Fenômenos de Origem Eletromagnética

Por João Vitor Geiss

Nível do desafio: Médio

Introdução: Eletromagnetismo no dia a dia

Só de ouvir a palavra eletromagnetismo já pensamos em cargas, ímãs, circuitos e coisas do gênero, porém o que muitos esquecem é que boa parte dos fênomenos do dia a dia, que são estudados na mecânica, ótica, ondulatória e hidrodinâmica, são consequências de interações eletromagnéticas que acontecem das mais diversas formas na natureza. Nessa prova, estudaremos alguns desses fenômenos. O exemplo mais fundamental de interação eletromagnética estudado na física são as forças de atrito, que, embora descritas macroscopicamente como resistências ao movimento entre superfícies, devido às suas irregularidades, têm origem fundamental em interações eletromagnéticas. Quando dois corpos entram em contato, suas superfícies sofrem forças de repulsão/atração eletromagnética, devido aos átomos dos dois materiais que interagem entre si. Além disso, durante o deslizamento, essas interações continuam sendo constantemente formadas e dissipadas, liberando energia na forma de calor e vibrações. Assim, o atrito não é uma força fundamental independente, mas sim uma manifestação coletiva de inúmeras interações eletromagnéticas entre as superfícies em contato.

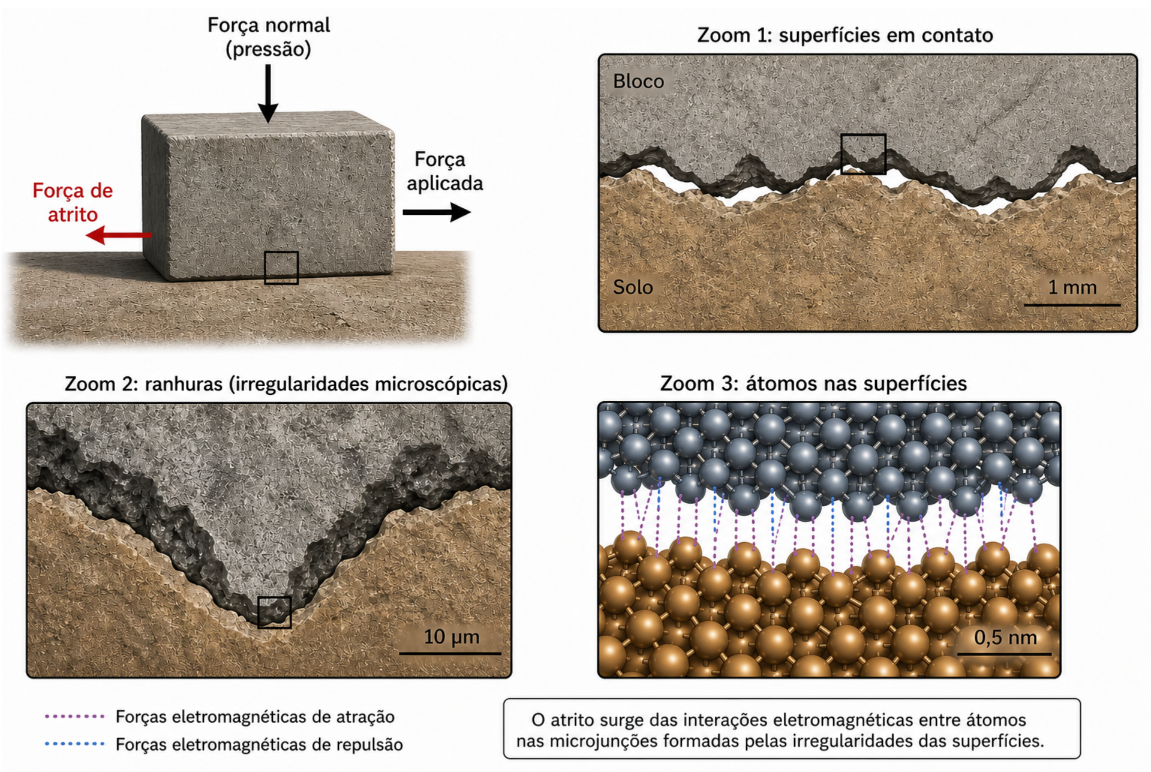

Figura 1: Representação em várias escalas das irregularidades nas superfícies dos materiais, nas quais surgem as forças de atrito

