

Medição do campo magnético terrestre (10 pontos)

Introdução

Este problema tem como objetivo medir a componente horizontal do campo magnético terrestre. Primeiro, um íman será caracterizado recorrendo a um instrumento chamado balança de Gouy, sendo depois utilizado para medir o campo magnético terrestre.

Durante o problema inteiro, apenas se espera que as incertezas sejam determinadas dos ajustes aos dados experimentais, não das medições experimentais.

Lista do equipamento

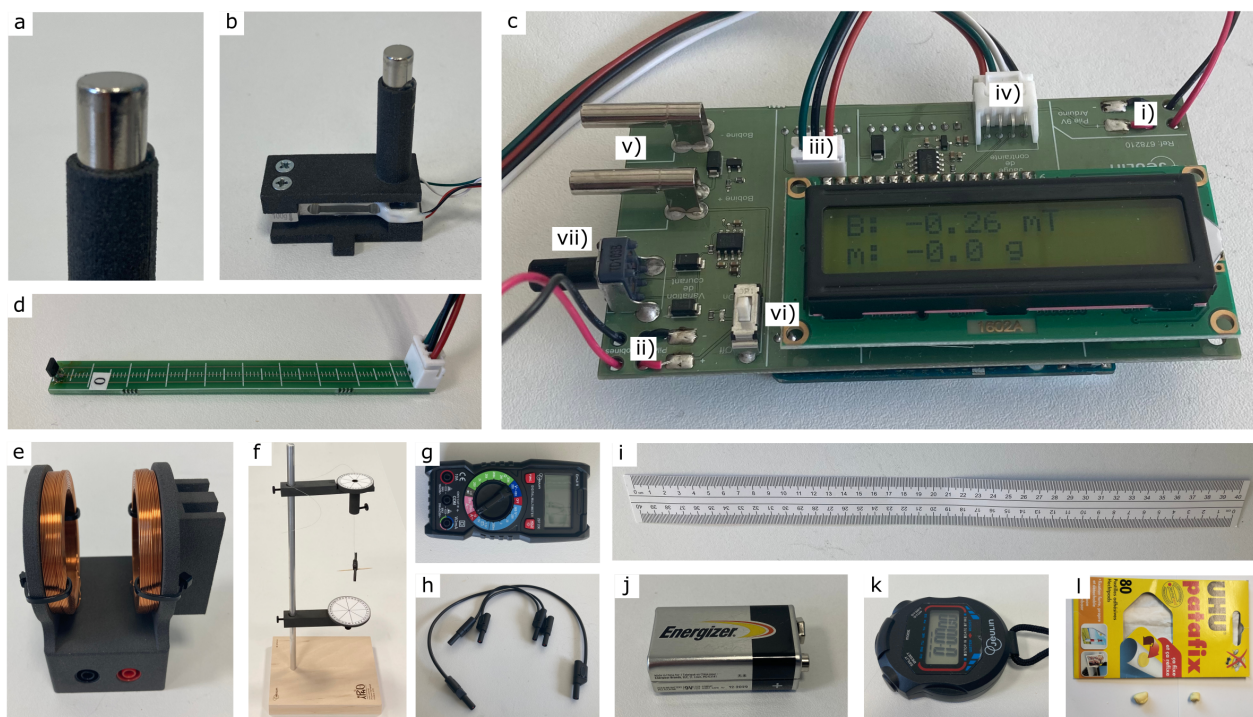


Fig. 1. Fotografias de todo o equipamento disponibilizado.

A lista de equipamento é apresentada a seguir e ilustrada na Fig. 1. A quantidade de cada elemento está indicada entre [] quando esta for superior a um. Os alunos deverão pedir ajuda caso algum equipamento pareça não estar a funcionar.

- **(a)** Ímanes [3]. Um íman está colado ao sensor de força (b) e não deve ser retirado. Outro íman está inserido na cápsula (f) e não deve ser retirado até ser indicado. O último íman será utilizado na parte A.5. Assume-se que todos os ímanes são idênticos.
- **(b)** Sensor de força. Ligado ao Arduino (c), este sensor mede a força aplicada na direcção do seu eixo, denotada por m_f , em gramas-força ("g"). Uma grama-força é a força sentida por uma massa de 1 grama no campo gravítico à superfície da Terra ($g_0 = 9.81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$). Um dos ímanes (a) está ligado ao sensor. Cada vez que o sensor é ligado, o valor por este indicado é reposto a 0, independentemente da situação. *Este sensor não deve ser submetido a forças superiores a 200 gramas. O sensor tem de ser cuidadosamente desempacotado.*
- **(c)** Arduino com ecrã digital. Este elemento é utilizado para alimentar as bobinas (e) e para efetuar

medições de força e de campo magnético, apresentadas diretamente em gramas-força ("g") e mT. A pilha (j) que alimenta o Arduino deve ser ligada à ranhura (i), e a pilha (j) que alimenta as bobinas (e) à ranhura (ii) (tenha atenção à polaridade da ligação). O sensor de força (b) e o sensor de campo magnético (d) devem ser ligados às ranhuras (iii) e (iv), respetivamente, e os cabos de alimentação das bobinas à ranhura (v). Um interruptor (vi) fecha o circuito de alimentação da bobina (indicado por um LED), cuja corrente eléctrica pode ser controlada em (vii).

