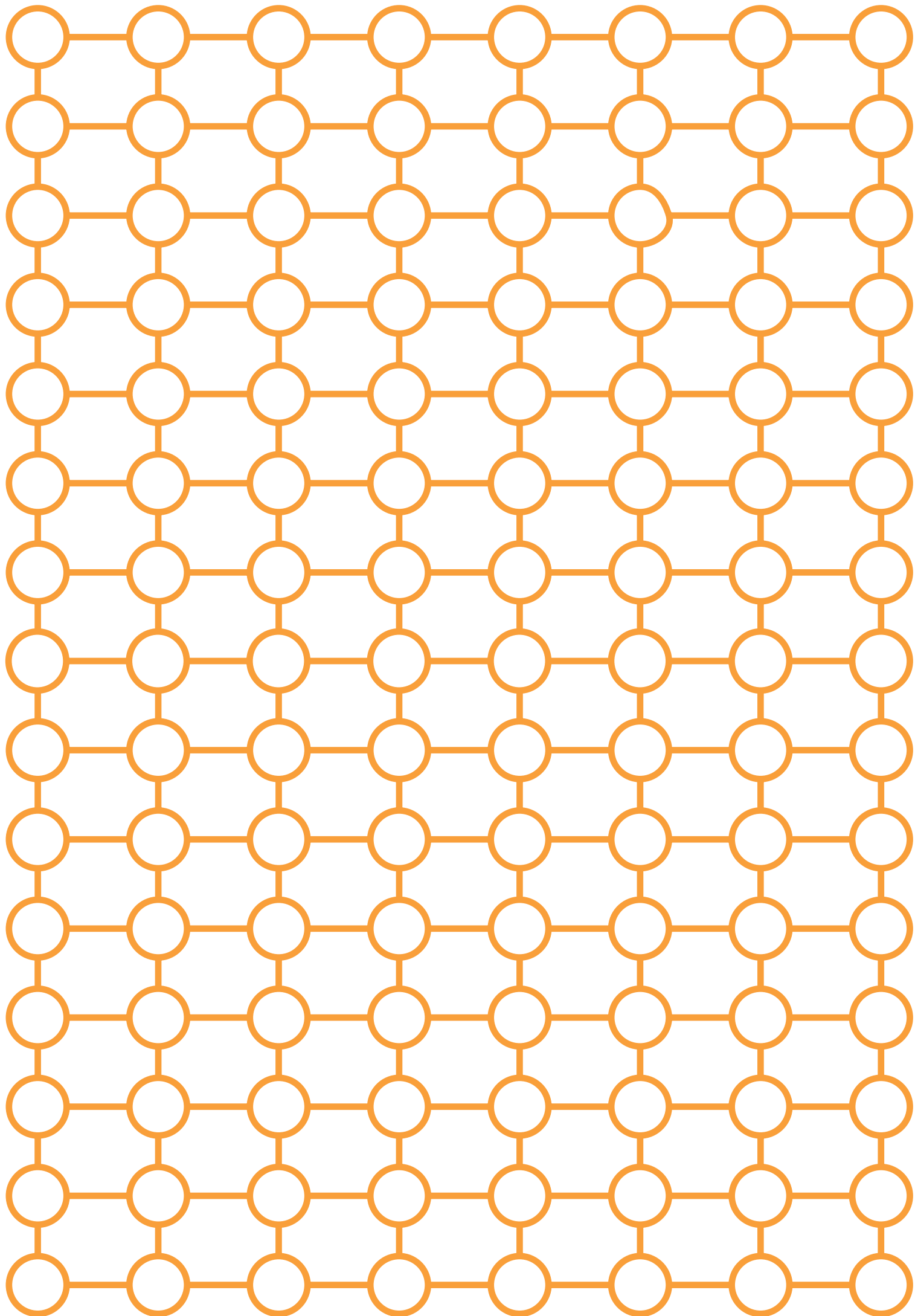
Esta proposta para ensino de Supercondutividade no Ensino Médio é composta por seis blocos de conteúdo, com carga horária total de 13 horas, a saber: Contexto histórico; Corrente e resistividade elétrica; Resistividade nula e efeito Meissner; Supercondutor x condutor perfeito; Teoria BCS; Tipos de supercondutores.

Para o desenvolvimento dos conteúdos propostos em cada bloco, é oferecido aos professores um material de apoio que contempla, além das referências utilizadas para a sua construção, duas orientações: I) texto de apoio para o professor; II) plano de trabalho para o desenvolvimento do conteúdo. Além disso, por fim, apresentamos considerações sobre a proposta.

A proposta é tratar a supercondutividade a partir de seu contexto histórico, seguindo de conceitos físicos necessários para sua compreensão. Na sequência, serão apresentadas as principais propriedades da Supercondutividade – resistividade nula e efeito Meissner – e tratados os aspectos gerais do material quando atinge o seu estado supercondutor. Por fim, serão abordados o comportamento do campo magnético no condutor perfeito e no supercondutor, bem como a teoria BCS e os tipos de supercondutores.

A proposta da inserção da Supercondutividade fundamentada pela metodologia da Aprendizagem Baseada em Problemas é direcionada ao 3º ano do Ensino Médio por necessitar de conhecimentos prévios referentes a alguns conteúdos específicos desta série, tais como corrente elétrica, campo magnético e outros. Além disso, a maturidade dos alunos facilita a compreensão da contextualização da temática e de suas atuais aplicações descobertas com a contribuição dos avanços tecnológicos.

Esperamos que esta pesquisa colabore para que seja pensada a necessidade de inserir a temática Supercondutividade no Ensino Médio, e que esta ocorra por meio de um ensino que promova uma aprendizagem significativa para o aluno, possivelmente, com a utilização da ABP.





## I

## TEXTO DE APOIO AO PROFESSOR: SUPERCONDUTIVIDADE NO ENSINO MÉDIO<sup>1</sup>

### 1. CONTEXTO HISTÓRICO

---

Supercondutores são materiais que conduzem eletricidade com resistência praticamente nula, quando submetidos a baixíssima temperatura. Este fenômeno completou 100 anos em 2011 e ainda intriga os cientistas que, com os avanços tecnológicos, evoluem seu estudo.

A Supercondutividade foi descoberta por um físico holandês, Heike Kamerlingh Onnes, em 1911. Onnes pesquisava sobre os efeitos nas propriedades dos metais expostos a temperaturas extremamente baixas, quando descobriu que o mercúrio perdia toda a resistência ao fluxo de eletricidade quando resfriado a cerca de 4K. A este estado de resistividade zero, ele denominou Supercondutividade e, a partir daí, todo material que atinge esta característica quando abaixo de uma temperatura crítica, que varia de material para material, chamados de supercondutores. Ele recebeu o Prêmio Nobel de Física em 1913. (MAYO, 1989).

Figura 1 - Heike Kamerlingh Onnes, descobridor da Supercondutividade



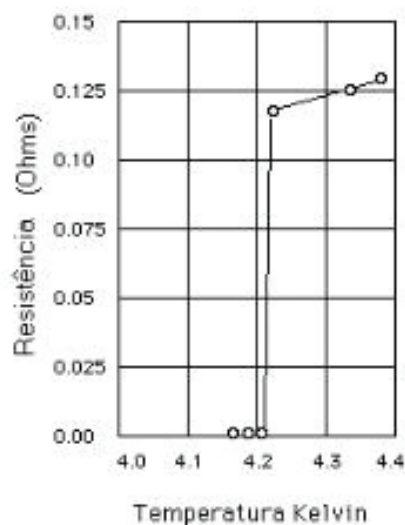
Fonte: Branício (2001).

Em 1912, foi demonstrado que o fenômeno da Supercondutividade não ocorria somente no mercúrio, quando Onnes e seus colaboradores verificaram que o estanho e o chumbo também apresentariam tais características quando submetidos a temperaturas de 3,7 K e 7,2 K, respectivamente. Com este avanço na pesquisa deste fenômeno, vem sendo ampliado o número de sistemas supercondutores a serem analisados e aplicados. (OSTERMANN, 2005).

---

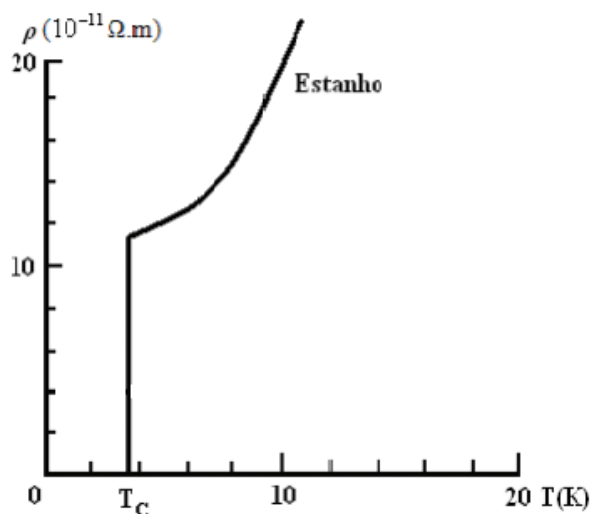
<sup>1</sup> Texto elaborado pela mestrandia Nara Gracy Travessa Barbosa, sob a orientação do Prof. Dr. Igor Tavares Padilha e da profa. Dra. Rosa Oliveira Marins de Azevedo.

Figura 2 – Relação entre Resistência (ohms) e Temperatura (K) do Mercúrio (Hg)



Fonte: Rocha (2010).

Figura 3 – Relação entre Resistência (ohms) e Temperatura (K) do estanho



Fonte: Adaptado de Ostermann (2005 apud VAZ, 2009).

Em 1933, a Supercondutividade passa a ser encarada como um novo estado de matéria após a descoberta da propriedade dos supercondutores realizada pelo físico alemão Walther Meissner e seu assistente Robert Ochsenfeld, o efeito Meissner. Tal propriedade consiste na expulsão total do fluxo de campo magnético do interior do supercondutor, quando este é resfriado abaixo de sua temperatura crítica. (ROCHA, 2010).