As forças elásticas também possuem origem fundamental no eletromagnetismo. Embora macroscopicamente sejam descritas pela Lei de Hooke como forças restauradoras proporcionais à deformação sofrida por um corpo elástico, sua origem microscópica está associada às interações entre átomos e moléculas do material. Quando um sólido é comprimido ou esticado, os átomos que o compõem são deslocados de suas posições de equilíbrio, alterando as distâncias entre elétrons e núcleos atômicos. Isso modifica as forças eletromagnéticas de atração e repulsão presentes nas ligações químicas do material. Dessa forma, a tendência do corpo retornar à sua configuração original pode ser entendida como uma manifestação macroscópica de interações eletromagnéticas quânticas entre partículas microscópicas.

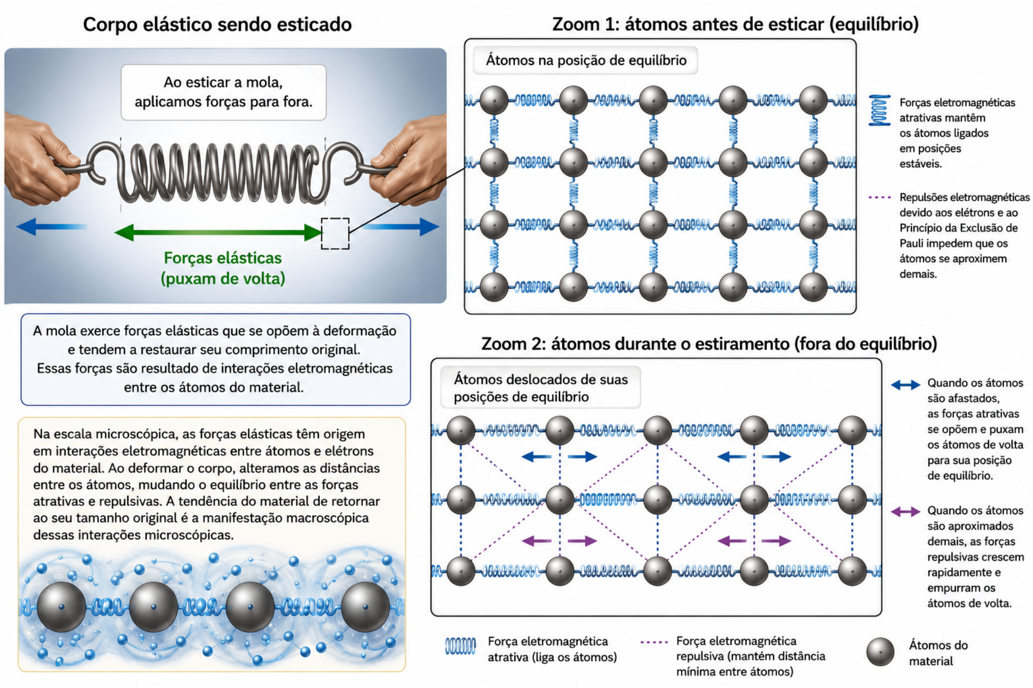

Figura 2: Representação em várias escalas das interações entre os átomos do material quando este é esticado

Agora, estudaremos essas duas forças de natureza eletromagnética, de modo a compreendermos melhor as propriedades dos materiais que estaremos trabalhando, em sequência, usando os dados coletados, iremos mais ao fundo no estudo do Magnetismo na Matéria.