- **(d)** Sensor de campo magnético com régua. Ligada ao Arduino (c), esta sonda mede o campo B_z ao longo da direção $\vec{e}_z$ da régua, em mT.
- **(e)** Bobinas em configuração anti-Helmholtz (i.e. enroladas em direcções opostas). Estas bobinas devem ser ligadas em série com o amperímetro (g) e com o Arduino (c) para criar um campo magnético.
- **(f)** Suporte metálico com base de madeira, com cápsula suspensa onde é inicialmente inserido um íman (a) e com goniómetro. A montagem detalhada deste dispositivo é explicada a seguir.
- **(g)** Multímetro. Utilizado apenas como amperímetro na gama 10A. Se ficar inativo, o multímetro desliga-se e tem de ser ligado novamente colocando-o na posição "OFF". Não utilizar os dois cabos fornecidos na caixa do multímetro.
- **(h)** Fios eléctricos [3].
- **(i)** Régua de 40 cm.
- **(j)** Pilhas de 9V [3]. A sua capacidade é da ordem de 300 mA · h.
- **(k)** Cronómetro.
- **(l)** Pasta adesiva. Pode ser usada durante o problema todo.

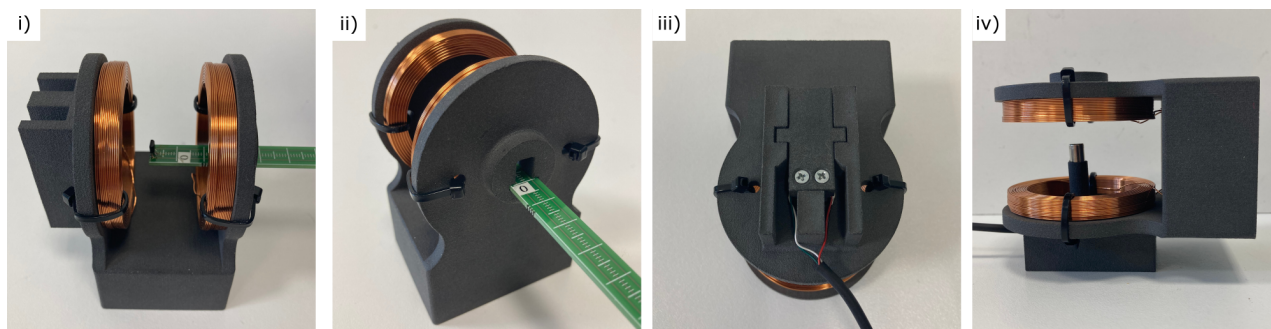


Fig. 2. Utilização dos sensores no interior das bobinas anti-Helmholtz.

Utilização de sensores através da interface com o Arduino (Fig. 2)

O sensor de campo magnético (d) pode deslizar nas bobinas (e), conforme indicado em (i), medindo o campo ao longo do eixo destas. A posição $z = 0$ do sensor é mostrada em (ii), e z aumenta à medida que se insere no interior das bobinas.

O sensor de força (b) é introduzido nas bobinas como indicado em (iii), antes de as rodar como em (iv), para que estas fiquem na vertical. *Para isto, garanta que os fios eléctricos passam através das calhas previstas para o efeito.*

Montagem do equipamento (f) (Fig. 3), a montar apenas antes de iniciar a parte B, com um fio de 34 cm

- Insira a coluna metálica (f0a) na base de madeira com pés de plástico (f0b) para formar o suporte (f0).

Experiment



International
Physics Olympiad
FRANCE 2025

Q1-3

European Portuguese (Portugal)

- A peça (f1) situa-se na parte inferior e marca o ângulo da cápsula. Instale o suporte (f1b) na coluna metálica por meio de um parafuso (f4) e, em seguida, fixe a peça (f1a) com um segundo parafuso (f4).
- A peça (f2) situa-se na parte superior e segura o fio que suporta a cápsula. Instale o suporte (f2b) na coluna metálica por meio de um parafuso (f4) e, em seguida, insira a peça (f2a) no mesmo.
- Para construir a cápsula (f3), insira a barra de inércia (f3b) e um palito (f3c) na peça de suporte (f3a) na qual já está inserido um íman (a). Introduza o fio que suporta a cápsula na peça (f2a) e fixe-lo com um parafuso (f4). Rodar a peça (f2a) altera o ângulo de fixação do fio. O palito permite medir com precisão a posição angular da cápsula.