Em 1934, o físico inglês F. London formula sua teoria sobre as propriedades eletrodinâmicas dos supercondutores, com a proposta do modelo de dois fluidos (elétrons normais e superelétrons). Suas equações não explicam o fenômeno da Supercondutivi-

dade, apenas o descrevem. (OSTERMANN, 1998).

Em 1950 foi desenvolvida a teoria fenomenológica ou macroscópica da Supercondutividade, pelos físicos V. L. Ginzburg e L. D. Landau. Esta é uma teoria que não explica os mecanismos microscópicos que dão origem a Supercondutividade, em vez disso, a teoria analisa as propriedades macroscópicas de um supercondutor com o auxílio de termodinâmica e conceitos da Mecânica Quântica. (CLARIM, 2012, p.13).

Dando fundamento às teorias fenomenológicas de London e dos russos Ginzburg-Landau, em 1957, os americanos Bardeen, Cooper e Schrieffer formularam a teoria microscópica da Supercondutividade, a teoria BCS. O ponto chave nesta teoria é a formação de pares de elétrons, conhecidos como Pares de Cooper. Em reconhecimento da importância de sua teoria, em 1972, receberam o prêmio Nobel de Física. (ROCHA, 2010).

Outra importante propriedade dos supercondutores foi proposta teoricamente em 1962, pelo físico inglês Brian David Josephson, o efeito Josephson. Este baseia-se no fenômeno do tunelamento de pares de Cooper entre dois supercondutores separados por uma distância menor que 10 Å. (COSTA; PAVÃO, 2012).

Em 1986, ocorreu a descoberta da Supercondutividade de alta temperatura crítica num cuprato de lantânio e bário, pelos físicos americanos Karl Alex Muller e J. Georg Bednorz, onde um ano depois ganharam o prêmio Nobel de Física. Ainda em 1987, os físicos americanos Paul Chu e Maw-Kuen Wu descobrem o sistema composto por Y-Ba-Cu-O com temperatura crítica de 93 K, mostrando grande avanço na pesquisa dos materiais supercondutores. Em 1988 apresenta-se Supercondutividade a 110 K no sistema Bi-Ca-Sr-Cu-O. Em 1993 Supercondutividade do composto Hg-Ba-Ca-Cu-O a uma temperatura  $\cong 135$  K.

Em 2003, três cientistas que colaboraram para elucidar o estranho comportamento da matéria em temperaturas extremamente baixas, dividiram o Prêmio Nobel de Física, são eles: Alexei A. Abrikosov, Vitaly Ginzburg e Anthony Leggett. Tais cientistas deram contribuições relacionadas a dois fenômenos da física quântica: Supercondutividade e superfluidez. (STUDART, 2003).

Em 2008, foi realizada a descoberta da massa do Bóson de Higgs através do maior acelerador de partículas do mundo, que pertence ao Centro Europeu de Pesquisas Nucleares (Cern), o LHC (Large Hadron Collider, ou, em português, Grande Colisor de Hádrons), onde são usados ímãs e fios supercondutores, devido exigir a utilização de campos magnéticos fortíssimos para funcionar.

Ainda em 2008, H. Hosono e alguns pesquisadores do Instituto de Tecnologia de Tóquio anunciaram a observação de Supercondutividade com  $T_c = 26$  K num sistema contendo átomos de lantânio, ferro, arsênio, oxigênio e flúor. Dessa sequência surgiram famílias de compostos supercondutores, os ferro-pnictídeos, gerados de modificações na composição química do composto original. (PUREUR, 2012).

Em 2010 ocorreu a descoberta do primeiro hidrocarboneto aromático supercondutor, que consiste em um composto orgânico aromático, cuja molécula é constituída de cinco anéis de benzeno. (SANTOS, 2010).

Em 2015, um recorde na área da Supercondutividade foi quebrado, quando uma equipe alemã descobriu como fazer com que um material comum e malcheiroso se torne um supercondutor a apenas  $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Tal material se trata do sulfeto de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{S}$ ), gás responsável pelo mau cheiro dos ovos podres.

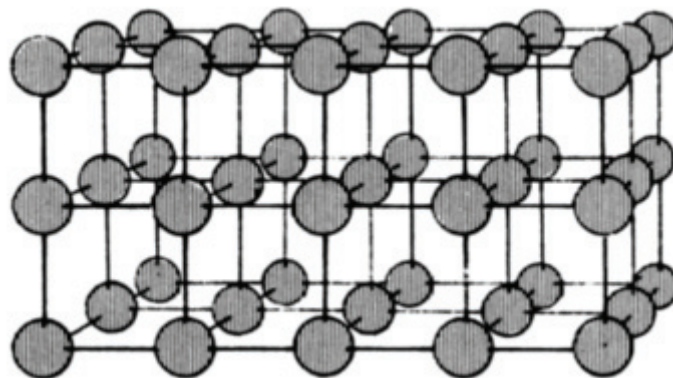
## 2. CORRENTE E RESISTIVIDADE ELÉTRICA

---

### 2.1 Corrente elétrica

Um fio metálico contém uma grande quantidade de partículas, tendo, assim, uma estrutura diferente de um átomo isolado de um metal qualquer. No interior do metal, cada átomo perde, em geral, um ou dois elétrons, tornando-se, portanto, íons positivos, os quais arranjam-se de maneira bastante regular, constituindo uma rede cristalina tridimensional, como mostra a Figura 4. (GREF, 1993).

Figura 4 – Rede cristalina tridimensional.



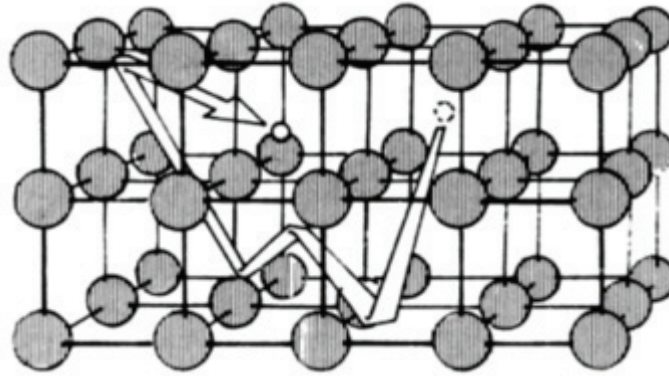
Fonte: Adaptada de GREF (1993).

Os elétrons perdidos pelos átomos ficam se movimentando pelos espaços vazios entre os íons, tendo em vista que íons no interior dos metais não formam estruturas compactas. A distância entre dois íons de uma rede cristalina é três vezes o valor do raio de um íon, espaço esse disponível para a movimentação dos elétrons, denominados elétrons livres. (GREF, 1993).

Estando submetidos a determinada temperatura, tanto o íon quanto os elétrons

se movimentam, mas enquanto os íons se movimentam em torno de sua posição de equilíbrio, os elétrons livres se movem de forma desordenada e aleatória, como mostra a Figura 5. (GREF, 1993).

**Figura 5** – Movimento desordenado de um elétron livre no interior de um metal.



Fonte: Adaptada de GREF (1993).

Esse movimento desordenado dos elétrons, presente em um fio metálico desconectado de uma fonte de energia elétrica, não constitui a corrente elétrica macroscópica, relevante para medidas usuais. Neste caso, a corrente elétrica somente é constituída pelo movimento ordenado dos elétrons, obtido pela atuação de uma força elétrica sobre cada elétron livre. Esta última sendo gerada por uma diferença de potencial ao qual o fio é submetido. (OSTERMANN, 1998).

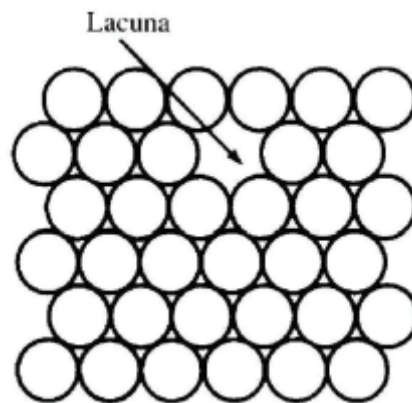
## 2.2 Resistividade elétrica

As estruturas cristalinas se encontram somente em sais, metais e maior parte dos minerais. Nessas estruturas podem existir defeitos<sup>2</sup> ou imperfeições. Dentre esses defeitos existem os defeitos pontuais, os quais consistem em irregularidades que se estendem sobre somente alguns átomos. Estes podem ser lacunas, intersticiais ou substitucionais. (MORA, 2010, p. 144).

O defeito pontual mais simples é a lacuna, que corresponde a uma posição atômica na qual falta um átomo, como mostra a Figura 6.1; o defeito intersticial consiste na presença de um átomo em uma posição que não pertence à estrutura do cristal perfeito, representado na Figura 6.2; e o defeito substitucional ocorre quando átomos têm tamanhos próximos àqueles da matriz com diferenças entre raios menores que 15 % (Figura 6.3). (MORA, 2010, p. 145).

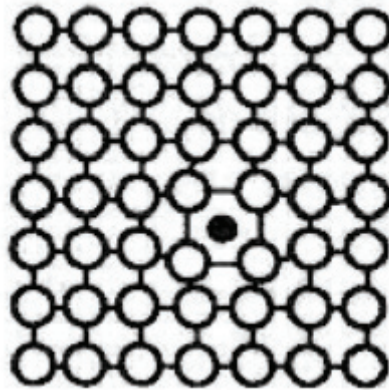
<sup>2</sup>Defeito cristalino é uma imperfeição ou um “erro” no arranjo periódico regular dos átomos em um cristal. (MORA, 2010).

Figura 6.1 – Defeito pontual: lacuna.