Materiais necessários

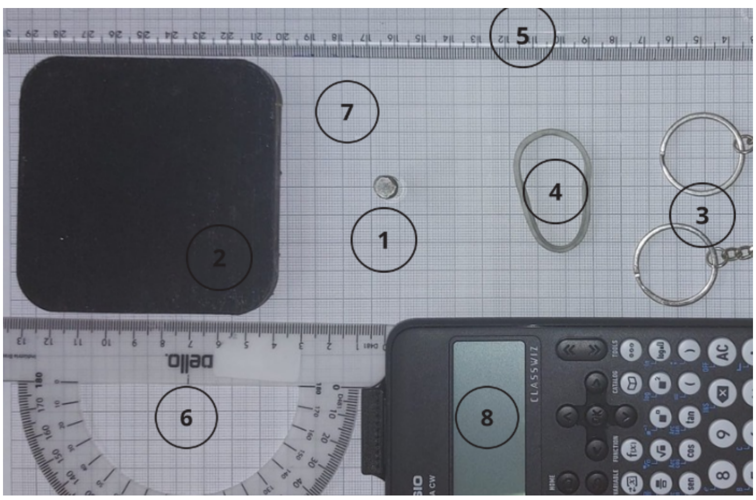

Figura 3: Exemplo de materiais

- 1. Dois ímãs pequenos (iguais) *Indica-se usar ímãs de formato cilindrico
- 2. Três superfícies diferentes, todas e retas, de tamanho considerável, que possam ser facilmente movidas e inclinadas *Indicam-se superfícies com rugosidades um tanto diferentes
- 3. Três objetos leves, de massa conhecida
- 4. Um elástico bastante flexível
- 5. Régua simples (precisão de $1mm$)
- 6. Transferidor transparente (precisão de $1°$)
- 7. Papel milimetrado.
- 8. Calculadora científica (ou qualquer outro meio de calcucar regressões) *NÃO use calculadoras capazes de produzir gráficos e/ou planilhas

Tarefas experimentais

Valor total da prova: 20 pontos

ATENÇÃO! Ímãs podem produzir grandes forças magnéticas quando colocados muito próximos, portanto, cuidado ao manuseá-los com as mãos

Tempo sugerido para resolução das questões: 2 horas (destinado àqueles que pretendem tornar esse experimento um simulado de prova)

Agora é sua hora de colocar as mãos na massa! Siga o passo-a-passo das questões em cada uma das partes dessa prova. Lembre-se sempre de apresentar os erros e incertezas de TODOS os dados medidos. Nessa prova consideraremos: $\sigma_{regua} = 1mm$; $\sigma_{transferidor} = 0,5°$

Parte A: O Atrito (4 pontos)

Na mecânica clássica, estudam-se as propriedades da força de atrito, porém sem aprofundamento em sua complexa natureza eletromagnética. Classicamente, sua fórmula é:

$$F = \mu N$$

Ela atua no sentido oposto ao movimento, N é a força Normal entre o objeto e a superfície e μ é o chamado coeficiente de atrito. O estudo dos coeficientes de atrito teoricamente exige conhecimento avançado de eletromagnetismo, que não pertence ao escopo da mecânica clássica, muito menos dessa prova. Porém, através de medições experimentais, obtém-se gráficos do tipo:

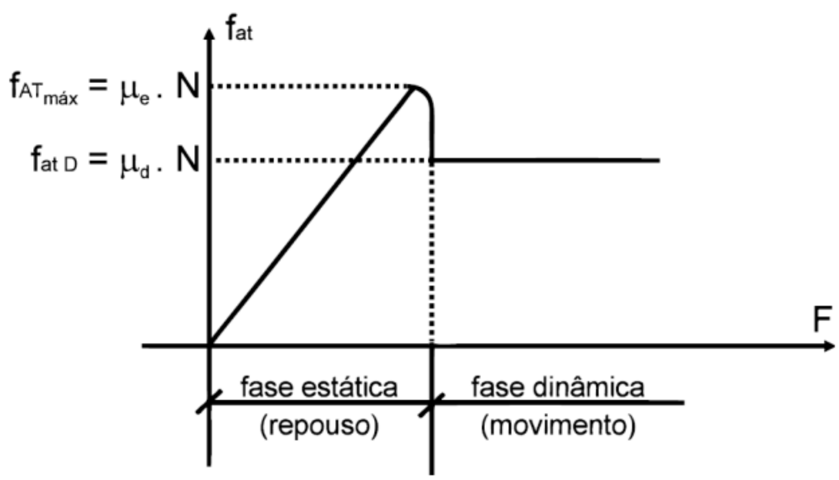

Figura 4: Gráfico típico da força de atrito f_{at} em função da força de cisalhamento exercida F

