

# Levitação Magnética



Humberto de Andrade Carmona

Universidade Estadual do Ceará,  
Campus do Itaperi

Av. Paranjana, 1700 - Fortaleza, CE

e-mail: carmona@uece.br

É possível um ser vivo levitar? Ao cidadão comum, a resposta a essa pergunta está apenas nos livros de ficção científica. No entanto, a ciência e a tecnologia têm encontrado formas de fazer seres vivos levitarem.

Alguns dispositivos utilizando feixes de ar podem levar ao fenômeno. Por exemplo, um helicóptero, não que ele seja um ser vivo, mas pode conter um. Outros dispositivos utilizam campos magnéticos e materiais supercondutores. Já há algum tempo, cientistas pensam no uso do magnetismo para levantar veículos, seja utilizando ímãs permanentes ou supercondutores.

Um supercondutor resfriado com nitrogênio líquido, flutuando sobre um ímã é uma imagem um tanto comum para a comunidade científica hoje em dia, e não surpreenderia um físico. Supercondutores são materiais diamagnéticos perfeitos e a expulsão do campo magnético de seu interior causa sua levitação. Já um pequeno sapo, ou mesmo um morango, à temperatura ambiente, levitando no centro de um magneto, é uma imagem menos comum.

Apesar de menos comum e surpreendente, mostraremos neste artigo que é possível levantar um ser vivo. Cientistas, entre eles o autor deste artigo e o russo Andrei Geim, realizaram experimentos de levitação de vários materiais, no Laboratório de Altos Campos Magnéticos (HFML) da Universidade Católica de Nijmegen, Ho-

landa, em 1997<sup>1-3</sup>. Nestes experimentos levitou-se praticamente tudo que se tinha em mãos, de criaturas vivas como um sapo, gafanhoto, pequeno peixe, plantas até pequenos pedaços de pizza e água. Em 1991, Eric Beaugno e Robert Tournier, utilizando o mesmo processo, levitaram água e algumas substâncias orgânicas<sup>4</sup>. Chamaremos o processo de levitação utilizado nesses experimentos de *levitação magnética*.

A Figura 1 mostra uma seqüência fotográfica de um pequeno sapo levitando no centro de um solenóide.

Para obter *levitação magnética* é necessário um campo magnético com características especiais e com intensidade relativamente alta. O objeto, nesse caso o sapo, é colocado no centro de um magneto do tipo Bitter, com diâmetro interno de 32 mm, como mostra a Figura 2. Uma corrente elétrica de até 20 kA na bobina do magneto produz campos magnéticos de até 20 Tesla. O conjunto de bobinas do magneto é projetado de forma que o campo magnético seja máximo e homogêneo no centro da bobina interna (região indicada pela letra A na

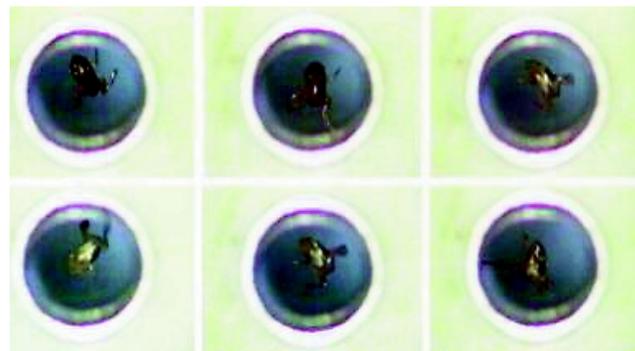


Figura 1. Seqüência fotográfica de um pequeno sapo levitando no centro de um magneto de 20 Tesla.

Neste trabalho descreve-se um experimento mostrando que um ser vivo pode levitar. Longe de precisar de 'poderes extra-sensoriais', a levitação pode ser alcançada por meio de campos eletromagnéticos. Vejamos como conseguir uma *levitação magnética*.

