

LEVITAÇÃO MAGNÉTICA: A SUPERCONDUTIVIDADE EM UM EXPERIMENTO DEMOSTRATIVO PARA O ENSINO MÉDIO

MARCELO AUGUSTO PEREIRA DOS SANTOS¹; RENNAN PEREIRA DE SOUZA²; FÁBIO TEIXEIRA DIAS³; VALDEMAR DAS NEVES VIEIRA⁴

¹*Universidade Federal de Pelotas – augustomarcelo061@gmail.com*

²*Universidade Federal de Pelotas – ren_nanps@hotmail.com*

³*Universidade Federal de Pelotas – diasft@gmail.com*

⁴*Universidade Federal de Pelotas – vdnvieira@gmail.com*

1. INTRODUÇÃO

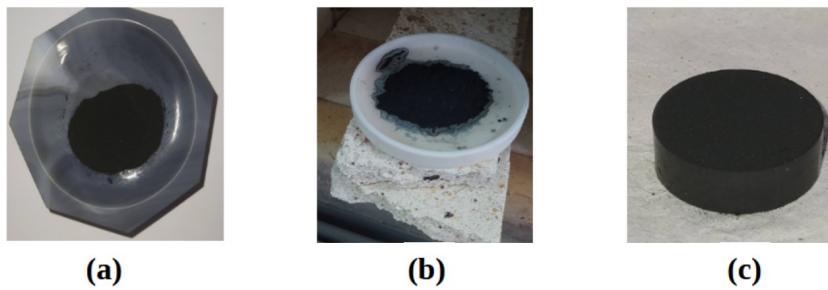
A supercondutividade, foi descoberta em 1911, e segue despertando grande interesse pelas perceptivas de sua utilização em aplicações tecnológicas Rocha (2004). Esse fenômeno ocorre em materiais que, ao serem resfriados abaixo de uma temperatura crítica (T_c), perdem completamente a resistência elétrica, permitindo a condução de corrente sem perdas de energia Branício (2001). Quando resfriado em $T < T_c$ e submetido a um campo magnético externo (\vec{B}_e), inferior ao campo crítico interior (\vec{B}_{c1}) o supercondutor estará na fase Meissner, onde o campo magnético no interior do material é nulo ($\vec{B}_i=0$) Ostermann (1998). Se (\vec{B}_e) for aplicado quando $T > T_c$, ele será completamente expulso do interior do supercondutor na fase Meissner. No entanto, se \vec{B}_e for aplicado quando $T < T_c$, supercorrentes (\vec{J}_s) serão induzidas na superfície do supercondutor, blindando o interior contra a penetração do \vec{B}_e . O fato de $\vec{B}_i=0$ na fase Meissner dá origem ao efeito de levitação magnética (LM), amplamente explorado em tecnologias como os trens de levitação Pastori (2010). Motivado por esse fenômeno, decidimos preparar um “kit” de LM utilizando uma amostra supercondutora e um ímã, com o objetivo de demonstrar e caracterizar experimentalmente esse efeito, proveniente da supercondutividade, para alunos do ensino médio de escolas públicas. A construção do “kit” de LM parte da preparação de uma amostra policristalina do supercondutor $YBa_2Cu_3O_7$ ($T_c=93\text{ K}$) Souza (2024), a qual foi preparada no Laboratório de Materiais Supercondutores (LMS) da UFPel utilizando a técnica de reação em estado sólido West (2022). A amostra sintetizada tornou-se supercondutora com o uso nitrogênio do líquido ($T_{liq} \approx 77,5\text{ K}$) levitando magneticamente um ímã permanente de neodímio ($\vec{B} < \vec{B}_{c1}$).