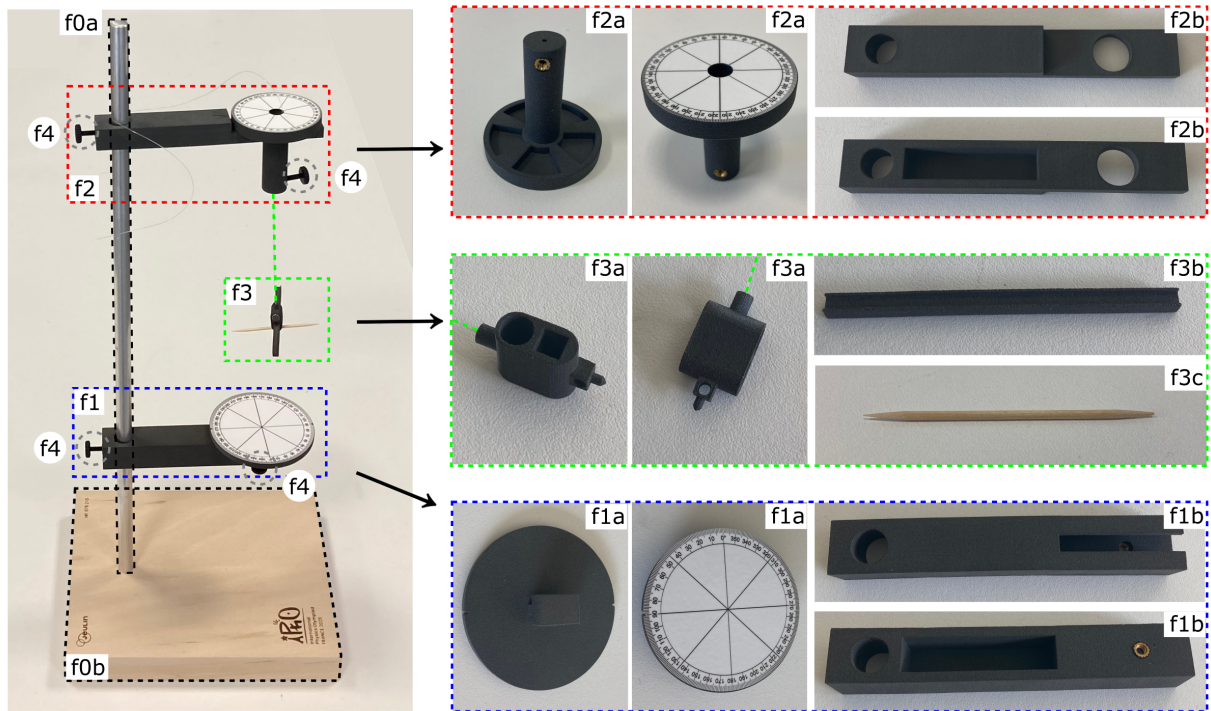


Fig. 3. Instalação da cápsula no suporte metálico. As partes (f1a), (f1b), (f2a), (f2b) e (f3a) são mostradas de dois ângulos diferentes. Existem quatro parafusos de plástico (f4) idênticos.

Parte A. Balança de Gouy e momento magnético

Modelação

Assume-se que os ímanes podem ser tratados como dipolos magnéticos com momento magnético $\vec{m}_m$. A força que actua num tal dipolo de momento magnético $\vec{m}_m = m_m \vec{e}_z$ num campo magnético $\vec{B} = B(z) \vec{e}_z$ é

$$\vec{F} = m_m \frac{dB(z)}{dz} \vec{e}_z. \quad (1)$$

Quando uma corrente eléctrica i flui através das bobinas anti-Helmholtz, o campo $\vec{B}$ ao longo do vetor unitário $\vec{e}_z$ do eixo de revolução é

$$\vec{B}(z) = \alpha i(z - z_0)\vec{e}_z. \quad (2)$$

Esta equação é apenas válida perto do centro do dispositivo, denotado por $z = z_0$.

Campo magnético nas bobinas

- A.1** Estime numericamente o tempo de funcionamento típico τ de uma das pilhas usadas no problema, com uma corrente da order de 2A. 0.2pt

Este resultado deve ser tido em conta aquando a realização dos seguintes protocolos, sabendo que as bobinas apenas serão utilizadas na parte A. Note-se que está disponível uma bateria de reserva, se necessário.

Introduza o sensor do campo magnético nas bobinas, como indicado na Fig. 2. Veja também esta figura para a identificação da posição do sensor nas bobinas.

- A.2** Para uma corrente eléctrica fixa $i_0 \simeq 1.0\text{A}$, meça e desenhe o gráfico do campo magnético B_z em função da posição z do sensor ao longo do eixo das bobinas. Identifique a maior região $[z_{\min}, z_{\max}]$ onde o campo magnético medido é linear em função da posição. 0.8pt

- A.3** Colocando o sensor em duas posições (z_1, z_2) desta região de dependência linear, desenhe uma curva para verificar a dependência de $\vec{B}$ na corrente eléctrica (conforme dada pela equação (2)). Determine o valor de α , juntamente com a sua incerteza. 0.9pt

Balança de Gouy

Retire o sensor de campo magnético de dentro das bobinas e insira cuidadosamente o sensor de força no interior destas, como descrito na Fig. 2. Tenha especial atenção para a colocação dos fios eléctricos nas calhas.

- A.4** Faça medições da grama-força m_f em função da corrente i . Desenhe um gráfico apropriado para determinar o valor do momento magnético m_m do íman, juntamente com a respectiva incerteza. 0.8pt

Medição alternativa do momento magnético

Na aproximação dipolar, o campo magnético gerado por um íman de momento magnético m_m ao longo do seu eixo de revolução z é

$$B_z(z) = \frac{\mu_0 m_m}{2\pi(z - z_a)^3}, \quad (3)$$

onde z_a não é necessariamente o centro geométrico do íman, e $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{H} \cdot \text{m}^{-1}$.