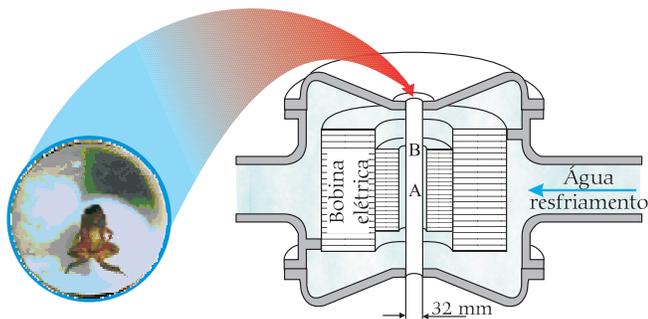


Figura 2. Diagrama esquemático de um magneto Bitter. Uma corrente elétrica de até 20 kA atravessa uma bobina elétrica de cobre, produzindo campos magnéticos de até 20 T. Um sistema de resfriamento com água em alta pressão é usado para que o cobre não se aqueça até a fusão.

Figura 2). Nas proximidades do topo da bobina interna (região indicada pela letra B na Figura 2), o campo magnético apresenta gradientes nas direções axial e radial. Veremos mais tarde que esses gradientes são importantes para a observação do fenômeno de levitação.

Apesar de surpreendente, mesmo para alguns físicos, a levitação estável de materiais comuns em nosso dia-a-dia possui uma explicação simples e se baseia em uma propriedade intrínseca de muitos materiais chamada *diamagnetismo*, que se refere ao fato de que esses materiais têm a habilidade de expelir um campo magnético externo. O diamagnetismo pode ser entendido superficialmente da seguinte forma: como se sabe, toda matéria no universo consiste de átomos, e cada átomo possui elétrons em movimento em torno de seu núcleo. Ao colocar um átomo em um campo magnético, os elétrons em movimento em torno de seu núcleo alteram seus movimentos de forma a se oporem a essa influência externa, ou seja, esses elétrons criam seu próprio campo magnético de forma que cada átomo funciona

**Apesar de surpreendente, a levitação estável de materiais comuns possui uma explicação simples, e se baseia em uma propriedade intrínseca de muitos materiais chamada diamagnetismo**

como um pequeno ímã que aponta na direção contrária ao campo magnético aplicado. Nesta situação,

lem. No caso do sapo, o pólo positivo da campo externo também repele os pólos positivos de cada átomo magnetizado do nosso material, uma vez que os campos são contrários. Quando essa força de repulsão é maior que o peso do material, esse pode levitar.

Ora, se a explicação parece tão simples, por que surpreenderia muitos físicos? Acontece que o efeito do diamagnetismo dos materiais, ou seja, o tamanho do campo magnético induzido é, em geral, muito pequeno. O campo induzido em um material diamagnético, como um sapo, por exemplo, é cerca de um bilhão de vezes menor que o campo magnético de um ímã comum. Acredita-se, portanto, que seja preciso um campo magnético externo enorme para produzir um efeito como a levitação. William Thomson, o Lord Kelvin, se referindo à levitação de materiais diamagnéticos disse: “Será provavelmente impossível observar esse

fenômeno devido à impossibilidade de se obter um ímã suficientemente forte e uma substância diamagnética suficiente-mente leve, pois as forças (magnéticas) são excessivamente fracas”<sup>5</sup>.

Acontece que as forças magné-

ticas não são assim tão fracas. Foi possível observar a levitação de materiais diamagnéticos com campos magnéticos de cerca de 10 T, relativamente comuns em laboratórios hoje em dia, apesar de não existirem na época de Kelvin. Para mostrar que com esse valor de campo magnético é possível observar o fenômeno, precisamos de uma explicação um pouco mais elaborada do que a dada anteriormente.

A quantidade que mede o tamanho do campo magnético induzido em um material é a suscetibilidade magnética  $\chi$ , definida de forma que o campo magnético induzido  $\vec{m} = (\chi/\mu_0)V\vec{B}$ , onde  $\vec{B}$  é o campo magnético externo,  $V$  é o volume do material e  $\mu_0$  é a suscetibilidade magnética do vácuo. Para um material diamagnético, a suscetibilidade magnética é menor que zero ( $\chi < 0$ ), indicando um campo induzido com direção contrária ao campo externo, enquanto para outros tipos de materiais magnéticos, como ferromagnéticos e paramagnéticos, a suscetibilidade magnética é maior que zero ( $\chi > 0$ ). Tomando a direção do eixo  $z$  como o eixo do magneto, a energia potencial desse material será:

$$U = \rho Vgz - \frac{\vec{m} \cdot \vec{B}}{2} = \rho Vgz - \frac{\chi V}{2\mu_0} B^2 \quad (1)$$

onde  $g$  é a aceleração da gravidade,  $\rho$  é a densidade do material e  $z$  é a altura do corpo. Para que o material flutue de forma estável a uma altura  $z$  em alguma posição é necessário que  $U$  tenha um ponto de mínimo<sup>6</sup>. A condição de equilíbrio é que a força,

$$\vec{F} = -\vec{\nabla}U = -\rho Vg\hat{z} + \frac{\chi V}{2\mu_0} \vec{\nabla}B^2 \quad (2)$$

seja nula. Na direção  $z$ , para que a força gravitacional seja compensada pela magnética, a equação 2 conduz a

$$B \frac{\partial B}{\partial z} = \frac{\mu_0 \rho g}{\chi} \quad (3)$$

Vê-se, portanto, que para haver equilíbrio não basta um campo magnético com alta intensidade ( $\chi$  para a maioria dos materiais diamagnéticos

\*Em alguns materiais, como o ferro, os átomos já se comportam naturalmente como ímãs, sendo essa propriedade predominante. Esses materiais (chamados ferromagnéticos e paramagnéticos) ao invés de repelirem o campo externo, na verdade intensificam o mesmo, sendo, então, atraídos por um ímã.

é pequeno), mas é preciso que este seja também não homogêneo (para materiais diamagnéticos o campo deve diminuir de amplitude com a altura). A partir da equação 3 pode-se estimar o valor da amplitude do campo necessário para levantar um material. Para isso, tome-se como exemplo a água como material diamagnético: para a água<sup>7</sup>  $\chi = -8,8 \times 10^{-6}$ , e tomando  $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ , tem-se  $B\partial B/\partial z = -1400,9 \text{ T}^2 \text{ m}^{-1}$ . A Figura 3 mostra o perfil da magnitude do campo magnético com a altura  $z$  para o magneto esquematizado na Figura 1.

Da Figura 3 tem-se, na posição  $z = 78 \text{ mm}$  onde  $B = 0.63B_0$ , que a derivada do campo é  $\partial B/\partial z = -8,15B_0 \text{ m}^{-1}$ , do que é necessário um campo magnético central  $B_0 = 16,5 \text{ T}$  para observar levitação. Esse valor está de acordo com o valor necessário para levantar uma pequena quantidade de água mostrada na Figura 4.

Uma questão importante envolve a estabilidade do equilíbrio<sup>6</sup>. Para que o equilíbrio seja estável a força dada pela equação (2) deve ser uma força restauradora, o que pode ser expresso matematicamente por  $\vec{\nabla} \cdot \vec{F} < 0$ <sup>4</sup>. Da equação (2) segue que,

$$\frac{\chi V}{2\mu_0} = \nabla^2 B^2 < 0 \quad (4)$$

Mas como não existem monopolos magnéticos ( $\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$ ) e como não existem correntes na região do centro do magneto ( $\vec{\nabla} \times \vec{B} = 0$ ), pode-se mostrar<sup>6</sup> que  $\nabla^2 B^2 \geq 0$ . Portanto, a equação (4) implica que uma condição necessária para levitação estável é  $\chi$  ser menor que zero. Ou seja, levitação estável só pode ocorrer para materiais dia-

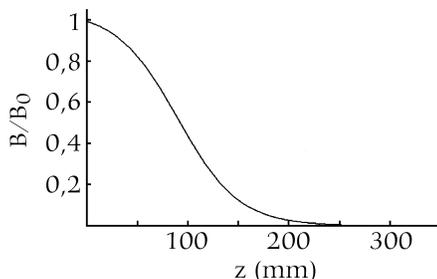


Figura 3. Amplitude do campo magnético no eixo do magneto esquematizado na Figura 1.  $B_0$  é o valor da amplitude do campo magnético no centro do magneto.

