

# Calor Específico. Lei de Boyle Mariotte.

Física II, 2025/2026

José Luís Argáin, Dário Passos

## 1 Calor específico

### 1.1 Problema proposto

Com base na conservação da energia em sistemas termodinâmicos pretende-se determinar o calor específico de diversos corpos metálicos.

### 1.2 Fundamento teórico

Sempre que dois sistemas, a diferentes temperaturas, são colocados dentro de um recipiente termicamente isolado (o calorímetro), ocorre transferência de energia, na forma de calor, do sistema a temperatura mais elevada para o sistema a temperatura mais baixa, até se atingir o equilíbrio térmico, i.e., até os sistemas atingirem a mesma temperatura, chamada temperatura de equilíbrio ( $T_{eq}$ ). A unidade normalmente usada em termodinâmica para medir a quantidade de calor transferido é a caloria (cal), que corresponde à quantidade de energia necessária para aumentar a temperatura de um grama de água de  $14,5^{\circ}\text{C}$  para  $15,5^{\circ}\text{C}$ . Esta definição pode ser generalizada dizendo simplesmente que a caloria é a quantidade de energia necessária para elevar em 1 grau Celsius a temperatura de um grama de água. A unidade SI de energia é o joule;  $1\text{ J} = 1\text{ N}\cdot\text{m} = 1\text{ kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2$ . A caloria corresponde a 4,186 J.

O calor específico,  $c$ , é a quantidade de energia necessária para aumentar a temperatura de uma unidade de massa dessa substância em um grau. A unidade SI é  $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ , embora frequentemente seja também usada a unidade  $\text{cal}/(\text{g}^{\circ}\text{C})$ . O calor específico da água é  $1\text{ cal}/(\text{g}^{\circ}\text{C})$ . Considerando um corpo de massa  $m$  e de calor específico  $c$ , a quantidade de calor  $Q$ , necessária para variar a temperatura dessa substância em  $\Delta T$  (calor sensível), é dado por:

$$Q = mc\Delta T. \quad (1)$$

Deve referir-se que nos processos de transição de fase a temperatura permanece constante e por isso a expressão anterior não pode ser usada. Nesse caso o calor trocado é dado por:

$$Q = LT_{tf}. \quad (2)$$

em que  $L$  e  $T_{tf}$  representam o calor latente e a temperatura de transição de fase. Por exemplo à pressão atmosférica padrão ( $p_0=101325\text{ Pa}$ ) a água ferve a  $T_{tf}=100^{\circ}\text{C}$ .

O calor específico é uma propriedade que depende da temperatura, especialmente em materiais como sólidos. No entanto, para metais, essa variação é relativamente pequena para variações de

temperaturas entre 0°C e 100°C. Como esse é, precisamente, o intervalo considerado neste trabalho, considerar-se-á que  $c$  não depende de  $T$ . Para temperaturas muito altas (acima de várias centenas de graus Celsius), a dependência de  $c$  pode ser considerável.

A conservação de energia e a condição de equilíbrio térmico entre dois corpos,  $A$  e  $B$ , com temperaturas iniciais  $T_A$  e  $T_B$ , respetivamente, com  $T_A > T_B$ , os quais, quando colocados em contacto, atinjam a temperatura de equilíbrio,  $T_e$ , diz-nos que, o calor cedido pelo corpo  $A$  ( $Q_A$ ) será igual, em módulo, ao calor ganho pelo corpo  $B$  ( $Q_B$ ), isto é,

$$-Q_A = Q_B. \quad (3)$$

Note que, por convenção o calor absorvido por um corpo é positivo e vice-versa.

Combinando as expressões (1) e (3) temos que,

$$m_A c_A (T_A - T_{eq}) = -m_B c_B (T_B - T_{eq}). \quad (4)$$

Se um corpo metálico de massa  $m_c$  e calor específico  $c_c$  é colocado no *beaker* com água a ferver, à temperatura de ebulição  $T_{eb}=100^\circ$ , depois de um certo tempo verificar-se-á que  $T_c = T_{eb}$ . Se, seguidamente, esse corpo for imerso num calorímetro que contém água fria (com massa  $m_{ag}$  e calor específico  $c_{ag}$ ) à temperatura  $T_{ag}$ , decorrido algum tempo o sistema atinge a temperatura de equilíbrio  $T_{eq}$ . Conhecendo  $c_{ag}$  e medindo  $m_A$ ,  $m_B$ ,  $T_{eb}$  e  $T_{eq}$ , podemos, mediante a equação anterior, determinar  $c_c$ . Esta é a metodologia que será usada nesta experiência, para determinar o calor específico dos corpos de metal.