Através deles, podemos visualizar que a força de atrito (e consequentemente μ) cresce proporcionalmente à força de cisalhamento, até um valor máximo, para o qual o coeficiente de atrito $\mu = \mu_e$ é chamado de coeficiente de atrito estático. Quando o valor da força passa desse limite, o coeficiente passa a ser constante, de modo que $\mu = \mu_d$ é chamado de coeficiente de atrito dinâmico. De modo que $\mu_d \leq \mu_e$.

A1 Usando apenas os materiais dessa prova, descreva como podemos medir o coeficiente de atrito entre os ímãs e as superfícies de apoio.	1,0pt

A2 Usando o seu método, descrito em A1, determine o coefiencie de atrito estático μ_e entre os ímas e cada uma das superfícies de apoio.	3,0pt

Parte B: Força Elástica (6 pontos)

Todo material sólido sofre uma deformação elástica quando uma pequena massa é usada para comprimi-lo ou esticá-lo. As deformações elásticas são reversíveis (graças às forças intermoleculares de origem eletromagnética que conseguem fazer o material retornar a forma original após seu elongamento). Esse tipo de deformação pode ser descirta pela famosa lei de Hooke:

$$F = k\ \Delta x$$

Onde k é chamado de constante elástica do material e Δx é a sua variação de comprimento. Ou seja, a força F de restauração exercida por um material sob elongação elástica é proporcional ao quanto ele foi esticado.
Em alguns materiais, as deformações elásticas são quase imperceptíveis, porém em molas, tecidos e elásticos, essas mudanças de comprimento são notáveis.
Considere: $g = 9.81\frac{m}{s^2}$.

B1 Usando apenas o elástico e as três massas conhecidas, Desenvolva um método para medir o valor de k para o elástico.	0,75pt

B2 Construa uma tabela de valores que julga útil para determinar o valor de k da maneira mais precisa o possível.	1,25pt

B3 Construa um gráfico dos valores medidos em B2.	1,25pt

B4 Determine o valor de k.	0,75pt

B5 Repita o seu procedimento de coleta de dados, agora usando também os ímãs e determine a massa deles.	2pt

Parte C: Dipolos Magnéticos (10 pontos)

Tendo realizado as Partes A e B, obtivemos informações suficientes para estudarmos a interação entre os dois ímãs, mas antes, é importante entendermos: o que é um íma?
Primeiro, precisamos entender algo mais fundamental: os dipolos magnéticos. Lidar com um sistema eletromagnético através de dipolos é uma ferramenta físico-matemática que nos permite, por exemplo, tratarmos pequenas distribuições de corrente como uma coisa única, um dipolo magnético. O exemplo mais clássico de dipolo magnético é o de uma pequena espira circular, conforme a figura:
Nesse sistema, rege uma equação que relaciona as propriedades da espira com as propriedades do dipolo equivalente:

$$\vec{m} = I\vec{a}$$

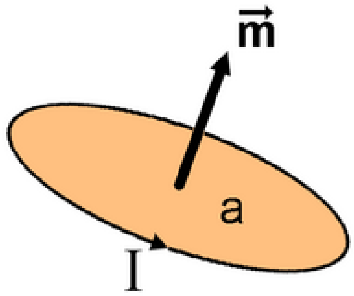

Figura 5: Esquema de dipolo magnético formado a partir de espira circular

Onde I é a corrente que passa pela espira, $\vec{a}$ é o vetor área da mesma e m é o chamado momento de dipolo magnético. O momento de dipolo magnético é tal qual a carga na eletrostática e a corrente na magnetostática, uma grandeza fundamental no estudo do magnetismo na matéria.