- A.5** Meça o campo magnético B_z ao longo do eixo de revolução do íman livre, em função da distância z . Desenhe uma curva para verificar o modelo dado pela Eq. (3), mostrando os desvios da experiência. Deduza um novo valor para m_m , juntamente com a sua incerteza. 1.3pt

- | | | |
|------------|---|-------|
| A.6 | Tendo em conta os dois resultados obtidos em A.4 e A.5, proponha um valor experimental final de m_m juntamente com a sua incerteza. | 0.2pt |
|------------|---|-------|

Parte B. Medição do campo magnético terrestre

Modelação

Vamos agora estudar o movimento oscilatório de um íman no plano horizontal para estimar o valor da componente horizontal B_e do campo magnético terrestre. Veja a Fig. 3 e as instruções de montagem acima da Fig.3. A cápsula (f3), que contém o íman, está sujeita a dois torques em torno do eixo vertical:

- o torque do fio, dado por $\Gamma_f = -\frac{C_f}{L}(\theta - \theta_0)$, onde C_f é uma constante, L o comprimento total entre as duas ligações do fio e θ_0 corresponde ao ângulo para o qual o fio não está torcido,
- o torque do campo magnético terrestre, dado por $\Gamma_e = -m_m B_e \sin(\theta - \theta_e)$, onde a posição angular do campo magnético terrestre é dada pelo ângulo θ_e .

Denotando por J o momento de inércia desconhecido do conjunto cápsula e íman em torno do eixo vertical, o teorema do momento angular permite escrever

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} = \Gamma_f + \Gamma_e = -\frac{C_f}{L}(\theta - \theta_0) - m_m B_e \sin(\theta - \theta_e). \quad (4)$$

Quando a aproximação $\sin(\theta - \theta_e) \simeq \theta - \theta_e$ é válida, isto traduz-se num movimento oscilatório sinusoidal com um período T . Para esta parte, a pasta adesiva (I) é maleável em qualquer forma e tamanho, sendo também acoplável às outras partes do aparelho.

Cuidado: Para evitar perturbações provocadas por campos magnéticos externos, o íman deve ser colocado a pelo menos uma distância de 20cm de qualquer objeto metálico ou fonte magnética (incluindo outros ímanes).

Instalação experimental e primeira medição

Para as questões B.1 a B.5, prepare o comprimento do fio como $L = 34\text{cm}$ e certifique-se de que não está torcido. Nesta situação, começamos por assumir que o torque do fio é desprezável em relação ao torque do campo magnético da Terra, uma hipótese à qual voltaremos mais tarde.

Para alinhar θ_0 com θ_e , utilize a peça (f2a) para ajustar θ_0 de modo a que a cápsula (f3) não gire quando o íman é retirado. Em seguida, reintroduza o íman na cápsula e mantenha θ_0 inalterado até à questão B.5.

- | | | |
|------------|---|-------|
| B.1 | Proponha um protocolo experimental para determinar B_e . Indique as diferentes grandezas a medir, assim como as suas unidades. Descreva essas grandezas num esquema detalhado e relacione-as com as indicadas nas instruções através de uma equação. Para cada grandeza, especifique se ela é fixa (F) ou variável (V) ao longo do protocolo. | 0.3pt |
|------------|---|-------|

- | | | |
|------------|--|-------|
| B.2 | Utilizando o protocolo descrito acima, desenhe um gráfico para determinar um primeiro valor de B_e , juntamente com a sua incerteza. | 1.1pt |
|------------|--|-------|

Determinação do torque do fio

B.3 Mantendo $L = 34$ cm, estude o movimento da cápsula sem o íman e determine o valor de C_f , incluindo a sua incerteza experimental: realize uma medição do período para duas configurações do sistema. Especifique a equação que relaciona C_f com as quantidades medidas. 0.7pt

B.4 Utilizando medições anteriores, obtenha a expressão e determine numericamente o comprimento crítico L_c para o qual os factores de amplitude C_f/L e $m_m B_e$ dos torques Γ_f e Γ_e são iguais. Na questão B.2, qual foi a razão $(C_f/L)/(m_m B_e)$? Escolha de entre os intervalos: $[0\%, 1\%]$; $[1\%, 5\%]$; $[5\%, 20\%]$; $[20\%, 50\%]$; $[50\%, \infty\%]$ 0.3pt

Medição no regime estático

Propomos agora uma medição estática do campo magnético terrestre. Reinsira o íman na cápsula. Utilize a peça (f2a) da Fig. 3 para ajustar a posição angular θ_0 , fazendo com que o fio torça.

B.5 Ainda com um comprimento fixo de $L = 34$ cm, desenhe um gráfico apropriado para estudar como a posição de equilíbrio do íman θ_{eq} depende do ângulo θ_0 , e determine um segundo valor de B_e , juntamente com a sua incerteza. 1.1pt

B.6 Varie o comprimento L e repita o estudo anterior para dois outros comprimentos, de modo a verificar a dependência em L do torque do fio. Usando um gráfico final que resuma todas as dependências, determine um novo valor para B_e , juntamente com sua incerteza. 2.3pt

Crateras e dunas de areia (10,0 pontos)

O rover Spirit da NASA (**Fig. 1.(a)**) aterrou em Marte em 2004 para estudar a sua geologia e a potencial presença de água. O local de aterragem (**Fig. 1.(b)**) está rodeado de crateras de vários tamanhos e de dunas. Durante a exploração, o rover tem de evitar ficar preso nas dunas de areia de Marte.