### 1.3 Material

Material: balança digital, placa de aquecimento, *beaker* de 1 litro, termómetro analógico, água da torneira, gelo picado, fio, corpos metálicos de ferro, alumínio e latão.

### 1.4 Precauções

Este trabalho envolve o uso de água e corpos metálicos a temperaturas que rondam os 100°C. Portanto, o manuseamento do material quente deve ser feito com extremo cuidado. Deve ter em conta que o vidro do *beaker* pode quebrar se for sujeito a mudanças bruscas de temperatura. Isto pode provocar queimaduras graves.

### 1.5 Procedimento experimental

1. Anote os erros de leitura de todos os instrumentos de medida que usar;
2. Meça a massa de um dos corpos,  $m_c$  e suspenda-o, com um fio, no interior do *beaker* com água a ferver, de modo que este não toque no fundo. Deve esperar não menos de 5 min para se verificar que  $T_c = T_{eb}$ ;
3. Determine a massa do calorímetro vazio ( $m_{cal}$ ). O calorímetro deve estar bem seco. Encha o calorímetro até meio, misturando água da torneira com gelo. Use água suficiente de forma a conseguir imergir completamente o corpo. Pese o calorímetro com água por forma a determinar a massa da água,  $m_{ag}$ .
4. Registe a temperatura da água fria,  $T_{ag}$ . Assegure-se que esta não contém pedaços de gelo;

5. Imediatamente a seguir, registre a temperatura da água quente,  $T_{eb}$ , que se supõe ser igual à do corpo (note que esta pode não ser exatamente 100°C). Retire rapidamente o corpo da água a ferver, sacuda-o para fazer cair as gotas mais grossas, e mergulhe-o na água fria do calorímetro. O corpo deve ficar completamente imerso, sem tocar no calorímetro;
6. Agite a água com o termómetro e registre a temperatura mais elevada observada,  $T_{eq}$ ;
7. Usando a Eq. (4) determine  $c_c$ ;
8. Repita os 3 pontos anteriores mais duas vezes, de modo a obter três valores de  $c_c$ . Tome o valor final de  $c_c$  como a média destes valores;
9. Repita todo o procedimento anterior para os restantes dois corpos.

## 1.6 Análise dos resultados obtidos

Os calores específicos de referência do ferro, do alumínio e do latão são,  $c_{Fe}=0.11 \text{ cal/(g}^\circ\text{)}$ ,  $c_{Al}=0.21 \text{ cal/(g}^\circ\text{)}$ ,  $c_{La}=0.09 \text{ cal/(g}^\circ\text{)}$ , respetivamente. O calor específico da água é  $c_{ag}=1.00 \text{ cal/(g}^\circ\text{)}$ .

1. Compare os valores de  $c_c$  obtidos nesta experiência com os valores de referência.
2. Discuta os resultados e retire conclusões.

Note que não consideramos a propagação dos erros de leitura da massa e da temperatura no cálculo de  $c_c$ . Mesmo desprezando o erro de  $c_{ag}$  ( $\delta c_{ag}$ ), os cálculos para a obtenção de  $\delta c_c$  envolvem alguma complexidade. Por este motivo estes não são exigidos nesta experiência.

## 2 Lei de Boyle Mariotte

Um tubo de vidro longo disposto verticalmente, com escala de valores de volume que aumenta de cima para baixo, contém ar e água. O tubo encontra-se ligado na parte de baixo a um recipiente com uma válvula e uma seringa que permite controlar a quantidade de água no tubo. Ao injetarmos mais água no tubo, o ar é comprimido, diminuindo assim o seu volume. O recipiente com válvula está equipado com um manómetro que permite medir a pressão no sistema. Usando esta montagem, pode verificar-se que, em concordância com a Lei de Boyle-Mariotte, a pressão de um gás ideal (neste caso o ar) é inversamente proporcional ao seu volume.