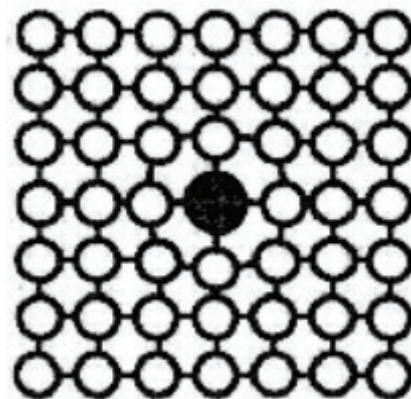
Fonte: Mora (2010).

Figura 6.2 – Defeito intersticial.



Fonte: Mora (2010).

Figura 6.3 – Defeito substitucional.



Fonte: Mora (2010).

Devido à presença de impurezas ou imperfeições na rede cristalina, como os defeitos pontuais, e às vibrações térmicas, o movimento dos elétrons livres sofre oposição, deslocando os íons de sua posição de equilíbrio. Com o deslocamento dos íons, os elétrons livres se espalham de forma que suas direções se tornam diferentes da corrente elétrica. Tal oposição à corrente elétrica é denominada resistividade elétrica. (OSTERMANN, 1998).

### 3. RESISTIVIDADE NULA E EFEITO MEISSNER

---

As duas características do fenômeno da Supercondutividade, Resistividade nula e efeito Meissner, tiveram muitas teorias a seu respeito, entre elas, estão: modelo de Drude, teoria de London e teoria de Ginzburg-Landau. Tais características e suas teorias serão abordadas nesta seção.

#### 3.1 Modelo de Drude

Em 1900, três anos depois da descoberta do elétron por J.J. Thomson, Drude construiu uma teoria sobre a condução térmica e elétrica, aplicando a Teoria Cinética dos gases para um metal, considerando-o como um gás de elétrons. (CLARIM, 2012).

Drude adaptou a teoria cinética dos gases para desenvolver um modelo para a condutividade em metais, permitindo descrever e prever uma série de propriedades desses metais. (CLARIM, 2012).

O seu modelo consistia em admitir que, num metal, alguns dos elétrons se liberam dos átomos e ficam livres, deixando íons que ficam fixos. Os elétrons de valência que se separam dos íons, formam um gás de elétrons, podendo mover-se livremente. A resistência elétrica seria devida a colisões desses elétrons com os íons fixos. (ALCÁCER, 2013).

As hipóteses do Modelo de Drude, podem ser apresentadas resumidamente: pelo movimento retilíneo uniforme, o qual os elétrons se movem na ausência de campos eletromagnéticos externos; pelas colisões de elétrons com os íons, como na Teoria Cinética, sendo eventos instantâneos que alteram a velocidade do elétron; pela possibilidade de um elétron escolhido aleatoriamente poder deslocar-se por um tempo  $\tau$  (tempo livre médio ou tempo de relaxamento), antes da sua próxima colisão; pelo equilíbrio térmico com o meio, alcançado pelos elétrons apenas através das colisões e quanto maior for a temperatura onde ocorre a colisão, mais rapidamente um elétron emerge dessa colisão. (CLARIM, 2012).

### 3.2 Condutividade elétrica nos metais

A resistividade  $\rho$  é a constante de proporcionalidade entre o campo elétrico  $E$  em um ponto no metal e a densidade de corrente que é induzida neste metal. Representada por:

$$E = \rho j \quad (3.1)$$

A densidade de corrente  $j$  é um vetor, paralelo ao fluxo de cargas, e sua intensidade é a quantidade de cargas por unidade de tempo que circula por uma área perpendicular ao fluxo.

Considerando o movimento de  $n$  elétrons em um metal com velocidade  $v$  por unidade de volume  $V$ , esta densidade de corrente pode ser descrita da seguinte forma,

$$j = -env \quad (3.2)$$

Na presença de um campo externo, segundo o modelo de Drude, a velocidade dos elétrons após uma colisão, pode ser escrita em função da aceleração imposta por este campo.

$$-eE = m \frac{dv}{dt} \rightarrow v = -\frac{eE\tau}{m} \quad (3.3)$$

Substituindo a equação (3.3) na equação (3.2), temos:

$$j = \frac{ne^2\tau}{m} E \quad (3.4)$$

A Condutividade é dada pelo inverso da resistividade, sendo portanto:

$$\sigma = \frac{ne^2\tau}{m} \quad (3.5)$$

Podendo escrever a resistividade, sendo proporcional a  $\tau^{-1}$ , frequência de espalhamento.

$$\rho = \frac{m}{ne^2\tau^{-1}} \quad (3.6)$$

De acordo com os três tipos de espalhamento em um metal típico, espalhamento por impurezas, por interação elétron-elétron e pelas colisões elétron-fônon, e suas respectivas dependências da temperatura, a resistividade de um metal a baixas temperaturas pode ser representada por:

$$\rho = \rho_0 + aT^2 + \dots \quad (3.7)$$

Onde a resistividade  $\rho_0$  dependeria apenas da concentração de impurezas no material.

A resistividade elétrica de um metal diminui à medida em que o material é resfriado. Quando a temperatura é diminuída, as vibrações térmicas dos íons diminuem e os elétrons de condução sofrem menor número de espalhamentos. (OSTERMANN, 1998).

Porém, em alguns metais, notou-se que a resistividade apresenta um comportamento dife-



rente, onde, ao ser resfriado, a resistividade do metal diminui, mas chegando em um determinado momento, ela desaparece. A temperatura onde a resistividade cai a zero, denomina-se temperatura crítica, representada por  $T_c$ . A esse fenômeno dá-se o nome de Supercondutividade. (CLARIM, 2012).

### 3.3 Resistividade Nula

Em um supercondutor submetido à temperatura abaixo da temperatura crítica, a resistividade elétrica é nula e a condutividade é infinita. A resistividade nula no supercondutor é representada por uma transição de fase termodinâmica, cujas fases são “estado normal” e “estado supercondutor”. A primeira se refere ao estado acima da temperatura crítica e a segunda se refere ao estado abaixo da temperatura crítica. (CLARIM, 2012).

Uma outra característica do supercondutor é o fato de serem materiais diamagnéticos perfeitos. O diamagnetismo perfeito impede a penetração do fluxo magnético num supercondutor e resulta no aparecimento de uma corrente de blindagem, à superfície do material. O fenômeno da não penetração do campo magnético no material é denominado efeito Meissner. (TAVARES, 2000).

### 3.4 Efeito Meissner

O efeito Meissner foi descoberto, em 1933, por Walther Meissner e seu assistente, Robert Ochsenfeld ao observar amostras supercondutoras de Estanho submetidas a um campo magnético externo. (CLARIM, 2012).

Esse efeito consiste na expulsão do campo magnético do interior do supercondutor, ou seja, ao ser aplicado um campo magnético em um supercondutor, este campo não consegue penetrar no seu interior. Isso ocorre devido o campo elétrico ser nulo,  $E = 0$ . (CLARIM, 2012).

O campo magnético permanece nulo dentro do supercondutor, devido à existência de uma corrente de blindagem que circula em sua superfície, a qual produz um campo magnético igual em módulo, mas em sentido oposto ao campo externo aplicado no supercondutor, obtendo assim um campo magnético resultante igual a zero. (CLARIM, 2012).

Analisando as correntes de blindagem, temos a densidade total de corrente como sendo formada pela densidade de corrente externa e interna.

$$\mathbf{j} = \mathbf{j}_{ext} + \mathbf{j}_{int} \quad (3.8)$$

A partir da magnetização por unidade de volume  $M$  gerada pelas correntes de blindagem no supercondutor, associada à densidade de corrente interna, e o campo magnético  $H$  em termos de

densidade de corrente externa, temos que os vetores  $M$ ,  $H$  e  $B$  são relacionados por:

$$B = \mu_0(H + M) \quad (3.9)$$

Como no supercondutor, de acordo com o efeito Meissner,  $B = 0$ , temos:

$$M = -H \quad (3.10)$$

Assim temos para os supercondutores uma susceptibilidade magnética,  $\chi = -1$ , uma vez que esta é definida por:

$$\chi = \left. \frac{dM}{dH} \right|_{H=0} \quad (3.11)$$

A susceptibilidade magnética negativa indica que o material é um diamagnético, o qual impede a entrada de parte do campo magnético externo. No caso do supercondutor, trata-se de um diamagnético perfeito, o qual o campo magnético é totalmente impedido de entrar.

Através do efeito Meissner ficou demonstrado que um supercondutor não é simplesmente um metal com resistividade zero, pois a resistividade nula não implica diamagnetismo perfeito. Permitiu também estabelecer que a transição do estado normal para o supercondutor é uma transição termodinâmica reversível. (OSTERMANN, 1998).

### 3.5 A Teoria de London

Em 1934, os irmãos F. e H. London contribuíram para a descrição da supercondutividade ao relacioná-la ao modelo de dois fluidos. Do ponto de vista teórico, foi a primeira formulação capaz de explicar o efeito Meissner-Ochsenfeld tomando como base as equações de Maxwell do eletromagnetismo e fazendo-se algumas suposições adicionais. (PEREIRA; FÉLIX, 2013).

Tratando-se de um modelo para descrever a ausência de campo magnético no interior de um material supercondutor na presença de um campo externo, a teoria de London falha ao tentar explicar a Supercondutividade quando não há campo magnético externo presente. Foi então que, em 1950, apareceu uma teoria fenomenológica, baseada em observações experimentais que descreve essas propriedades, a teoria de Ginzburg-Landau. (PEREIRA; FÉLIX, 2013).

### 3.6 Teoria de Ginzburg-Landau

A teoria de Ginzburg-Landau da Supercondutividade foi formulada pelos físicos L.D. Landau e V.L. Ginzburg. Também considerada uma teoria fenomenológica, a teoria

de Ginzburg-Landau explica as propriedades termodinâmicas da transição do estado normal para o estado supercondutor. (OSTERMANN, 1998).

