

OLIMPÍADA BRASILEIRA DE FÍSICA 2022
Prova Experimental da 3ª Fase
11 DE FEVEREIRO DE 2023

NÍVEL II
Ensino Médio
1ª e 2ª Séries

LEIA ATENTAMENTE AS INSTRUÇÕES:

1. Esta prova destina-se exclusivamente aos alunos da **1ª e 2ª Séries do Ensino Médio**.
2. Este caderno de questões tem 6 folhas. Confira-o antes de iniciar a prova.
3. A prova tem 8 questões que valem no total 100 pontos.
4. As respostas devem ser dadas no **Caderno de Respostas**, que contém instruções adicionais que devem ser lidas cuidadosamente antes do início da prova.
5. Utilize o verso das folhas de questões para rascunho.
6. As resoluções e respostas devem dadas utilizando caneta esferográfica azul ou preta (não use caneta de ponta porosa ou tinteiro). O uso de lápis e borracha é permitido apenas no rascunho.
7. É permitido e recomendado o uso de calculadora científica simples com funções estatísticas básicas. Não são permitidas calculadoras programáveis, com recursos gráficos, ou de cálculo simbólico, ou de planilha eletrônica, ou com visores com mais de uma linha de registros.
8. A prova tem duração de 3 horas.
9. O estudante deve permanecer na sala por no mínimo 60 minutos.
10. Se necessário e salvo indicação em contrário, use: aceleração da gravidade = $9,8 \text{ m/s}^2$.

Introdução

A estrutura mais simples capaz de explicar as propriedades magnéticas da matéria é o dipolo magnético $\vec{\mu}$. A magnetização \vec{M} de um corpo é dada pela soma dos momentos de dipolo magnético de seus constituintes (átomos e moléculas).

Um dos fenômenos físicos mais fascinantes do cotidiano é a maneira como os ímãs interagem à distância. Cada ímã possui um polo norte e um polo sul situados em lados opostos. Ao aproximar dois ímãs com polos distintos frente a frente, os ímãs se atraem, caso contrário se repelem. A Figura 1 ilustra a interação entre dois ímãs cilíndricos. Os vetores \vec{M} e $-\vec{M}$ indicam a magnetização de cada ímã. Note que \vec{M} é paralelo ao sentido do sul (S) para o norte (N).

No presente experimento vamos investigar a intensidade da força magnética F_m entre dois pequenos ímãs cilíndricos de neodímio, que é um material que possui uma alta magnetização por unidade de volume.

Cada ímã de neodímio está no interior de uma esfera de uma liga que se magnetiza na presença do campo magnético gerado pelo ímã em seu interior, logo as esferas estão permanentemente magnetizadas. Quando as esferas magnetizadas estão próximas, caso não haja algum impedimento, elas giram para alinhar suas magnetizações, conforme a Figura 2.

O objetivo do presente experimento é investigar a força magnética $F_m(r)$ em função da distância de separação r entre dois ímãs cilíndricos orientados coaxialmente e com magnetizações alinhadas, conforme a Figura 3. Para distâncias aproximadamente iguais ao do comprimento do ímã, $r \approx L$, é possível ajustar o comportamento de $F_m(r)$ pela lei de potência

$$F_m = A \left(\frac{L}{r} \right)^\alpha, \quad (1)$$

onde A é um parâmetro que depende das propriedades geométricas do ímã e de sua magnetização. O expoente α expressa o comportamento dominante de F_m de r em torno de L .

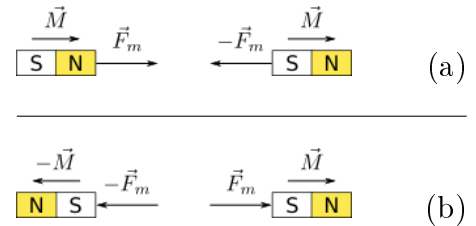


Figura 1. Força de interação magnética \vec{F}_m entre dois ímãs cilíndricos. O vetor \vec{M} é a magnetização do ímã. (a) atração entre polos opostos (ou magnetizações paralelas) e (b) repulsão entre polos iguais (ou magnetizações antiparalelas).

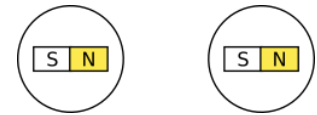


Figura 2. As esferas magnetizadas giram de modo a alinhar suas magnetizações à medida que se aproximam.

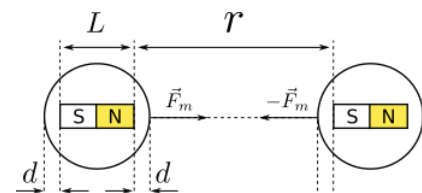


Figura 3. F_m é a intensidade da força magnética entre os ímãs, r é a distância de separação entre eles; L é o comprimento dos ímãs; d é a distância, ao longo do eixo do ímã, entre a superfície da esfera imantada e o ímã em seu interior (o diâmetro da esfera é $L + 2d$).