Dada essa comparação, é possível demonstrar que o campo produzido por um dipolo magnético no vácuo é:

$$\vec{B_{dip}} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{(3(\vec{m}\cdot\hat{r})\hat{r}-\vec{m})}{r^3}$$

Onde $\vec{r}$ é o vetor posição que liga o dipolo ao ponto do espaço onde deseja encontrar-se o campo magnético, r é seu módulo e $\hat{r}$ é o versor posição, definido como $\hat{r} = \frac{\vec{r}}{r}$. Essa fórmula é extremamente útil e fundamental na área do magnetismo na matéria, porém somente é valida para dipolos muito menores que a distância para a qual se mede (ou seja, $\sqrt{a} \ll r$), para as quais, termos a partir da ordem $\mathcal{O}(r^4)$ são desprezíveis.
Se colocarmos dois dipolos magnéticos para interagir no vácuo, numa região onde não há campo, senão o produzido pelos próprios dipolos, teremos:

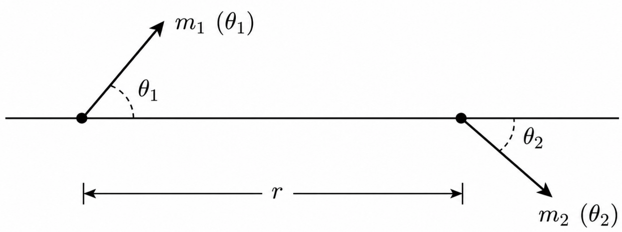

Figura 6: Esquema de dois dipolos magnéticos que interagem magneticamente entre si

No diagrama acima, as setas servem para indicar a direção dos momentos de dipolo ($\vec{m}_1$ e $\vec{m}_2$), cujos módulos são m_1 e m_2 e formam ângulos θ_1 e θ_2 com a horizontal, respectivamente.
Define-se a quantidade U como sendo:

$$U = -\vec{m}\cdot\vec{B_{ext}}$$

Onde $\vec{B_{ext}}$ é o vetor campo magnético externo a um dipolo de momento m.

C1	Demonstre que, no exemplo da figura 6, U é o mesmo para os dois dipolos	1pt

Fisicamente, U representa a energia eletromagnética de interação entre os dipolos, armazenada sobre o espaço. Aqui, vale visualizarmos como sua fórmula é simples, em contradição com o meio clássico para calcularmos a energia interna de um sistema de espiras, onde teríamos que calcular as autoindutâncias de cada uma delas e a indutância-mútua do sistema, para enfim encontrarmos a energia interna do sistema. Esse é um exemplo concreto da utilidade dos dipolos magnéticos enquanto ferramenta matemática.

Algo ainda mais fascinante é que os dipolos magnéticos servem como uma ótima ferramenta para descrevermos o comportamento macroscópico dos materiais ferromagnéticos, como ferro, níquel e cobalto. Esses materiais possuem uma propriedade singular: são fortemente atraídos por campos magnéticos externos (efeito macroscópico), isso se dá, pois, na presença de campo externo, os átomos que formam esses materiais tendem a se polarizar, formando pequenos dipolos(efeito microscópico), que "somados", fazem com que o material se comporte como um único dipolo, na chamada magnetização completa.