Todas as características e propriedades apresentadas na formulação de Ginzburg-Landau do fenômeno seguem da função termodinâmica chamada densidade de energia livre, que apresenta uma dependência da função  $\psi \equiv \psi(r)$ , relacionada a quantidade de elétrons supercondutores do material (superelétrons), onde é zero se o material estiver a uma temperatura acima da temperatura crítica ( $\psi = 0$ , se  $T > T_C$ ) e é diferente de zero somente quando a temperatura for menor que a temperatura crítica ( $\psi \neq 0$ , se  $T < T_C$ ). (PEREIRA, FÉLIX, 2013).

Dentre as consequências das equações de Ginzburg-Landau estão: o campo crítico termodinâmico como função da temperatura ( $H_c(T)$ ), onde a transição entre o estado supercondutor e o estado normal acontece quando o módulo do campo  $H$  fica maior que o campo crítico  $H_c$  (campo magnético capaz de destruir a Supercondutividade) (OSTERMANN, 1998); o comprimento de penetração ( $\lambda_L$ ), comprimento característico do comportamento de atenuação do campo magnético no interior do material supercondutor, onde mostra que um campo magnético externo de amplitude  $B_0$  decai exponencialmente à medida que penetra na amostra supercondutora (PEREIRA, FÉLIX, 2013); o comprimento de coerência ( $\xi$ ), o qual representa o comprimento ao longo do qual o parâmetro de ordem  $\psi$  varia (mede a escala de variação espacial de  $\psi$ ).  $\xi$  também vai a infinito quando  $T \rightarrow T_c$ . (OSTERMANN, 1998).

#### 4. SUPERCONDUTOR X CONDUTOR PERFEITO

---

Até 1933 acreditava-se que o efeito de um campo magnético sobre um supercondutor seria como em um condutor perfeito. Entretanto, Meissner e Ochsenfeld submeteram amostras de estanho e chumbo ao processo de resfriamento na presença de campo e, ao contrário do que ocorre com o condutor perfeito, observaram que o fluxo total dentro das amostras cancelava-se, isto é, elas espontaneamente transformavam-se em diamagnetos perfeitos. (OSTERMANN, 1998).

O estado de magnetização de um condutor perfeito não está unicamente determinado pelas condições externas, mas depende da sequência com que estas condições foram obtidas. Para tal demonstração, consideremos uma mesma sequência de eventos aplicada, primeiramente a um condutor perfeito e, em seguida, a um supercondutor.

##### 4.1 Comportamento magnético em um Condutor Perfeito

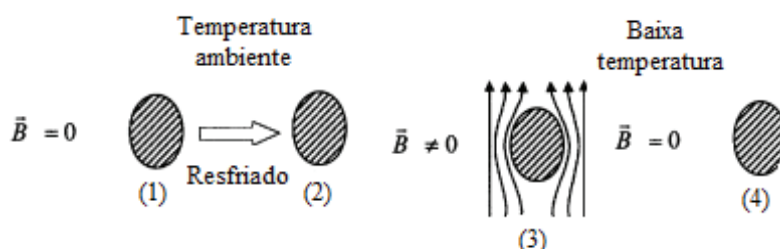
Consideremos duas sequências de eventos para um condutor perfeito.

A primeira sequência analisada em um condutor perfeito, consiste em:

1. Um condutor perfeito em temperatura ambiente em campo nulo.
2. Resfriamento do condutor até o alcance de uma resistividade desprezível.
3. A seguir, a aplicação de um campo magnético, ainda a uma temperatura na qual a resistividade desprezível.
4. Finalmente, o campo é retirado.

Após a aplicação dos quatro passos dessa sequência, observa-se que o material não fica magnetizado e desaparecem as correntes de blindagem e a densidade de fluxo  $B$  gerada é, então, nula.

Figura 7 – Comportamento magnético de um condutor perfeito – Primeira sequência.



Fonte: Adaptada de Ostermann (1998).

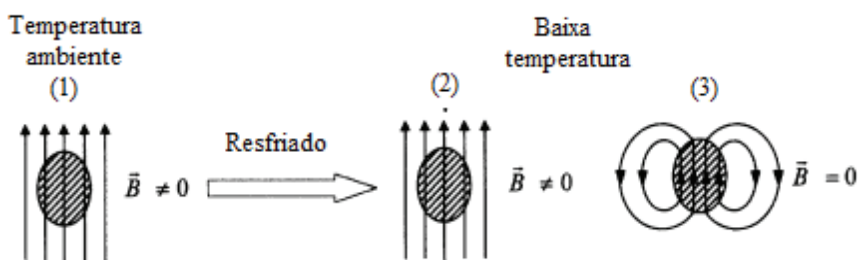
A segunda sequência de eventos adaptada para um condutor perfeito consiste em:

1. A aplicação de um campo magnético ao condutor perfeito em temperatura ambiente.
2. O resfriamento do material a uma baixa temperatura, na qual sua resistividade vai a zero.

Como o desaparecimento da resistividade não tem efeito sobre a magnetização, então a distribuição de fluxo permanece inalterada.

3. A redução do campo magnético a zero, resultando assim, em uma magnetização permanente do material. Isso ocorre devido as correntes persistentes serem induzidas no material (conforme a Lei de Faraday-Lenz), mantendo o fluxo no seu interior.

Figura 8 – Comportamento magnético de um condutor perfeito – Segunda sequência.



Fonte: Adaptada de Ostermann (1998).

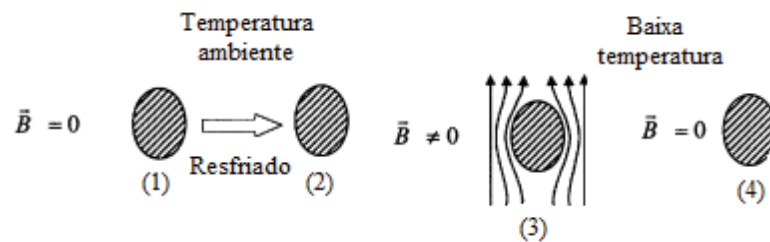
Nota-se, das Figuras 7 e 8 que o estado de magnetização de um condutor perfeito não é determinado apenas pelas condições externas, mas também pela sequência com que essas condições foram obtidas. Isto é nitidamente observado, principalmente, ao final das duas sequências, os quais mostram diferentes estados de magnetização sob condições externas idênticas.

#### 4.2 Comportamento magnético em um Supercondutor

O experimento realizado por Meissner e Ochsenfeld, em 1933, demonstrou que os supercondutores além de possuírem resistividade nula, expulsam as linhas de fluxo do seu interior. Assim, dentro de um material supercondutor, temos sempre  $B = 0$ .

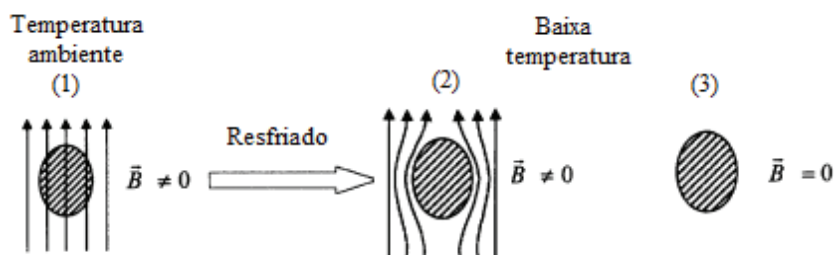
O comportamento magnético de um supercondutor, portanto, se diferencia do condutor perfeito ainda que seguindo as mesmas sequências adotadas a ele, como mostram as Figuras 9 e 10.

Figura 9 – Comportamento magnético de um supercondutor – Primeira sequência.



Fonte: Adaptada de Ostermann (1998).

Figura 10 – Comportamento magnético de um supercondutor – Segunda sequência.



Fonte: Adaptada de Ostermann (1998).

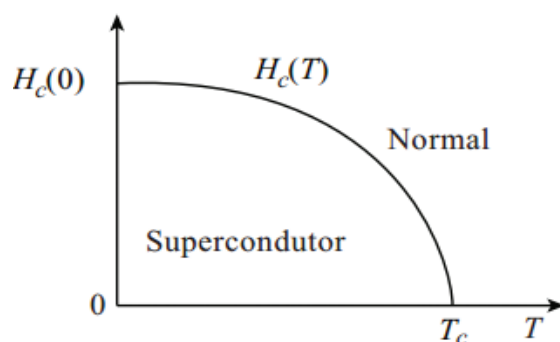
## 5. TIPOS DE SUPERCONDUTORES

Os supercondutores são divididos em dois tipos, que são: Tipo I e Tipo II, de acordo com suas propriedades específicas.

## 5.1 Supercondutores Tipo I

Nos supercondutores Tipo I, o campo magnético  $H$  é nulo em seu interior até a Supercondutividade ser destruída. O valor do campo o qual ocorre tal destruição é dito campo crítico,  $H_c$ . Esse valor de campo é máximo para  $T = 0$  K e é nulo para  $T = T_c$ , como mostra a Figura 11.

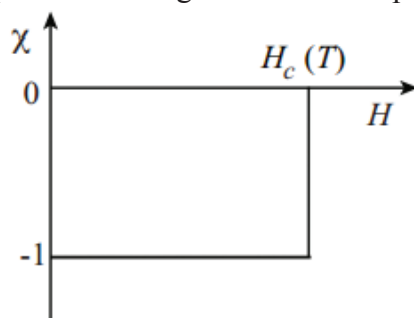
Figura 11 – Evolução do campo magnético crítico em relação à temperatura.



Fonte: Alcácer (2013).

Ao que se trata da susceptibilidade magnética do supercondutor do Tipo I, para um campo magnético exterior inferior ao campo crítico, tem-se  $\chi = -1$  (Figura 12), indicando que o campo não penetra no material. Quando se ultrapassa o valor do campo crítico,  $\chi$  toma um valor positivo.

Figura 12 – Susceptibilidade magnética de um supercondutor do tipo I.