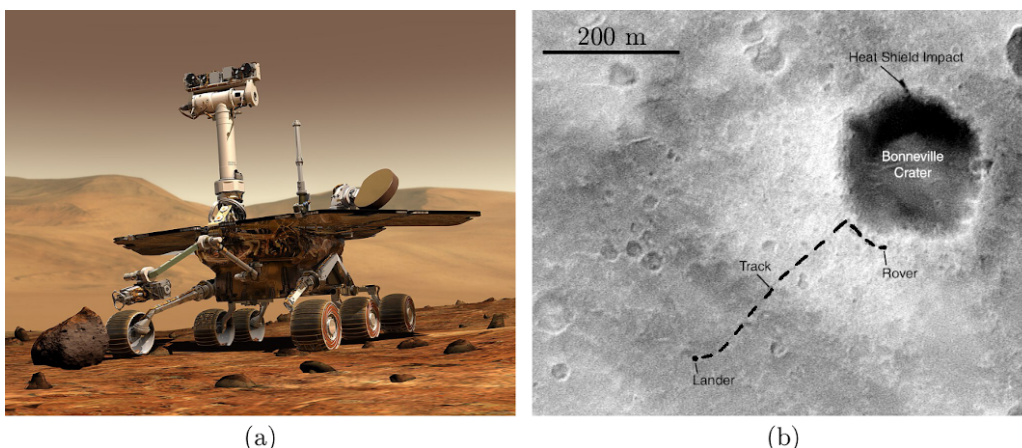


Fig. 1. (a) Representação artística do Spirit. (b) Local de aterragem do rover em Marte. A barra de escala representa 200 m.

O problema tem duas partes independentes, A (formação de crateras) e B (atolado na areia), que podem ser resolvidas em qualquer ordem. A lista de equipamentos é apresentada a seguir e ilustrada na **Fig. 2**.

- (a) Caixa de plástico, que precisa de ser esvaziada. A caixa será utilizada para recolher qualquer areia que transborde durante as experiências.
- (b) Taça.
- (c) Garrafa com areia.
- (d) 6 esferas de aço num recipiente. As esferas têm 4 diâmetros diferentes. As três esferas mais pequenas são idênticas.
- (e) Fita métrica.
- (f) Base de madeira com pés de borracha (f1), uma barra vertical (f4), um grampo de aperto (f2) e uma barra horizontal (f3). Os diferentes elementos devem ser montados conforme indicado na fotografia.
- (g) Peneira, utilizada para encontrar a esfera pequena se esta se perder na areia.
- (h) Calha de alumínio, com 1 m de comprimento.
- (i) Escova para limpar a areia da calha e das esferas, se necessário.
- (j) Caixa de madeira.
- (k) Cronómetro.
- (l) Pasta adesiva.
- (m) Funil para ajudar a colocar a areia de volta na garrafa, no final.
- (n) Colher.

Experiment



International
Physics Olympiad
FRANCE 2025

Q2-2

European Portuguese (Portugal)

- (o) Régua.