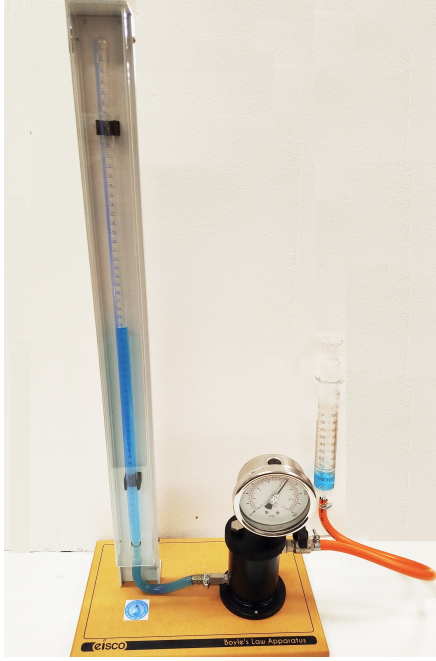
### 2.1 Fundamento teórico

Nos finais do século XVII foi descoberto, experimentalmente e de maneira independente, pelos físicos Edme Mariotte (1620-1684) e Robert Boyle (1627-1691) que, para uma dada massa de gás, mantida a temperatura constante, a pressão varia inversamente com o volume. Noutras palavras, para  $T = \text{constante}$  verifica-se que:

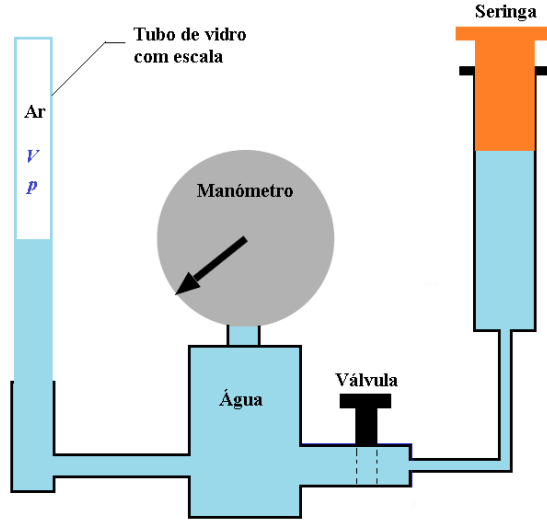
$$p \sim V^{-1} . \quad (5)$$

Esta afirmação é conhecida hoje em dia como *Lei de Boyle-Mariotte*, e pode ser reformulada em termos da equação de estado do gás ideal, segundo a qual

$$pV = nRT, \quad (6)$$



(a)



(b)

Figura 1: a) Instalação experimental para a verificação da *Lei de Boyle-Mariotte*. b) Esquema da instalação experimental.

em que  $n$  corresponde ao número de moles (que é proporcional à massa do gás) e  $R$  representa a constante universal dos gases,  $R = 8,314472 \text{ J.mol/K}$ . A condição  $T = \text{constante}$  implica que  $pV = \text{const.}$  Num diagrama de pressão vs. volume, a curva ao longo da qual a temperatura é constante, denomina-se *isoterma*.

Mantendo  $n$  e  $T$  constantes, podemos escrever a *Lei de Boyle-Mariotte*, usando a expressão (6), na forma:

$$p = \underbrace{nRT}_{\text{const.}} \frac{1}{V} \quad (7)$$

É conveniente escrever a expressão anterior na forma equivalente à de uma reta,  $y = ax + b$ , i.e.,

$$\underbrace{p}_y = \underbrace{nRT}_{a_t} \underbrace{\frac{1}{V}}_x + \underbrace{0}_{b_t}, \quad (8)$$

em que o índice "t" refere-se a valores teóricos (ou valores esperados).

## 2.2 Problema proposto

Pretende-se verificar a *Lei de Boyle-Mariotte* através da medição, a temperatura constante (temperatura ambiente), de um conjunto de pontos  $(p, V)$ , de uma certa massa de gás ( $n = \text{const.}$ ). Seguidamente, construir-se-á um gráfico de  $p$  em função de  $1/V$  o qual, em concordância com a expressão (7), deverá ser linear. Conhecendo  $n$  e  $T$ , a veracidade dos resultados experimentais aferir-se-á por comparação do declive da reta experimental com o valor esperado,  $nRT$ .