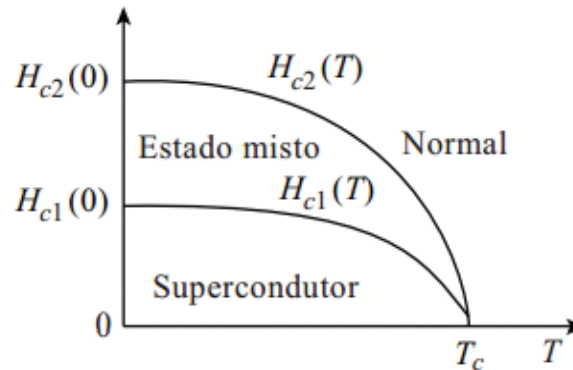
Fonte: Alcácer (2013).

## 5.2 Supercondutores Tipo II

Os supercondutores do tipo II, apresentam dois valores de campo crítico,  $H_{c1}$  e  $H_{c2}$ . Para valores de campo inferiores a  $H_{c1}$ , todo o material é supercondutor; entre  $H_{c1}$  e  $H_{c2}$ , só parte do material está no estado supercondutor estando o restante no estado normal, dito estado misto, e, para valores superiores a  $H_{c2}$ , todo o material retorna ao

estado normal, como mostra a Figura 13.

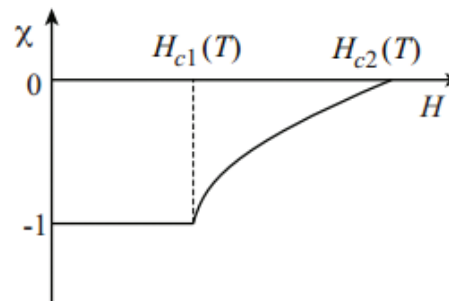
Figura 13 – Campos críticos para um supercondutor do tipo II.



Fonte: Alcácer (2013).

A susceptibilidade magnética do supercondutor do Tipo II apresenta-se igual ao supercondutor do Tipo I até o campo crítico inferior  $H_{c1}$ . A partir daí, verifica-se uma variação da susceptibilidade magnética de acordo com o valor do campo magnético crítico superior  $H_{c2}$ , conforme a Figura 14.

Figura 14 – Susceptibilidade magnética de um supercondutor do tipo II.



Fonte: Alcácer (2013).

Os supercondutores do Tipo II apresentam maior interesse tecnológico devido o valor do campo externo  $H_{c2}$  ser suficientemente elevado, permitindo um transporte de corrente em quantidade suficiente para a aplicação tecnológica, sem ultrapassar esse campo, permanecendo no estado misto.

## 6. TEORIA BCS

A teoria BCS foi desenvolvida em 1957 por John Bardeen, Leon Cooper e Robert Schrieffer, a qual consiste na teoria microscópica da Supercondutividade, porém, seu domínio se restringe aos supercondutores do Tipo I.

A ideia básica da teoria BCS reside na existência dos pares de Cooper, resultantes do potencial atrativo entre dois elétrons, mediada por um fônon. A interação elétron-fônon dá-se a partir da interação elétron-rede. (ALCÁCER, 2013).

Os elétrons interagem com a rede devido ao espalhamento dos elétrons livres ocasionado pelas vibrações térmicas, impurezas e imperfeições. Esta interação determina a resistividade dos materiais.

Quando um elétron é espalhado, um modo de vibração da rede deve ser excitado no processo de espalhamento. Este movimento de vibração é quantizado e fala-se, então, em emissão (ou absorção) de um fônon. Assim, a interação elétron-rede é chamada interação elétron-fônon. (OSTERMANN, 1998).

Em 1950, Frohlich, já havia demonstrado que a interação elétron-fônon poderia ocasionar uma ligação entre dois elétrons. Em 1956, surgiu a ideia dos pares de Cooper proposta por Leon Cooper, a qual mostra que o elétron muda seu comportamento quando interage com os fônons da rede cristalina.

Antes das ideias propostas por Frohlich e Cooper, era improvável pensar na formação de pares de elétrons, devido à forte repulsão coulombiana entre os elétrons. Mas o estudo da interação elétron-fônon mostrou a existência de uma interação atrativa entre dois elétrons no interior de uma rede cristalina. Tal interação foi denominada pares de Cooper.

A formação dos pares de Cooper dá-se através do deslocamento da rede cristalina provocada pela atração coulombiana entre os elétrons e os íons positivos que a constituem. Este deslocamento torna maior a densidade das cargas positivas próximas aos elétrons, fazendo com que um fônon seja emitido da rede cristalina. Este pode atrair outro elétron que esteja próximo, conseguindo fazer a "atração" entre os elétrons, formando o que chamamos de Pares de Cooper. (OSTERMANN; 1998)



## II

## PLANO DE TRABALHO PARA DESENVOLVIMENTO DO CONTEÚDO

O plano de trabalho, a presentedo logo abaixo, está organizado em duas etapas: a primeira, introdutória, com duas aulas, contém os seguintes elementos: objetivos, atividade de ensino-aprendizagem (atividade do professor e atividade do aluno), recursos de ensino; a segunda, desenvolvimento do conteúdo Supercondutividade, organizada em seis blocos de conteúdo, contendo cada um os seguintes elementos: número do bloco/ conteúdo, problema específico, objetivos, atividade de ensino-aprendizagem (atividade do professor e atividade do aluno), recursos de ensino. Nas duas etapas, a avaliação está integrada na atividade de ensino-aprendizagem.

### IDENTIFICAÇÃO

**Ensino Médio:** 3ª série

**Sugestão de carga horária:** 13 aulas de 50 min para cada aula

### PLANO DE TRABALHO PARA DESENVOLVIMENTO DO CONTEÚDO SUPERCONDUTIVIDADE

#### 1) Apresentação da proposta aos alunos

##### Objetivos

**Objetivo 1:** Reconhecer a existência da Supercondutividade no mundo, através de suas aplicações.

**Objetivo 2:** Conhecer os conteúdos da Supercondutividade inseridos nas aplicações apresentadas.

##### Atividade de ensino-aprendizagem

##### Atividades do Professor (AP)

**AP1:** Apresentar, por meio de vídeos e imagens, as aplicações dos supercondutores e a importância de sua existência;

**AP2:** Apresentar os conteúdos de Física, referente à temática Supercondutividade, presentes nas aplicações;

**AP3:** Aplicar um questionário para verificação dos conhecimentos prévios dos alunos sobre conceitos associados e importantes para o tema Supercondutividade;

**AP4:** Apresentar o problema central sobre a temática Supercondutividade para que, ao término das 13 aulas, os alunos possam ser capazes de resolvê-lo.

##### Atividades do Aluno (AA)

**AA1:** Interagir com a classe e professor sobre as imagens e vídeos apresentados, para reconhecimento da presença da Supercondutividade no mundo em que vivem;

**AA2:** Conhecer os assuntos de Supercondutividade relacionados às aplicações apresentadas, que serão abordados durante as aulas sobre essa temática.

**AA3:** Responder um questionário sobre alguns conceitos da Física, necessários para a compreensão da Supercondutividade, para a verificação dos conhecimentos prévios já adquiridos pelos alunos.

**AA4:** Conhecer o problema central da temática Supercondutividade.

## Recursos utilizados

### Imagens das aplicações dos supercondutores:

**Imagem 1** - Lexus Hoverboard

<http://www.supercondutividade.blogspot.com/>

**Imagem 2** - Seção de um condutor em cobre ao lado de um cabo supercondutor.

[http://www.clickciencia.ufscar.br/porta/edicao26/materia3\\_detalhe.php](http://www.clickciencia.ufscar.br/porta/edicao26/materia3_detalhe.php)

**Imagem 3** - LHC - Large Hadron Collider

### Vídeos exibidos em:

**Vídeo 1** - Lexus Hoverboard - 5:07

<https://www.youtube.com/user/supercondutividade>

**Vídeo 2** - Trem Maglev - 2:08

<https://www.youtube.com/watch?v=HGfsbQ7uzL8>

**Vídeo 3** - LHC - 3:27 e 1:57

<https://www.youtube.com/watch?v=MlUW5ibmNRY>

<https://www.youtube.com/watch?v=cnXGpXn23dc>

### Questionário sobre alguns conceitos físicos.

## 2) Desenvolvimento do conteúdo

### Bloco 01: Contexto histórico da Supercondutividade

**Problema específico:** Quais os fatos que deram origem e avanço à Supercondutividade?

### Objetivos

**Objetivo 1:** Conhecer os principais fatos que contribuíram para a evolução da Supercondutividade.

### Atividade de ensino-aprendizagem

#### Atividade do Professor (AP)

**AP1:** Apresentar e esclarecer o problema específico.

**AP2:** Apresentar por meio de slides, os principais fatos da história da Supercondutividade em ordem cronológica e orientar um debate, realizado em grupos pequenos, sobre a história da Supercondutividade

**AP3:** Orientar a elaboração de um vídeo, em pequenos grupos, sobre fatos importantes da história da Supercondutividade.

**Atividade do Aluno (AA)**

**AA1:** Analisar o problema específico.

**AA2:** Participar dos debates sobre as questões apresentadas no questionário sobre a história da Supercondutividade.

**AA3:** Elaborar um vídeo sobre um fato da história da Supercondutividade, como resolução do problema específico.

**Recurso utilizado**

Slides sobre a história da Supercondutividade

**Bloco 02:** Corrente elétrica e resistividade

**Problema específico:** Como se comportam os elétrons livres de um fio metálico diante a presença de impurezas e vibrações térmicas?

**Objetivos**

**Objetivo 1:** Compreender a função da resistência elétrica e resistividade e suas diferenças.

**Atividade de ensino-aprendizagem****Atividade do Professor (AP)**

**AP1:** Apresentar e esclarecer o problema específico.

**AP2:** Apresentar o objetivo de aprendizagem.

**AP3:** Lançar a pergunta: O que é Corrente elétrica? Instigar uma discussão sobre seu conceito.

**AP4:** Apresentar os vídeos sobre Estrutura cristalina e seus defeitos pontuais.

**AP5:** Proporcionar aos alunos textos avulsos sobre os conceitos de Corrente elétrica e resistência elétrica de diferentes autores.