2. METODOLOGIA

O processo de síntese da amostra de $YBa_2Cu_3O_7$ e a demonstração da LM envolveram a execução de duas etapas principais. A primeira etapa envolveu a preparação da amostra por reação em estado sólido, técnica comum na síntese de materiais cerâmicos e supercondutores pela sua simplicidade e eficácia. A segunda etapa concentrou-se na elaboração e montagem de um arranjo experimental de demonstração prática, voltado para observação e caracterização do fenômeno de LM. A amostra foi preparada com o emprego do reagente Y-123 fabricado pela Diopma+Barcelona na estequiometria $YBa_2Cu_3O_7$ seguindo as etapas descritas a seguir:

1. **Pesagem e maceração:** Inicialmente, foi medida uma quantidade de 5 gramas de reagente, utilizando uma balança digital de alta precisão. Com o auxílio de um almofariz de ágata, o reagente foi então macerado até adquirir consistência homogênea, como mostra a figura 1 (a).
2. **Pré-sinterização e maceração:** O reagente macerado foi colocado no interior de um forno do tipo mufla e foi pré-sinterizado a 900°C e mantido nessa temperatura por 12 horas. Após o reagente foi resfriado à temperatura ambiente, retirada do forno, figura 1 (b) e em seguida submetido a nova maceração.
3. **Prensagem e sinterização:** O reagente pré-sinterizado foi prensado na forma de uma pastilha, veja a figura 1 (c), a partir do uso de um pastilhador e uma prensa hidráulica que forneceu pressão de 5 toneladas. A amostra então foi submetida a um processo de sinterização final a 950°C por 12 horas, sendo rapidamente resfriada a 750°C onde a partir daí foi resfriada por um período de 12 horas até 500°C para proporcionar a efetivação da transição estrutural supercondutora para logo após em 24 horas ser resfriada a temperatura ambiente, nessa última etapa ocorre a obtenção de $T_c \approx 93\text{ K}$ para esse material supercondutor Rocha (2004).

Figura 1: Fases do processo de sintetização da amostra supercondutora.



Fonte: o autor (2024).

O “kit” experimental elaborado e empregado na reprodução do LM é constituído pelos materiais listados na tabela 1.

Tabela 1: Materiais empregados no experimento de LM.

MATERIAL
Amostra supercondutora de $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ (a)
Ímã permanente (B)
Reservatório térmico (c)
Suporte para colocação da amostra – pedestal (d)
Pinça de material não magnético
Nitrogênio líquido N_2 (e)
Garrafa térmica de aço inox – reservatório de N_2

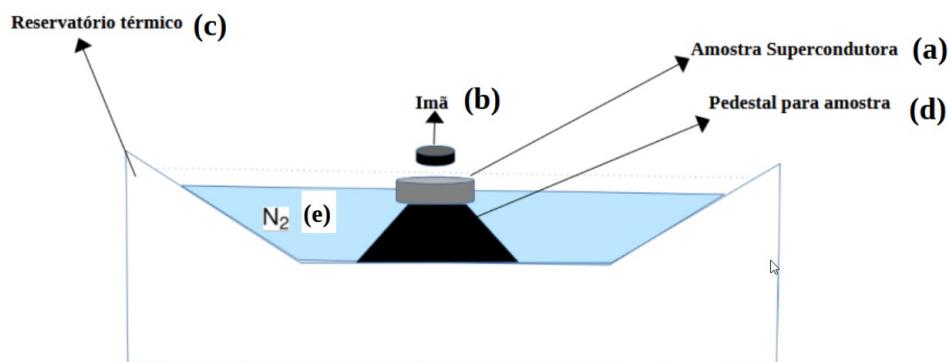
Fonte: o autor (2024).

Visando a proteção da superfície da amostra, essa foi embalada com papel-alumínio antes de ser colocada em contato com o N_2 líquido. O ímã empregado como fonte de \vec{B}_e apresenta dimensões inferiores a área superficial da amostra, o que facilitou a sua levitação e permanência sobre a superfície da amostra. O reservatório térmico, feito de isopor, foi confeccionado de maneira a acomodar o N_2 e o pedestal no seu interior. O pedestal é constituído de material resistente a deformações quando submetido a temperaturas inferiores a -190°C .

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A execução do experimento de LM a partir de um supercondutor foi realizado no LMS da UFPel, considerando a disposição da maioria dos materiais listados na tabela 1 na representação descrita pela figura 2.

Figura 2: Representação esquemática da disposição do arranjo experimental do LM.