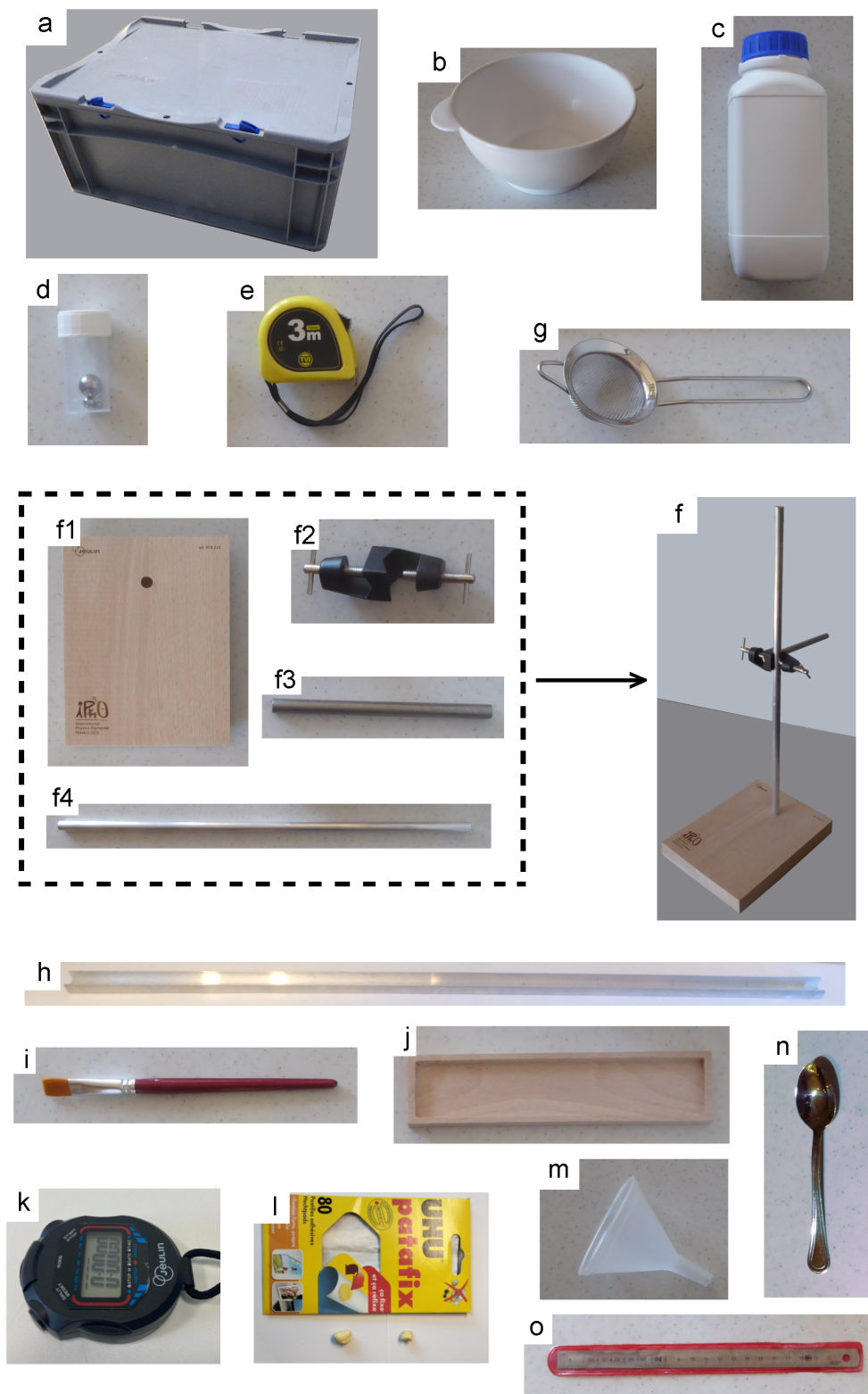


Fig. 2. Fotografias de todo o equipamento.

A. Crateras de impacto

As crateras em Marte, cujo diâmetro D varia de cerca de 10m a várias centenas de km, resultam do impacto de meteoritos. Diferentes modelos preveem como D depende dos parâmetros de impacto: diâmetro d do objeto de impacto e a sua energia E (Fig. 3).

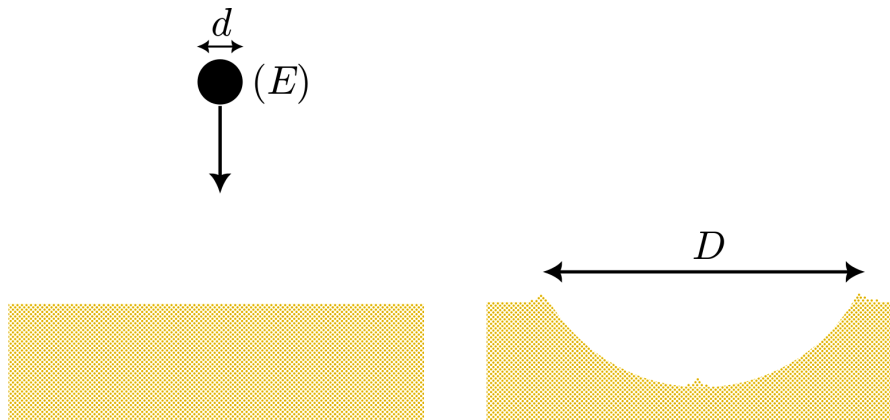


Fig. 3. Formação da cratera.

Modelo 1: D depende apenas do diâmetro d do objecto de impacto,

$$D = c_1 d, \quad (1)$$

onde c_1 é um número adimensional independente de E .

Modelo 2: a energia do meteorito E é convertida através de processos volumétricos durante o impacto. Este modelo prevê que D é proporcional a $E^{1/3}$,

$$D = c_2 E^{1/3}. \quad (2)$$

em que c_2 é um parâmetro independente de E e d .

Modelo 3: A energia E é utilizada para ejetar material para fora da cratera. Sob este pressuposto,

$$D = c_3 E^{1/4}. \quad (3)$$

em que c_3 é um parâmetro independente de E e d .

Aqui, realizaremos experiências de formação de crateras à escala do centímetro para comparar os três modelos. Esferas de aço de diferentes diâmetros d e massas m , com uma densidade $\rho_a = 7.8 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ (item **(d)** da lista de equipamentos), fazem o papel de meteoritos.

Esfera #1	$d_1 = 2.0 \text{ mm}$	$m_1 = 0.033 \text{ g}$
Esfera #2	$d_2 = 5.0 \text{ mm}$	$m_2 = 0.51 \text{ g}$
Esfera #3	$d_3 = 9.0 \text{ mm}$	$m_3 = 3.0 \text{ g}$
Esfera #4	$d_4 = 16.0 \text{ mm}$	$m_4 = 17 \text{ g}$

Experiment



International
Physics Olympiad
FRANCE 2025

Q2-5

European Portuguese (Portugal)

A taça **(b)** cheia de areia **(c)** é colocada dentro da caixa de plástico vazia **(a)**, que ajudará a recolher o excesso de areia. Enche-se completamente a taça com areia e a superfície é cuidadosamente nivelada com a borda da régua **(o)**. Evite compactar a areia! Para soltar a esfera por cima da taça, pode utilizar-se a base equipada com uma barra e um parafuso **(f)**. A barra serve de guia para lançar a esfera diretamente sobre a taça e também para medir a altura de queda h acima da superfície, que será medida com a fita métrica **(e)**.