**Atividade do Aluno (AA)**

**AA1:** Analisar o problema específico.

**AA2:** Discutir sobre o conceito de Corrente elétrica?

**AA3:** Fazer a leitura dos textos avulsos sobre os conceitos de Corrente elétrica e resistência elétrica de diferentes autores.

**AA4:** Sintetizar oralmente os conceitos de corrente elétrica e resistência elétrica, primeiramente em grupos pequenos e depois com a turma.

**AA5:** Apresentar a solução, por escrito, do problema específico.

**Recurso utilizado**

Vídeos sobre a estrutura cristalina de um metal e seus defeitos pontuais. Exibidos em:  
<https://www.youtube.com/watch?v=8F3Bh0n-w6c>  
[www.youtube.com/watch?v=lmzKwnDTD9I](http://www.youtube.com/watch?v=lmzKwnDTD9I)

Textos sobre conceitos de corrente elétrica e resistividade elétrica.  
Slides sobre Estrutura cristalina, corrente e resistividade elétrica.

**Bloco 03: Resistividade nula e efeito Meissner**

**Problema específico:** Como identificar que um material passou ao seu estado supercondutor?

**Objetivos**

**Objetivo 1:** Compreender a função da temperatura crítica na Supercondutividade.

**Objetivo 2:** Conhecer o comportamento das linhas de indução do Campo Magnético na presença de um supercondutor.

**Atividade de ensino-aprendizagem****Atividade do Professor (AP)**

**AP1:** Apresentar e esclarecer o problema específico.

**AP2:** Apresentar, através de gráficos, a perda da resistividade elétrica de um metal puro, impuro e de um supercondutor.

**AP3:** Conceituar o termo diamagnetismo e apresentar as características do efeito Meissner.

**AP4:** Apresentar vídeo sobre o efeito Meissner em supercondutores.

**Atividade do Aluno (AA)**

**AA1:** Analisar o problema específico.

**AA2:** Interpretar gráficos sobre a perda da resistividade elétrica de um metal puro, impuro e de um supercondutor.

**AA3:** Pesquisar materiais supercondutores e suas temperaturas críticas.

**AA4:** Em grupo, discutir sobre o efeito Meissner e elaborar uma síntese dessa discussão, de forma a solucionar o problema específico deste bloco.

**Recursos utilizados**

Gráficos Resistividade elétrica x Temperatura.

Slides sobre diamagnetismo e as características do efeito Meissner.

Vídeo sobre o efeito Meissner em supercondutores. Exibido em: <https://www.youtube.com/watch?v=JOLFXkeC8L4>

**Bloco 04: Supercondutor x Condutor perfeito**

**Problema específico:** Como o condutor perfeito e o supercondutor reagem à ação de um campo magnético externo?

**Objetivos**

**Objetivo 1:** Compreender como a ordem dos procedimentos aplicados em um condutor e em um supercondutor afetam no resultado do comportamento magnético.

**Atividade de ensino-aprendizagem****Atividade do Professor (AP)**

**AP1:** Apresentar e esclarecer o problema específico e o objetivo de aprendizagem.

**AP2:** Apresentar os passos para a elaboração dos esquemas sobre o comportamento do campo magnético em um condutor perfeito e em um supercondutor.

**AP3:** Organizar a sala em grupos e distribuir as imagens que comporão os esquemas.

**Atividade do Aluno (AA)**

**AA1:** Analisar o problema específico.

**AA2:** Discutir em grupo sobre a ordem dos procedimentos aplicados em um condutor e em um supercondutor.

**AA3:** Organizar os esquemas sobre o comportamento do campo magnético em um condutor perfeito e em um supercondutor em cartazes, como resolução do problema específico.

**Recursos utilizados**

Os passos sobre o comportamento do campo magnético em um condutor perfeito e em um supercondutor, proposto por Ostermann (1998).

**Bloco 05: Tipos de Supercondutores.**

**Problema específico:** Qual tipo de supercondutor tem mais valor em utilidade tecnológica? Quais características explicitam isso?

**Objetivos**

**Objetivo 1:** Conhecer os tipos de supercondutores e compreender suas características.

### Atividade de ensino-aprendizagem

#### Atividade do Professor (AP)

**AP1:** Apresentar e esclarecer o problema específico e o objetivo de aprendizagem.

**AP2:** Verificar a compreensão dos alunos quanto ao campo magnético fraco e campo magnético mais intenso.

**AP3:** Apresentar as principais características dos supercondutores dos tipos I e II.

#### Atividade do Aluno (AA)

**AA1:** Analisar o problema específico.

**AA2:** Discutir sua compreensão em relação ao campo magnético fraco e campo magnético mais intenso.

**AA3:** Elaborar uma síntese por intermédio de pesquisa individual, como resolução do problema específico.

#### Recursos utilizados

Slides sobre os supercondutores dos tipos I e II.

### Bloco 06: Teoria BCS

**Problema específico:** De acordo com a teoria BCS, como se comportam os elétrons de um supercondutor, de forma a apresentar resistividade nula?

#### Objetivos

**Objetivo 1:** Conhecer a Teoria BCS da Supercondutividade.

**Objetivo 2:** Compreender a interação elétron-rede-elétron prevista por Leon Cooper.

### Atividade de ensino-aprendizagem

#### Atividade do Professor (AP)

**AP1:** Apresentar e esclarecer o problema específico e o objetivo de aprendizagem.

**AP2:** Apresentar a teoria BCS.

#### Atividade do Aluno (AA)

**AA1:** Analisar o problema específico.

**AA2:** Apresentar em grupo, por escrito, a resolução do problema específico sobre a Teoria BCS.

#### Recursos utilizados

Slides sobre a Teoria BCS.

## III

## CONSIDERAÇÕES SOBRE A PROPOSTA

A aplicação da proposta apresentada é destinada aos alunos do 3º ano do Ensino Médio, tendo em vista que alguns conceitos físicos necessários para o trabalho com a temática Supercondutividade são abordados nesse ano, como: corrente elétrica, resistência e resistividade elétrica, campo magnético, entre outros.

Essa proposta é baseada na metodologia da Aprendizagem Baseada em Problemas, assim, para um bom desenvolvimento da proposta, é de extrema importância o professor que irá aplicá-la conhecer tal metodologia (características, os passos da ABP e algumas aplicações). Tal importância se deve ao fato de, uma vez conhecendo sua(s) turma(s) e a metodologia, o professor terá como adequá-la de acordo com sua realidade.

Vale ressaltar que, embora estejam sendo sugeridas adequações à metodologia, a ABP apresenta características imprescindíveis, como o aluno tendo um papel atuante no processo ensino-aprendizagem, o papel do professor como um tutor, a presença de um problema a ser solucionado e o trabalho em grupo.

Na aplicação da proposta, a interação entre os alunos e a pesquisa individual, contribuem de forma significativa para apresentações de resoluções do problema. Apesar de reconhecer tamanha contribuição, são perceptíveis as dificuldades encontradas nesses dois momentos, pois no ensino tradicional não é comum o trabalho em grupo, tampouco a cultura de se fazer uma pesquisa contínua.

Por se tratar da abordagem da Supercondutividade, um fenômeno físico que não consta no currículo do Ensino Médio, é importante que o professor se atualize quanto ao conteúdo, sendo capaz de proporcionar uma boa orientação, sem tirar a autonomia dos alunos nas atividades propostas.

Portanto, para se obter sucesso no desenvolvimento da proposta, o professor precisa se preparar e acreditar em um processo de ensino-aprendizagem diferenciado, que proporcione uma nova visão para o ensino de Física, na qual conteúdos da Física Contemporânea podem ser trabalhados, sem estarem carregados de ferramentas matemáticas (inadequadas para o Ensino Médio).

## REFERÊNCIAS

ALCÁCER, L. **Física do estado Sólido**. 2013. Disponível em: [http://www.lx.it.pt/~alcacer/Fisica-EstadoSolido\\_v4.pdf](http://www.lx.it.pt/~alcacer/Fisica-EstadoSolido_v4.pdf). Acesso em: 11 abr. 2016.

BRANÍCIO, P. S. Introdução à supercondutividade, suas aplicações e a mini – revolução provocada pela redescoberta do  $MgB_2$ : uma abordagem didática. **Rev. Bras. Ensino Fís.** vol.23 no. 4, São Paulo, Dez. 2001.

CLARIM, R. de V. **Teoria de Landau-Ginzburg para o estado supercondutor nemático**. 2012. 85 f. Dissertação (Mestrado em Física). Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

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

GRUPO DE REELABORAÇÃO DO ENSINO DE FÍSICA (GREF). **Física 3: eletromagnetismo**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo. 1993.

MAYO, J. L. **Supercondutividade: O limiar de uma nova tecnologia**. São Paulo: McGraw-Hill, 1989.

MORA, N. D. **Materiais Elétricos**. Apostila. Universidade Estadual do Estado do Paraná, Centro de Engenharias e Exatas. Foz do Iguaçu. 2010. Disponível em: <http://www.foz.unioeste.br/~lamat/downmateriais/materiaiscap1.pdf>. Acesso em: 11 abri. 2016.

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**. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2005.

PEREIRA, S. H.; FÉLIX, M. G. 100 anos de supercondutividade e a teoria de Ginzburg-Landau. **Revista Brasileira do Ensino de Física**, v. 35, n. 1, 1313. 2013.

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

ROCHA, M. F. G. **Estudo sobre supercondutividade e suas aplicações**. 2010. 51 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Física). Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, Dourados, 2010.

SANTOS, C. A. **O novo astro da supercondutividade**. 2010. Disponível em: <<http://cienciahoje.uol.com.br/colunas/do-laboratorio-para-a-fabrica/o-novo-astro-da-supercondutividade>>. Acesso em: 28 ago. 2008.