(a)



(b)

Figura 2: a) Manómetro para medir a pressão com escalas em psi e Pa. b) Válvula para controlar a saída de água.

## 2.3 Material

- Instalação experimental (ver figuras 1 e 2);
- termómetro analógico.

## 2.4 Procedimento experimental

1. Anote os erros de leitura da escala do tubo ( $\delta V_L$ ), do termómetro ( $\delta T_L$ ) e da escala do manómetro ( $\delta p_L$ ). No manómetro use a escala em Pa. A escala mínima do tubo é 1 cl (centilitro);
2. Meça a temperatura ambiente,  $T_{amb}$ . Nos cálculos a temperatura deverá estar em K de modo que, ao valor medido em  $^{\circ}\text{C}$ , deve adicionar 273,15 K;
3. Abra a válvula;
4. Com a seringa injete água no depósito, de maneira a fazer subir o nível do líquido tanto quanto possível (ver Fig.2). Quando o nível máximo possível for alcançado, feche a válvula rapidamente e tome nota dos valores de  $p$  e  $V$  ( $p$  em Pa e  $V$  em cl). ;
5. Aguarde 1 minuto até que a temperatura do ar no interior do cilindro, fique aproximadamente igual à temperatura ambiente<sup>1</sup>
6. Devagar, abra ligeiramente a válvula e liberte um pouco de pressão no sistema. O volume do gás irá aumentar e a pressão no manómetro diminuir. Faça a leitura desses valores e volte a repetir o processo várias vezes (ex. a cada 2 ou 3 cl de aumento no volume).

<sup>1</sup>Quando a compressão inicial, até o menor volume possível, é feita de modo relativamente abrupto, pode-se considerar que o processo é quase adiabático (quase sem trocas de calor). Nesse caso poderá registrar-se um ligeiro aumento de temperatura do ar no interior do tubo. Em princípio, esta variação é desprezável.

## 2.5 Análise dos resultados obtidos

1. Construa um gráfico de  $p$  em função de  $1/V$  ( $V$  em  $\text{m}^3$ ) e ajuste uma reta de regressão linear ( $y = ax + b$ ) ao gráfico, calculando o declive,  $a$ , a ordenada na origem,  $b$ , e os seus respetivos erros,  $\delta a$  e  $\delta b$  (deve verificar-se que  $\delta a/a \ll 1$ ). Para isto, recomenda-se usar a função `proj.lin` do *software* Excel (ver seção 4.3 da sebenta "Fundamentos de Análise de Dados", na tutoria eletrónica). Note que o *software* Excel está acessível a todos os alunos da UAlg, no pacote Microsoft Office 365;
2. Calcule o número de moles,  $n$ , usando a expressão (6)), tomando  $V$  igual ao volume mínimo de ar que registou no tubo de vidro ( $V_0$ ),  $p$  igual à pressão correspondente a esse valor de  $V$  ( $p_0$ ) e  $T = T_{amb}$ ,

$$n = \frac{p_0 V_0}{RT_{amb}}; \quad (9)$$

3. Calcule o valor esperado do declive (ver eq. (8)):

$$a_t = nRT_{amb}, \quad (10)$$

4. Verifique se  $a_t \in [a - \delta a, a + \delta a]$ . Adicionalmente, determine o erro relativo percentual de  $a$ , em relação a  $a_t$ ;
5. Discuta os resultados e retire conclusões.

Note que no procedimento acima exposto, o erro que afeta  $a_t$  ( $\delta a_t$ ) é desprezado, mas na realidade, pode dar-se o caso em que  $\delta a_t$  e  $\delta a$  podem ter valores comparáveis. Assumindo que  $R$  é dado com uma precisão elevada, o cálculo de  $n$ , através da equação (10), envolve grandezas que foram medidas com os mesmos instrumentos usados na experiência. Portanto, estas grandezas são afetadas pelos seus respetivos erros de leitura que, por sua vez, propagam-se ao cálculo de  $n$ . Como resultado, o valor de  $n$  é afetado pelo erro  $\delta n$ .

Questão opcional: Determine  $\delta a_t$  e verifique se é comparável a  $\delta a$  e comente.