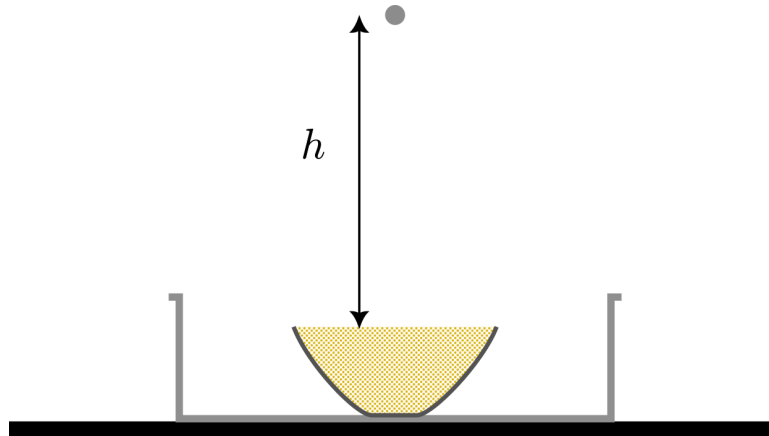


Fig. 4. Configuração experimental para a formação de crateras.

Deixe cair a esfera 3 de uma altura $h = 50\text{ cm}$ e meça o diâmetro D da cratera formada. Repita a experiência 5 vezes. Depois de cada impacto, misture a areia com a colher **(n)** e nivela-a cuidadosamente com a borda da régua **(o)**. Evite compactar a areia! Se necessário, utilize a peneira **(g)** para encontrar a esfera, caso esta se perca na areia.

A.1	Apresente os seus resultados numa tabela e apresente o valor de D com a sua incerteza.	0.6pt
------------	--	-------

Durante a queda, a força de resistência do ar é dada por

$$F = \frac{1}{8} \pi d^2 \rho_0 C_x v^2 \quad (4)$$

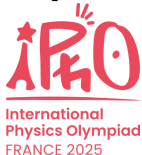
em que v é a velocidade da esfera, $\rho_0 \approx 1.2\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ é a densidade do ar e C_x é um coeficiente adimensional de ordem da unidade.

A força de resistência do ar é desprezável se a esfera for largada de uma altura inferior à altura máxima de queda, h_{max} , definida como a altura à qual a força de resistência da ar permanece inferior a 10 % do peso durante a queda.

A.2	Determine a expressão teórica para a altura máxima de queda h_{max} . Calcule h_{max} numericamente para as quatro esferas disponíveis.	0.5pt
------------	---	-------

Investigue experimentalmente a relação entre D e E , de modo a comparar os três modelos de escalamento apresentados na introdução. Verifique se o expoente se altera ao longo da gama de energias testadas. Para isso, efetue uma série de medições, deixando cair as esferas de diferentes alturas. É necessário abranger uma vasta gama de energias. As esferas podem ser largadas de alturas até $h = 2\text{ m}$

Experiment



Q2-6

European Portuguese (Portugal)

para atingir valores elevados de E , respeitando a condição estabelecida em **A.2**. Para cada conjunto de parâmetros, repita a experiência apenas duas vezes, e calcule o valor médio D .

A.3 Apresente os seus resultados numa tabela: massa da esfera m , altura da queda h , energia de impacto E , diâmetro da cratera D . 1.7pt

A.4 Represente os seus resultados num gráfico em papel da sua escolha (logarítmico ou linear). No gráfico, acrescente linhas correspondentes aos modelos 1, 2 e 3. Diga qual dos modelos teóricos está mais de acordo com a experiência. 1.2pt

B. Rolamento e atolamento na areia

Cinco anos após a aterragem, o rover Spirit atolou definitivamente nas areias de uma duna marciana. Rolar na areia é um problema particularmente delicado, pois o movimento dos grãos dissipa muita energia. Aqui, estudamos a desaceleração de uma esfera que rola na areia. A esfera, inicialmente em repouso, é acelerada primeiro sobre uma calha inclinada num ângulo θ , e depois abrandada sobre a areia.

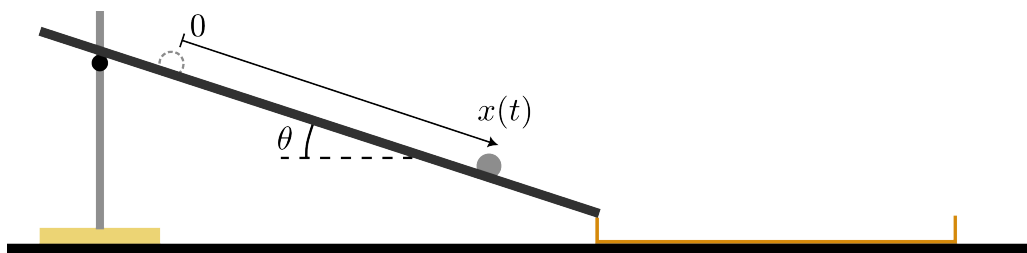


Fig. 5. Calha inclinada (h) combinada com a caixa de madeira (j).

Movimento da esfera ao longo da calha

A esfera 4 é libertada sem velocidade inicial a partir de um ponto arbitrário do carril (h), escolhido como origem do eixo x ($x = 0$) (Fig. 5). Seja $x(t)$ a posição da esfera ao longo da calha. O momento de inércia de uma esfera de massa m e diâmetro d em relação a um eixo que passa pelo seu centro é dado por $J = md^2/10$. A energia cinética K de uma esfera que se move à velocidade v enquanto roda à velocidade angular ω é

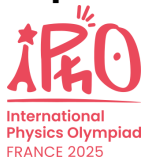
$$K = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}J\omega^2. \quad (5)$$

Assumimos que a esfera rola sobre o carril sem escorregar e desprezamos qualquer dissipação de energia.