STUDART, N. Prêmio Nobel de Física em 2003: Supercondutividade e Superfluidez – Manifestações de Efeitos Quânticos na Escala Macroscópica. **A Física na Escola**, v. 4, n. 2, novembro, 2003.

TAVARES, P. M. M. B. **Filmes finos supercondutores do sistema Bi-Sr-Ca-Cu-O obtidos por deposição química de vapores organometálicos assistida por aerossol**. 267 f. Tese (Doutorado em Química). Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro (UTAD). Portugal. 2000.

VAZ, O. H. de L. **Levitação magnética: uma aplicação no transporte**. 2009. 28 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Física). Universidade Católica de Brasília, Brasília, 2009.

## APÊNDICE A - Questionário de Identificação e de verificação de conhecimentos sobre a temática Supercondutividade

### Dados de Identificação

1. Nome: \_\_\_\_\_

2. Sexo:

( ) Masculino

( ) Feminino

### Informações gerais

3. Idade: \_\_\_\_\_

4. Quanto tempo (por dia) você disponibiliza para estudar?

( ) 0h

( ) 1h

( ) 2h

( ) 3h

( ) 4h ou mais

5. Qual(is) tipo(s) de aula(s) lhe agrada?

( ) Expositiva

( ) Com uso de dinâmicas

( ) Com exercícios

( ) Apresentação de trabalho

( ) Debates

Outra. Qual? \_\_\_\_\_

6. Você tem afinidade com a disciplina de Física?

( ) Não tenho

( ) Sou indiferente

( ) Tenho, mas pouca

( ) Sim, tenho afinidade

7. Você tem curiosidade por assuntos relacionados à tecnologia e seus avanços?

( ) Não tenho

( ) Tenho, mas pouca

( ) Sim, tenho curiosidade

**Conhecimentos da Temática**

8. Explique o que você entende por Corrente elétrica.

---

---

9. Explique o que você entende por resistência e resistividade elétrica.

---

---

10. Você sabe o que são condutores elétricos? Se sim, cite exemplos.

( ) Sim

( ) Não

( ) Não lembro

---

11. Explique o que você sabe sobre Campo Magnético.

---

---

---

12. Você já ouviu falar em Supercondutividade? Se sim, especifique.

( ) Sim

( ) Não

---

13. Você gostaria de estudar a temática Supercondutividade? Se sim, justifique o porquê.

( ) Sim

( ) Não

( ) Sou indiferente

---

## APÊNDICE B - Atividade escrita sobre Supercondutividade

Prezado Aluno, solicito a sua contribuição para a realização desta atividade. Esta atividade tem o objetivo de averiguar o seu aprendizado da temática Supercondutividade. Por favor, procure ser objetivo e claro em suas respostas.

Nome: \_\_\_\_\_ Turma: \_\_\_\_\_ Data: \_\_\_\_\_

1. O que é corrente elétrica?

---

---

---

---

2. Explique o que a resistividade elétrica representa e por que ela varia a cada material.

---

---

---

---

3. O que seria um condutor perfeito? Ele realmente existe?

---

---

---

---

4. Cite possíveis defeitos na estrutura cristalina de um condutor.

---

---

---

---

5. A supercondutividade foi descoberta pelo físico holandês, Heike Kamerlingh Onnes, em 1911, quando pesquisava sobre os efeitos nas propriedades dos metais expostos a temperaturas extremamente frias. Em que consiste o fenômeno da supercondutividade?

---

---

---

---

6. Sabendo que a resistividade está relacionada com a temperatura do condutor, explique em que consiste a temperatura crítica.

---



---

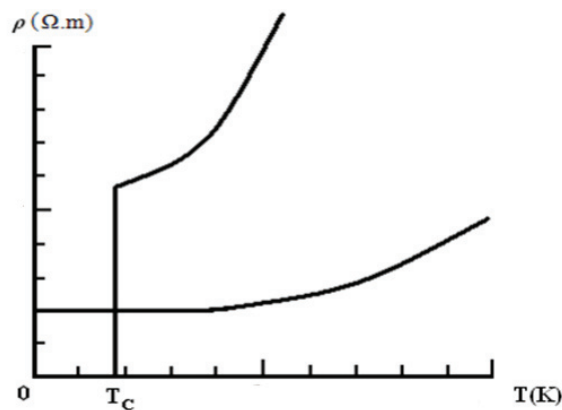


---



---

7. Explique o que representa o gráfico abaixo indicando as a indicação de cada curva como condutor ou supercondutor.




---



---



---

8. O que seria o diamagnetismo perfeito?

---



---



---

9. Várias são as aplicações dos materiais supercondutores. Entre elas está o Trem Maglev utilizando o fenômeno da levitação magnética. Como você explica esse fenômeno?

---



---



---



---

## APÊNDICE C – Textos sobre os conceitos de corrente elétrica e resistência elétrica

### **Corrente elétrica**

“Em um fio metálico desconectado de uma fonte de energia elétrica, os elétrons livres movem-se desordenadamente no interior da rede cristalina. Tal movimento não constitui a corrente elétrica. Ao ser submetido o fio a uma diferença de potencial elétrico, surge uma força de origem elétrica que atua sobre cada um dos elétrons livres, dando origem a um movimento ordenado com uma direção preferencial. Este movimento ordenado de cargas constitui a chamada corrente elétrica (ou corrente de transporte)”. (OSTERMANN, 1998, p.272).

### **Resistividade elétrica**

“O movimento dos elétrons livres (a corrente elétrica) sofre oposição devido à presença de impurezas ou imperfeições na rede cristalina e as vibrações térmicas que deslocam os íons de suas posições de equilíbrio. Estes dois efeitos que destroem a perfeita periodicidade da rede cristalina causam espalhamento dos elétrons de condução (livres) em outras direções diferentes daquela da corrente elétrica. Esta oposição à corrente elétrica é conhecida como resistividade elétrica.” (OSTERMANN, 1998, p.272-273).

### **Referência:**

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.

### **Corrente elétrica**

A corrente elétrica é o fluxo ordenado de partículas portadoras de carga elétrica, ou também, é o deslocamento de cargas dentro de um condutor, quando existe uma diferença de potencial elétrico entre as extremidades. O sentido real da corrente elétrica é o sentido do movimento de deriva das cargas elétricas livres (portadores). Esse movimento se dá no sentido contrário ao campo elétrico se os portadores forem negativos, caso dos condutores metálicos e no mesmo sentido do campo se os portadores forem positivos. Os bons condutores são aqueles que possuem muitos elétrons livres.

### **Resistividade elétrica**

A resistividade é um parâmetro relacionado com as propriedades atômicas do material, ou seja, a resistividade é um parâmetro que depende da qualidade do material, especialmente a sua pureza e estrutura cristalina.

### **Referência:**

Prof. Cláudio Graça. Aula 5.1 - Corrente Elétrica (Eletrodinâmica): Física Geral e Experimental III. Universidade de Santa Maria.

Disponível: [http://coral.ufsm.br/cograca/graca5\\_1.pdf](http://coral.ufsm.br/cograca/graca5_1.pdf). Acesso em: 02 out. 2015.

### III. Notas de aula

#### **Corrente elétrica**

Corrente elétrica é o movimento ordenado de cargas elétricas pelo condutor, ou seja, é o movimento dos elétrons livres através do condutor quando conectado a uma bateria (gerador) quando conecta-se um fio condutor a uma bateria (gerador) - indo do polo de menor potencial (-) para o de maior potencial (+).

#### **Resistividade elétrica**

A resistividade elétrica é uma propriedade que define o quanto um material opõe-se à passagem de corrente elétrica, de forma que: quanto maior for a resistividade elétrica de um material, mais difícil será a passagem da corrente elétrica, e quanto menor a resistividade, mais ele permitirá a passagem da corrente elétrica.

#### **Referência:**

Disponível em: <<http://www.brasilecola.com/fisica/corrente-eletrica.htm>> Acesso em: 02 out. 2015.

#### **Corrente elétrica**

Partículas carregadas eletricamente, como os elétrons, sofrem ação de forças elétricas quando submetidas a campos elétricos. Nos circuitos elétricos, a pilha, a bateria ou o gerador possuem dupla função. Além de fornecerem energia, submetem o circuito a uma diferença de potencial (tensão elétrica) e, conseqüentemente, a um campo elétrico que atua sobre os elétrons livres impondo-lhes uma força elétrica, que faz com que o movimento dessas partículas carregadas deixe de ser aleatório e passe a ser orientado. A esse movimento orientado de cargas elétricas dá-se o nome de corrente elétrica.

#### **Resistividade elétrica**

A corrente elétrica que se estabelece ao longo da rede cristalina do condutor depende das propriedades elétricas do material. Materiais com maior quantidade de elétrons livres como os metais (condutores) oferecem as melhores condições para a ocorrência de correntes elétricas. Além disso, o estado de maior ou menor vibração dos átomos da rede, associado à temperatura em que o material se encontra, pode dificultar (mais ou menos) a passagem dos elétrons. Assim, a deficiência de elétrons livres e/ou as temperaturas elevadas são fatores determinantes para o aumento da resistência à passagem da corrente elétrica, efeito denominado resistência elétrica (R). O parâmetro físico que traduz essa relação entre a resistência elétrica, e a natureza do material e sua temperatura, chama-se resistividade elétrica ( $\rho$ ) e influencia diretamente no valor da resistência elétrica.

#### **Referência:**

Aprendendo sobre as correntes elétricas – Rede CEJA.

Exibido em: [cejarj.cecierj.edu.br/pdf\\_mod3/CN/Unid02\\_Mod03\\_Fis.pdf](http://cejarj.cecierj.edu.br/pdf_mod3/CN/Unid02_Mod03_Fis.pdf). Acesso em: 02 out. 2015.