Material e Arranjo Experimental

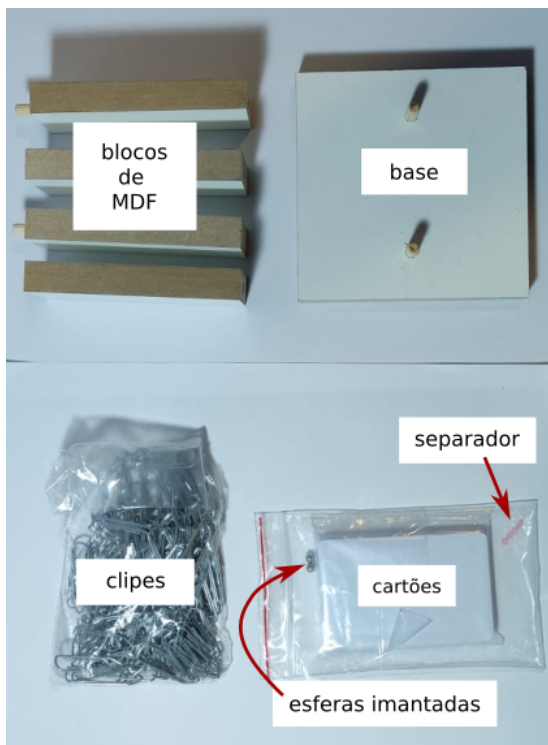


Figura 4. Material experimental: 2 esferas imantadas iguais, 10 cartões plásticos iguais, cerca de 110 cliques de aço do mesmo tipo, 4 blocos de madeira MDF, 1 base de madeira MDF, um separador plástico.

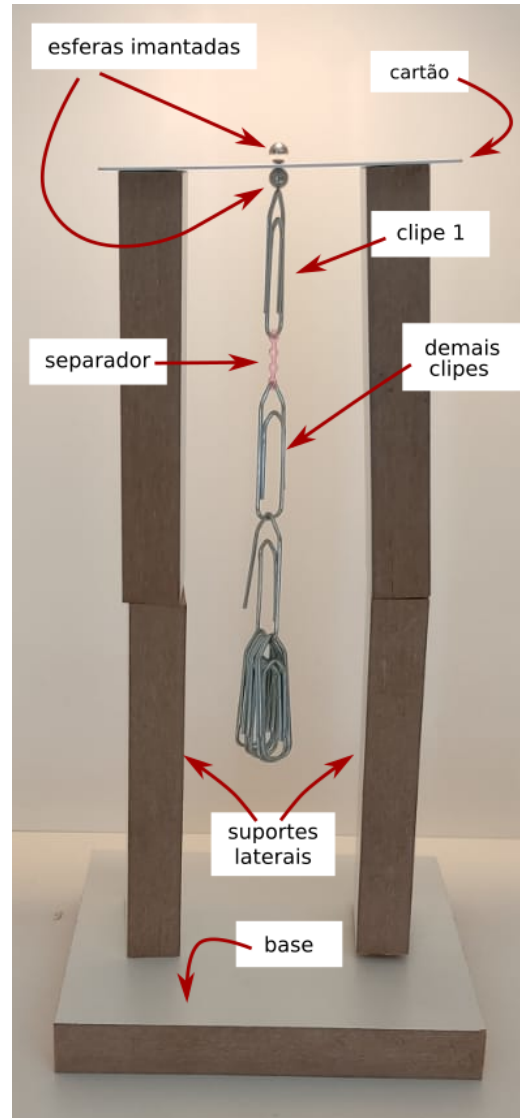


Figura 5. Arranjo experimental: (a) a base e os suportes laterais formam a estrutura de apoio para o(s) cartão(ões) e (b) as esferas imantadas, separadas por um cartão (ou pilha de cartões), estão na mesma vertical.

Procedimentos Experimentais

1. Monte a estrutura de apoio para os cartões formada pelos suportes laterais e a base, conforme a Figura 5. Observe que os blocos de MDF têm pinos e furos para encaixe entre si e para fixação na base. Escolha adequadamente os blocos que possibilitam a montagem.
2. Monte o arranjo experimental conforme a Figura 5. Note que as esferas (a) estão em equilíbrio estático, (b) estão na mesma vertical e (c) estão separadas por uma distância igual à espessura de um cartão.
3. Pode-se variar a distância de separação entre as esferas trocando o cartão por uma pilha de cartões.
4. O separador plástico, de peso desprezível, é usado para diminuir a magnetização dos demais cliques e eliminar interações magnéticas indesejadas.
5. Condição de equilíbrio estático. Na Figura 5, a esfera inferior (sob o cartão) está submetida a quatro forças verticais:
 - (a) Força aplicada pela interação magnética com a esfera superior, para cima, de intensidade F_m .
 - (b) Força gravitacional (peso) da própria esfera, para baixo, de intensidade P .
 - (c) Força aplicada pelo conjunto de cliques, para baixo, de intensidade F_C .
 - (d) Força de contato com o cartão (normal), para baixo, de intensidade N .
6. Enquanto a esfera inferior estiver em equilíbrio estático temos:

$$F_m = P + F_C + N. \quad (2)$$

Na situação da Figura 5, $F_m > P + F_C$.