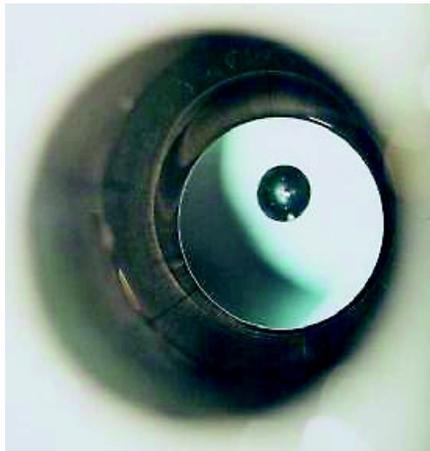


Figura 4. Levitação de uma porção de água pura. A forma arredondada da gota d'água é devido à ausência de uma força resultante.

magnéticos. Isso significa que se tentar levantar um pequeno pedaço de ferro usando ímãs, você poderá conseguir com que este seja repelido, mas não conseguirá fazê-lo flutuar estavelmente, *qualquer que seja o desenho ou configuração dos ímãs que utilizar*.

A levitação estável de materiais diamagnéticos pode parecer ainda mais surpreendente para os físicos, pois aparentemente viola a restrição imposta pelo teorema de Earnshaw<sup>8</sup> que diz "*não é possível atingir levitação estável de um objeto feito de cargas, magnetos e massas com uma configuração fixa, com uma combinação qualquer de forças magnetostáticas, eletrostáticas e gravitacional*". A prova desse teorema é dada pela própria equação (4), a energia potencial de uma amostra magnética ( $\chi > 0$ ), na presença de forças magnetostáticas, não pode apresentar um mínimo requerido para estabilidade.

Como vimos, apenas materiais diamagnéticos podem se livrar das imposições representadas no teorema de Earnshaw. A razão é que o diamagnetismo emerge do movimento dos elétrons em torno do núcleo e, portanto, o sistema não pode ser considerado como "*cargas, magnetos e massas com uma configuração fixa*".

Uma vez que se crie a condição adequada de campo magnético, com intensidade e geometria apropriadas, um ser vivo, portanto, *pode* levantar. Isso significa que *em princípio* mesmo um *ser humano* poderia ser suspenso no ar

utilizando essa técnica, o que não significa que *podemos* fazer tal experimento. O problema é conseguir um campo magnético alto, em um volume grande suficiente, para acomodar um ser humano. Além disso, o valor de campo externo para conseguir  $B\partial B/\partial z$  suficientemente grande para levantar um ser humano aumenta com o volume da região. De acordo com desenhistas de magnetos do National High Magnetic Field Laboratory<sup>3</sup> em Tallahassee, Flórida, com a tecnologia atual pode-se acomodar objetos de até 15 cm.

Apesar de não poder levantar magneticamente seres humanos, o fato de as forças magnética e gravitacional se cancelarem na escala atômica torna possível que experimentos que necessitam de condições de microgravidade (devemos manter em mente que, como os objetos são finitos e as condições de  $B$  e  $\partial B/\partial z$  variam espacialmente, em algumas partes dos objetos as forças magnética e gravitacional não se cancelam exatamente) possam ser realizados aqui mesmo na Terra, mesmo com organismos vivos complexos.

Quanto aos efeitos de altos campos magnéticos em seres vivos, se alguém lendo esse artigo ficou preocupado com efeitos adversos, sapos são provavelmente muito pequenos. Em aplicações médicas, como em ressonância magnética nuclear, experimentos com voluntários mostram que não há perigo na exposição a campos magnéticos de até 4 Tesla<sup>9</sup>.

## Referências Bibliográficas

1. Veja seção "Physics in Action" na *Physics World*, v. 10, n. 4, de abril de 1997, p. 28.
2. Veja seção "This Week" na *New Scientist* 154 (2077) de 12 abril de 1997, p. 13.
3. Geim, A.K. *Physics Today*, setembro (1998).
4. Beaugnon, E.; Tournier, R. *Nature* 349, 470 (1991).
5. Thomson, W. (Lord Kelvin), Reprints of Papers on Electrostatics and Magnetism, MacMillan London, (1872).
6. Berry, M.V.; Geim, A.K. *Eur. J. Phys.* 18, 307 (1997).
7. Kaye, W.G.; Laby, T.H. *Tables of Physical and Chemical Constants*, Longman, London, (1973).
8. Earnshaw, S. *Trans. Camb. Phil. Soc.* 7, 97 (1842); W. T. Sott, *Am. J. Phys.* 27, 418 (1959).
9. Schenck, J.F. *Annals NY Acad. Sci* 649, 285 (1992).