## APÊNDICE D - Passos para a elaboração dos esquemas sobre o comportamento do campo magnético em um condutor perfeito e em um supercondutor

**Esses passos foram elaborados com base em Ostermann (1998).**

### **1 Passos para elaboração de um esquema para o condutor perfeito:**

- (a) Um condutor perfeito encontra-se à temperatura ambiente em campo nulo.
- (b) Resfria-se o condutor até que ele atinja uma resistividade desprezível.
- (c) A seguir, a uma baixa temperatura (na qual a resistividade é desprezível), aplica-se um campo magnético.
- (d) Finalmente, o campo é retirado.

Vê-se que, ao final do processo, o material não fica magnetizado. Para compensar a nova variação de fluxo, desaparecem as correntes de blindagem e  $B$  é, então, nulo.

Considerando, agora, uma outra sequência de eventos para um condutor perfeito.

- (e) Um campo magnético é aplicado à amostra enquanto ela está à temperatura ambiente. A maioria dos metais (exceto ferromagnéticos, ferro, cobalto e níquel) tem seu valor de densidade de fluxo interno praticamente igual ao do campo aplicado.
- (f) A amostra é agora resfriada a uma baixa temperatura na qual sua resistividade elétrica vai a zero. Este desaparecimento da resistividade não tem efeito sobre a magnetização e, portanto, a distribuição de fluxo permanece inalterada.
- (g) Reduz-se, então, o campo magnético a zero. Conforme a Lei de Faraday-Lenz, correntes persistentes são induzidas na amostra, de forma a manter o fluxo no seu interior, resultando em uma magnetização permanente do material.

### **2 Passos para elaboração de um esquema para um supercondutor.**

- (a) Um condutor perfeito encontra-se à temperatura ambiente em campo nulo.
- (b) Resfria-se o condutor até que ele atinja uma resistividade desprezível.
- (c) A seguir, a uma baixa temperatura (na qual a resistividade é desprezível), aplica-se um campo magnético.
- (d) Finalmente, o campo é retirado.



Vê-se que, ao final do processo, o material não fica magnetizado. Para compensar a nova variação de fluxo, desaparecem as correntes de blindagem e  $E$ ; é, então, nulo.

Considerando, agora, uma outra sequência de eventos para o supercondutor.

- (e) Um campo magnético é aplicado à amostra enquanto ela está à temperatura ambiente. A maioria dos metais (exceto ferromagnéticos, ferro, cobalto e níquel) tem seu valor de densidade de fluxo interno praticamente igual ao do campo aplicado.
- (f) A amostra é agora resfriada a uma baixa temperatura na qual sua resistividade elétrica vai a zero. Neste caso, o fluxo total dentro das amostras cancelava-se, isto é, elas espontaneamente transformavam-se em diamagnetos perfeitos.
- (g) Os supercondutores têm uma propriedade adicional em relação aos condutores perfeitos: além de possuírem resistividade nula, os materiais supercondutores expulsam as linhas de fluxo do seu interior.

## APÊNDICE E - Questionário Final

Prezado Aluno, este questionário final tem como objetivo a verificação de seu aprendizado referente à temática Supercondutividade.

Nome: \_\_\_\_\_ Turma: \_\_\_\_\_ Data: \_\_\_\_\_

1. Comente o que você aprendeu sobre o fenômeno da Supercondutividade.

---

---

---

---

---

2. A Supercondutividade é um conteúdo da Física Contemporânea que ainda se encontra em um momento de descobertas. Você acha que seria interessante a inserção da Supercondutividade no currículo de Física do Ensino Médio? Apresente sua justificativa.

---

---

---

---

---

3. Quais aplicações do fenômeno da Supercondutividade você consegue reconhecer e verificar suas características? Explique.

---

---

---

---

---

4. Você acha que, em algum momento da apresentação e/ou pesquisa da temática Supercondutividade, poderia ser mais aprofundado ou esclarecido? Apresente esse(s) momento(s).

---

---

---

---

---

5. A teoria BCS foi desenvolvida em 1957 por Bardeen, Cooper e Schrieffer. Ela serviu como base da teoria microscópica da supercondutividade. Comente o que você aprendeu sobre esta teoria.

---

---

---

---

---

## 6) A supercondutividade:

- a) foi descoberta pelo físico holandês, Heike Kamerlingh Onnes, em 1911, depois de se dedicar durante anos a essa pesquisa.
- b) foi descoberta pelo físico holandês, Heike Kamerlingh Onnes, em 1911, durante uma pesquisa sobre os efeitos nas propriedades elétricas dos metais expostos a temperaturas extremamente frias.
- c) foi descoberta pelo físico alemão Walther Meissner, em 1933, depois de se dedicar durante anos a essa pesquisa.
- d) foi descoberta pelo físico alemão Walther Meissner, em 1933, durante uma pesquisa sobre os efeitos nas propriedades elétricas dos metais expostos a temperaturas extremamente frias.
- e) foi descoberta pelo físico alemão Walther Meissner, em 1933, e chamada primeiro de efeito Meissner.

## 7) A resistividade elétrica consiste em:

- a) uma concordância à corrente elétrica devido à presença de uma rede cristalina perfeita.
- b) uma concordância à corrente elétrica devido à presença de impurezas ou imperfeições na rede cristalina e a vibrações térmicas que deslocam os íons de suas posições de equilíbrio.
- c) uma oposição à corrente elétrica devido à presença de impurezas ou imperfeições na rede cristalina e a vibrações térmicas que deslocam os íons de suas posições de equilíbrio.
- d) uma oposição à corrente elétrica devido à presença uma rede cristalina perfeita.
- e) uma oposição à corrente elétrica devido à permanência dos íons em suas posições de equilíbrio.

## 8) Em todos os sólidos cristalinos existe uma quase perfeita ordem dos átomos, portanto essa ordem pode ser quebrada por uma série de defeitos e imperfeições aonde as características da forma cristalina, uma vez modificada podem contribuir negativamente ou positivamente para o material. Sendo assim, defeitos pontuais são:

- a) discrepâncias nos arranjos atômicos de uma estrutura cristalina, como os defeitos por lacuna, os de átomos intersticiais e os substitucionais.
- b) discrepâncias nos arranjos atômicos de uma estrutura cristalina, tendo como principal defeito o da rede cristalina não ser composta por átomos.
- c) discrepâncias nas temperaturas dos arranjos atômicos de uma estrutura cristalina, como um alto aquecimento ou alto resfriamento em pontos diferentes da rede.
- d) concordância nos arranjos atômicos de uma estrutura cristalina.
- e) concordância em todos os átomos que compõem a estrutura cristalina e em seus possíveis movimentos.

## 9) As principais características da passagem de um material para o seu estado supercondutor são:

- a) a resistividade nula adquirida ao atingir a temperatura crítica e a apresentação de dois campos magnéticos críticos, formando o estado misto entre eles.

- b) o efeito Meissner, onde os supercondutores repelem o campo magnético do seu interior e a levitação magnética realizada pelo material supercondutor.
- c) a apresentação de dois campos magnéticos críticos, formando o estado misto entre eles e a levitação magnética realizada pelo material supercondutor.
- d) a apresentação de dois campos magnéticos críticos, formando o estado misto entre eles e a levitação magnética realizada pelo material supercondutor.
- e) a resistividade nula adquirida ao atingir a temperatura crítica e o efeito Meissner, onde os supercondutores repelem o campo magnético do seu interior.

**10) De acordo com as características dos tipos de supercondutores, marque a alternativa correta:**

I – Supercondutores do tipo I apresentam temperaturas críticas extremamente baixas, enquanto Supercondutores do tipo II apresentam temperaturas críticas mais elevadas.

II – Supercondutores do tipo I apresentam baixo valor do campo magnético crítico, enquanto Supercondutores do tipo II apresentam dois valores de campo crítico.

III – Tanto Supercondutores do tipo I quanto Supercondutores do tipo II permitem a penetração de parte do campo magnético.

- a) Somente a I é verdadeira
- b) Somente a II é verdadeira
- c) As alternativas I e II são verdadeiras
- d) As alternativas I e III são verdadeiras
- e) As alternativas I, II e III são verdadeiras



## APÊNDICE G – Questionário de Auto Avaliação

Prezado Aluno, este é um questionário de auto avaliação que tem como objetivo a tomada de consciência de seu próprio desenvolvimento durante as aulas sobre a temática Supercondutividade, responsabilidade pelo seu desempenho e melhoria da autoestima.

Nome: \_\_\_\_\_ Turma: \_\_\_\_\_ Data: \_\_\_\_\_.

VALORES/ ATITUDES/ CAPACIDADE	RARAMENTE	ÀS VEZES	QUASE SEMPRE	SEMPRE
1. Fui pontual				
2. Fui assíduo				
3. Estive atento e concentrado durante as aulas				
4. Fiz as atividades de casa				
5. Fui organizado, faço registro dos assuntos que considero relevantes para a minha aprendizagem				
6. Respeitei compromissos assumidos e cumpri prazos				
7. Demonstrei interesse pelos assuntos tratados				
8. Colaborei, positivamente, no trabalho da turma e do grupo				
9. Dei a minha opinião e respeitei a dos outros				
10. Fui capaz de contextualizar o conteúdo visto em diferentes situações				
11. Participei corretamente, nas atividades desenvolvidas				
12. Participei nas aulas de forma adequada				
13. Tomei iniciativa de apresentar novas ideias/ propostas				
14. Aceitei críticas ao meu trabalho e comportamento				
15. Respeitei meus colegas e minha professora				
16. Adquiri conhecimentos				
17. Fui capaz de aplicar esses conhecimentos nas atividades e avaliações				
18. Fui capaz de relacionar o tema do trabalho com assuntos vistos na disciplina				
19. Escrevo com clareza e coesão sobre a temática abordada				
20. Utilizei materiais suplementares				
21. Demonstrei iniciativa para a resolução dos problemas apresentados				

Acho que o meu desempenho durante o trabalho pode ser traduzido pelo seguinte conceito:

\_\_\_\_\_

Gostaria ainda de dizer que:

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_





**INSTITUTO FEDERAL**  
Amazonas  
Campus Manaus Centro



**UFAM**



SOCIEDADE BRASILEIRA DE FÍSICA