7. Aumentando o número de cliques pendurados, aumenta-se F_C . Caso $(P + F_C) > F_m$ o equilíbrio estático não é mais possível.
8. O arranjo experimental permite estimar F_m pelos valores da soma $(P + F_C)$ imediatamente antes e depois da ruptura do equilíbrio estático.
9. São medidas diretas do arranjo experimental:
 - (a) O número de cartões N_S da pilha de cartões é uma medida da distância de separação entre as esferas imantadas em unidades da espessura de um cartão.
 - (b) O número de cliques suspensos N_C é uma medida de F_C em unidades do peso médio de um clipe.

Questão 1 (15 pontos). Aquisição de dados. Considere um arranjo experimental, conforme a Figura 5, no qual as esferas estão separadas por uma pilha com N_S cartões. Seja $N_{C,max}$ o número máximo de cliques que podem ser sustentados em equilíbrio estático nessa situação. Faça medidas de $N_{C,max}$ em função de N_S e organize suas medidas em uma tabela.

Questão 2 (15 pontos). Tabela das estimativas de $F_m(r)$. Use as medidas feitas na Questão 1 e as grandezas definidas na Figura 3 para obter uma tabela da força magnética F_m em função da distância r e de suas respectivas incertezas. Considere ainda que:

- A distância d na Figura 3 é igual à espessura ℓ de um cartão.
- O peso P de uma esfera é igual à metade do peso p de um clipe.
- Quatro medidas da espessura de uma pilha com **10 cartões**, feitas com paquímetro com divisão de escala de 0,02 mm, resultaram nos seguintes valores: 7,62 mm, 7,58 mm, 7,59 mm e 7,64 mm.
- A medida da massa de **100 cliques**, feita com uma balança eletrônica de cozinha, resultou em (118 ± 2) gramas.

- Determine a espessura ℓ de um cartão com a respectiva incerteza.
- Determine o peso p de um clipe com a respectiva incerteza.
- Determine uma expressão para a distância r nas unidades de sua conveniência.
- Determine uma expressão para $F_m(r)$ em unidades de sua conveniência.
- Estime a incerteza σ_F de $F_m(r)$. Justifique a estimativa.
- Construa uma tabela com as colunas r , $F_m(r)$ e colunas para suas respectivas incertezas.

Questão 3 (10 pontos). Linearização de $F_m(r)$. (a) Linearize a equação 1 e identifique o coeficiente angular e o termo independente. (b) A partir da tabela da Questão 2, obtenha uma tabela com os dados linearizados. Mostre como as incertezas dos dados linearizados são obtidas.

Questão 4 (10 pontos). Gráfico de $F(r) \times r$. No papel milimetrado, (a) construa o gráfico $F(r) \times r$ nas unidades de sua conveniência e (b) trace a reta de melhor ajuste.

Questão 5 (10 pontos). Gráfico de grandezas linearizadas em papel milimetrado. No papel milimetrado, (a) faça um gráfico com os dados linearizados obtidos na Questão 3 e (b) trace a reta de melhor ajuste.

Questão 6 (10 pontos). Gráfico $F(r) \times r$ em papel dilog. No papel dilog, construa o gráfico $F(r) \times r$ em unidades de sua conveniência e (b) trace a reta de melhor ajuste.

Questão 7 (15 pontos). Parâmetros da lei de potência. Considere a lei de potência dada na equação 1.

- (a) Determine o expoente α com a respectiva incerteza.
- (b) Encontre uma maneira de estimar o diâmetro D da esfera usando a espessura dos cartões como unidade de medida. Descreva o procedimento experimental. Determine D e sua incerteza em unidades de ℓ .
- (c) Estime, em mm, o comprimento do ímã L e sua incerteza.
- (d) Determine o coeficiente A em unidades do SI.

Questão 8 (15 pontos). Intensidade de campo magnético e conclusão. Pode-se mostrar que a lei de potência obtida na equação 1 se relaciona com as propriedades de um ímã cilíndrico de comprimento L e raio R por

$$F_m = \lambda \left[\frac{\pi B_0^2 (L^2 + R^2)}{\mu_0} \left(\frac{R}{L} \right)^4 \right] \left(\frac{L}{r} \right)^\alpha, \quad (3)$$

onde $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ T·m/A é a permeabilidade magnética do vácuo, B_0 é a intensidade do campo magnético nos polos do ímã e λ é um parâmetro dependente da região de ajuste de $F_m(r)$ pela lei de potência.

- (a) Sabendo que $\lambda = 0,6$ na região na qual se realizaram as medidas de F_m e considerando que $R = 2\ell$, determine o valor de B_0 com sua respectiva incerteza.
- (b) Escreva a lei de potência obtida experimentalmente que descreve a interação entre os ímãs na região r em torno de L , com r em mm e F_m em N.
- (c) Compare o comportamento da força magnética entre os ímãs com outra força de seu conhecimento cuja intensidade diminui com a distância.