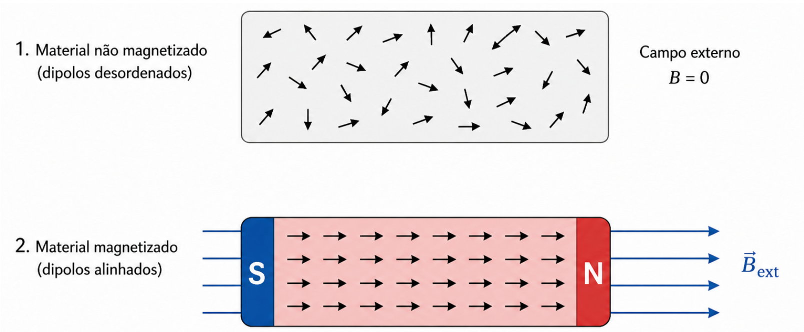

Figura 7: Esquema de magnetização completa

O dipolo magnético resultante da magnetização completa, passa a ter praticamente o tamanho do material magnetizado, e se orienta na direção Polo Sul - Polo Norte (na figura 7, o vetor $\vec{m_{res}}$ estaria na horizontal, orientado de S à N).
Um tipo de material com propriedades magnéticas ainda mais interessantes são os ímãs, os quais, tal qual os materiais ferromagnéticos magnetizados, possuem um Polo Sul e um Polo Norte e se comportam como dipolos magnéticos macroscópicos. Os ímãs, porém, não precisam da presença de um campo externo para se polarizarem, seus átomos se organizam naturalmente dessa maneira, de modo que geram um campo magnético próprio, que pode ser computado, em primeira aproximação, como o de um dipolo ideal[1].

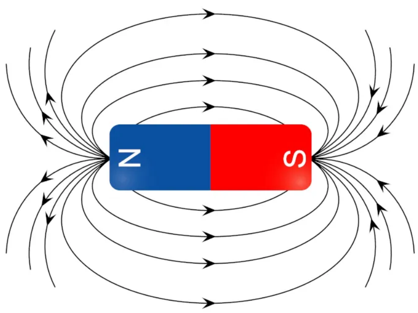

Figura 8: Representação de um ímã, com seus polos e linhas de campo

Uma propriedade advinda das direções das linhas de campo de um ímã, é que, ao colocarmos em contato dois polos iguais de dois ímãs, eles irão se repelir, mas se os polos forem opostos, eles se atrairão, esse comportamento é o mesmo dos dipolos magnéticos, quando postos para interagir. Tendo posse de todo esse conhecimento, fica evidente que podemos tratar ímãs de maneira matematicamente igual aos dipolos.
Estudaremos agora na prática a interação magnética entre 2 ímãs. Tendo em mãos os 2 ímãs que compõem o material de prova, identifique os seus polos e segure-os alinhados sobre as superfícies de apoio (que devem permanecer na horizontal), mantendo-os a uma distância d, para a qual a força de atração não possa ser sentida.
Devido à força de atrito (que pode ser calculada através dos dados coletados nas partes A e B), ao aproximarmos os ímãs até uma distância menor que d, será possível sentir a força de atração dos ímãs. Considere: $\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6} \frac{T \cdot m}{A}$

[1]Essa aproximação pode ser um pouco grosseira para pequenas distâncias, para as quais, efeitos de borda não são desprezíveis, entretanto, se a condição para que termos de ordem $\mathcal{O}(r^4)$ seja desprezível, tal qual nos dipolos, ela passa a ser extremamente precisa

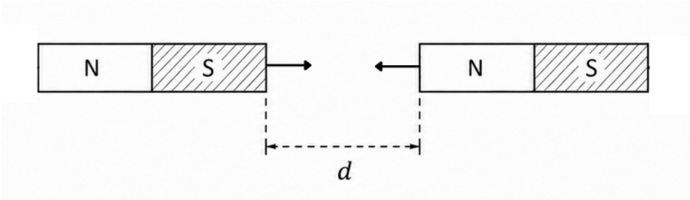

Figura 9: Esquema de montagem experimental

C2 Considerando os momentos de dipolo dos ímãs iguais, encontre uma expressão para o valor mínimo de d.	3pt

C3 Construa uma tabela do coeficiente de atrito μ de cada superfície em função de d.	1,25pt

C4 Usando papel milimetrado, construa um gráfico de μ em função de d a partir dos dados obtidos em C3.	1,25pt

C5 A partir de todos os dados coletados e da expressão obtida em C2, determine o valor do momento de dipolo dos ímãs, com a maior precisão possível.	3,5pt