B.1 Dê a expressão para a posição x da esfera em função do tempo t , ângulo θ e aceleração da gravidade g . 0.4pt

Uma das extremidades da calha (h) assenta na extremidade da caixa de madeira (j), que, por enquanto, se encontra vazia. A outra extremidade da calha está apoiada no suporte (f) de modo a formar um ângulo de inclinação $\theta = 5^\circ$ com a horizontal. Este ajuste deve ser efetuado com cuidado. A calha é fixada no lugar (de ambos os lados) com pasta adesiva (l).

Experiment



Q2-7

European Portuguese (Portugal)

Utilize um cronómetro (**k**) para medir o tempo t_{50} que a esfera demora a percorrer uma distância $l = 50$ cm ao longo da calha.

- | | | |
|------------|--|-------|
| B.2 | Efetue 5 medições e apresente o resultado, juntamente com a ordem de magnitude da sua incerteza estatística. | 0.7pt |
|------------|--|-------|

Meça t para pelo menos 8 valores de ℓ , incluindo a ordem de magnitude da sua incerteza estatística.

- | | | |
|------------|---|-------|
| B.3 | Apresente os seus resultados numa tabela. | 0.8pt |
|------------|---|-------|

- | | | |
|------------|--|-----|
| B.4 | Faça um gráfico com os seus resultados, incluindo barras de erro, para confirmar a lei estabelecida na questão B.1 . Faça uma estimativa experimental da constante g com a sua incerteza. | 1pt |
|------------|--|-----|

Movimento da esfera na areia

Chamamos ℓ à distância percorrida pela esfera na calha. Na areia, a esfera percorre uma distância L até atingir o repouso, como definido na **Fig. 6**.

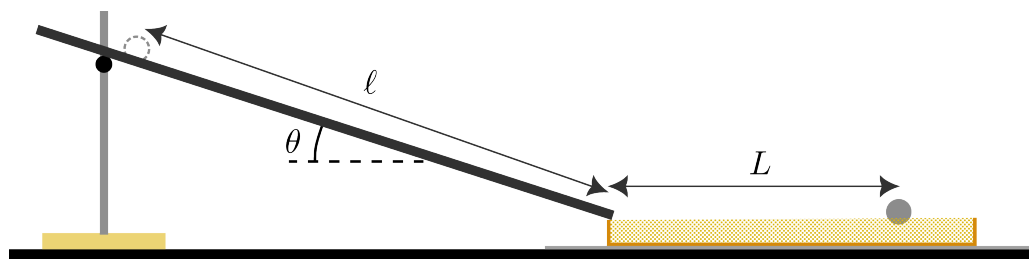


Fig. 6. Aceleração ao longo de uma distância ℓ e desaceleração ao longo de uma distância L .

É assim abrandada por uma força dissipativa T que pode ter duas origens possíveis:

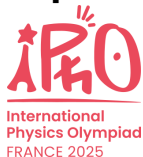
- **Modelo 1 (atrito sólido):** como entre dois sólidos em movimento relativo, a areia exerce sobre a esfera uma força de resistência constante $T = -\mu_{\text{eff}}mg$, em que μ_{eff} é o coeficiente de atrito efetivo do contacto esfera-areia e m é a massa da esfera.
- **Modelo 2 (resistência de fluido):** a força de resistência depende linearmente da velocidade da esfera, $T = -k v$ onde k é uma constante e v a norma da velocidade.

O objetivo aqui é determinar qual dos modelos melhor descreve o comportamento de resistência observado.

Quando se move na areia, a esfera é modelada como uma massa pontual. Dado o pequeno declive da calha, desprezamos a perda de energia na transição entre a calha e a caixa de madeira. Estabeleça a relação teórica entre L e ℓ em cada um dos modelos (atrito sólido ou resistência de fluido). As duas sugestões conduzem a uma lei de potência da forma $L \sim \ell^\alpha$ em que o expoente α toma dois valores diferentes.

- | | | |
|------------|---|-------|
| B.5 | Para os modelos 1 e 2, indique a relação entre L e ℓ e o valor de α . | 0.6pt |
|------------|---|-------|

Experiment



Q2-8

European Portuguese (Portugal)

Coloque a caixa de madeira **(j)** sobre uma folha de papel. Encha a caixa com areia e prepare uma camada uniforme, alisando cuidadosamente a borda com a régua. Evite compactar a areia! Ajuste de novo cuidadosamente o ângulo do carril para $\theta = 5^\circ$. Solte a esfera 4 ($d_4 = 16.0\text{mm}$) na calha inclinada, de modo a que a distância percorrida na calha seja $l = 50\text{cm}$.

*Antes de cada experiência, remexa a areia, volte a encher a caixa e alise novamente a superfície. Limpe a areia da calha e da esfera com a escova **(i)**. No final da experiência, utilize a folha de papel como funil para voltar a colocar a areia em excesso na garrafa.*

B.6	Meça a distância L_{50} percorrida na areia até à paragem da esfera. Efetue várias medições (pelo menos 5) para determinar L_{50} , juntamente com a sua unidade e a sua incerteza.	0.8pt
------------	---	-------

B.7	Após várias medições para pelo menos 8 valores de ℓ (mantendo $\theta = 5^\circ$), represente num gráfico L em função de ℓ , incluindo barras de erro, e conclua qual modelo melhor descreve a força de arrasto T .	1.5pt
------------	--	-------

B.8	Com base no modelo escolhido, especifique o valor do coeficiente μ_{eff} ou k que caracteriza a força T .	0.2pt
------------	--	-------