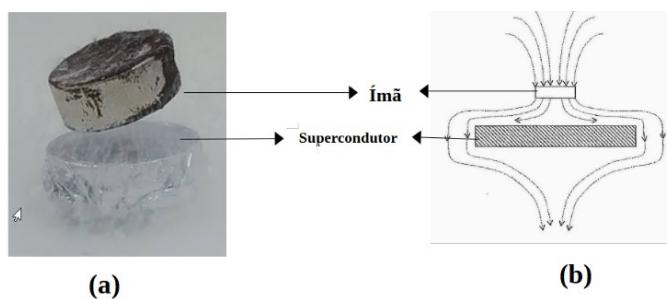


Fonte: o autor (2024).

A sequência dos procedimentos experimentais adotados para a execução do experimento de LM foram os seguintes:

- Posicionamento do Pedestal e Amostra:** O pedestal e a amostra foram colocados com cuidado no reservatório. O nitrogênio líquido foi adicionado gradualmente, até que a amostra ficou completamente submersa. Obs: Utilize luvas e óculos de proteção ao manusear N_2 .
- Posicionamento do Ímã:** Após transcorrida a evaporação de N_2 , o ímã com auxílio de uma pinça foi posicionado cuidadosamente sobre a superfície da amostra de $YBa_2Cu_3O_7$, já no estado supercondutor aguardando alguns instantes até que o ímã também seja resfriado pelo N_2 .
- Fenômeno de Levitação:** Após colocar o ímã sobre a amostra supercondutora, observa-se sua levitação (figura 3a). Para comprovar o fenômeno, utilizou-se um fio de cobre que passava livremente entre a amostra e o ímã levitando.
- Explicação do experimento:** Ao aproximar o ímã da amostra supercondutora, a fase Meissner gera uma repulsão entre os campos magnéticos do ímã e do supercondutor, semelhante à interação entre polos iguais de ímãs. A levitação magnética ocorre quando a força magnética supera a gravitacional, fazendo o ímã levitar até alcançar uma distância de equilíbrio, como ilustrado na figura 3(b).

Figura 3: (a) Registro do fenômeno de LM do experimento proposto. (b) configuração resultante das linhas de campo ao aproximar um ímã do supercondutor.



Fonte: (a) o autor (2024). (b) Ostermann (1998).

4. CONCLUSÕES

O experimento de levitação magnética com supercondutores oferece uma forma prática e envolvente de demonstrar a supercondutividade e o efeito Meissner. Sua montagem simples e adaptável permite a exploração de diferentes aspectos do fenômeno, facilitando uma compreensão mais clara das propriedades dos supercondutores. Ao ser apresentado no ensino médio, proporciona aos alunos uma experiência interativa que desperta o interesse pela Física e pelas suas aplicações tecnológicas. Além de ilustrar o fenômeno, o experimento estimula a criatividade e a reflexão crítica, promovendo debates sobre as aplicações e desafios dos materiais supercondutores, tornando-se uma valiosa ferramenta pedagógica.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BRANÍCIO, Paulo 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, p. 381-390, 2001.
- CAVALCANTI, C.J.H.; FERREIRA, L.M.; OSTERMANN, F. Textos de Apoio ao Professor de Física n. 8, editado pelo Instituto de Física da UFRGS, **Supercondutividade: Uma Proposta de Inserção no Ensino Médio.** UFRGS, Instituto de Física, Porto Alegre, 1998.
- PASTORI, Antonio. **A inovação tecnológica “verde” e seus possíveis efeitos na matriz de transportes do Brasil – considerações sobre o veículo de levitação magnética supercondutora (Maglev-Cobra).** BNDES Setorial, n. 31, p. 321-352, 2010.
- ROCHA, Fábio Saraiva et al. **Roteiro para a experiência de levitação de um ímã repelido por um supercondutor no Ensino de Física.** Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 26, n. 11-18, 2004.
- SOUZA, Rennan Perreira. **O efeito da substituição parcial do Y por Pr na densidade de energia cinética de condensação das superpartículas do supercondutor Y_{0.95}Pr_{0.05}Ba₂Cu₃O_{7-δ}.** Trabalho de conclusão de curso. UFPel, 2024.
- WEST, Anthony R. **Solid State Chemistry and Its Applications.** John Wiley & Sons, 2022.