

## Trabalho Prático

### COMPRESSÃO ADIABÁTICA DE GASES

**Objectivo** – Mostrar que  $P_1V_1^\gamma = P_2V_2^\gamma$  e  $T_1V_1^{(\gamma-1)} = T_2V_2^{(\gamma-1)}$ ; determinar o valor de  $\gamma$  e medir o trabalho realizado para comprimir adiabaticamente um gás.

#### 1. Introdução

Quando um processo termodinâmico se realiza de modo a não entrar ou sair energia térmica do sistema, designa-se por processo adiabático. Isto acontece na prática se o sistema for perfeitamente isolado do ponto de vista térmico ou se o processo ocorrer tão rapidamente que não há possibilidade de haver trocas de energia sob a forma de calor.

Considere-se um sistema constituído por  $n$  moles de um *gás ideal*, à pressão  $P$ , temperatura  $T$  e volume  $V$ , sujeito a um processo de compressão ou expansão adiabática. Nestas condições, a 1ª lei da Termodinâmica estabelece que:

$$\delta Q = nC_V dT + PdV = 0 \quad (1)$$

onde  $C_V$  é a capacidade térmica do gás, a volume constante e  $\delta Q$  é a quantidade de energia trocada sob a forma de calor. Como  $PV = nRT$  para um gás ideal, onde  $R$  é a constante universal dos gases ( $8.413 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ) podemos escrever:

$$PdV + VdP = nRdT.$$

Resolvendo em ordem a  $dT$  vem:

$$dT = \frac{PdV}{nR} + \frac{VdP}{nR} \quad (2)$$

Substituindo (2) em (1) vem

$$\begin{aligned} \delta Q &= nC_V \left( \frac{PdV}{nR} + \frac{VdP}{nR} \right) + PdV \\ &= \left( \frac{C_V}{R} + 1 \right) PdV + \frac{C_V}{R} VdP = 0 \\ &\Leftrightarrow (C_V + R)PdV + C_V VdP = 0 \\ &\Leftrightarrow C_p PdV + C_V VdP = 0 \end{aligned}$$

onde  $C_p$  é a capacidade térmica do gás a pressão constante, relacionada com  $C_V$  por  $C_p - C_V = R$ . A razão entre  $C_p$  e  $C_V$  é conhecida por coeficiente adiabático,  $\gamma$ . Usando esta relação e integrando:

$$\begin{aligned} \frac{C_p PdV}{C_V PV} + \frac{dP}{P} &= 0 \\ \gamma \frac{dV}{V} + \frac{dP}{P} &= 0 \\ \gamma \ln V + \ln P &= \text{constante} \end{aligned}$$

$$PV^\gamma = \text{constante}$$

$$P_1V_1^\gamma = P_2V_2^\gamma \quad (3).$$

Esta é a lei adiabática dos gases ideais que se pode escrever também na forma:

$$T_1V_1^{(\gamma-1)} = T_2V_2^{(\gamma-1)}. \quad (4)$$

Por outro lado, de

$$PV^\gamma = k = P_1V_1^\gamma \text{ ou } P = \frac{k}{V^\gamma},$$

vem:

$$W = \int_{V_1}^{V_2} PdV = k \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V^\gamma} = k \left[ \frac{V^{(1-\gamma)}}{1-\gamma} \right]_{V_1}^{V_2} = (P_1V_1^\gamma) \left[ \frac{V^{(1-\gamma)}}{1-\gamma} \right]_{V_1}^{V_2}$$

$$W = \frac{P_1V_1^\gamma}{1-\gamma} (V_2^{(1-\gamma)} - V_1^{(1-\gamma)}), \quad (5)$$

que corresponde ao trabalho realizado sobre o gás para o comprimir adiabaticamente.

## 2. Montagem experimental

### Material

Sistema Pasco TD-8565, gases monoatômicos, diatômicos e poliatômicos, interface CI-6560, computador e fonte de tensão.

### Descrição do Sistema Pasco TD-8565

As figuras 1 e 2 representam uma fotografia e desenhos esquemáticos do todo e de parte desse sistema. A pressão, a temperatura e o volume do gás são medidos quase simultaneamente por transdutores sensíveis, quer quando o gás é expandido ou comprimido muito rapidamente, portanto sob condições quase adiabáticas, quer quando a variação de volume é muito lenta, logo sob condições praticamente isotérmicas.

O pistão (a) (fig. 2), feito de plástico acetal, é deslocado manualmente para baixo e para cima num cilindro acrílico (b), que é preenchido por qualquer gás (monoatômico - como Argon, diatômico - como ar ou Azoto, triatômico - como dióxido de carbono, ou outros gases poliatômicos) que entram e saem por duas válvulas em latão (c). Junto do pistão está um divisor potencial linear (d) para monitorizar a sua posição. Uma tensão de 5V é aplicada ao potenciômetro e a posição do divisor (e) serve para indicar a posição do pistão e, portanto, o volume ocupado pelo gás.

A base acetal (f) que sela a base do cilindro, é a zona onde estão montados os outros dois transdutores. Na superfície de baixo está o sensor de pressão, um sistema piezo-resistivo. Na parte de cima, dentro do cilindro, está montado o sensor de temperatura (g). Este elemento consiste de um fio extremamente fino de níquel, com um elevado coeficiente de dilatação térmica e cuja razão entre superfície e volume permite que a temperatura varie rapidamente quando o gás é comprimido ou expandido.

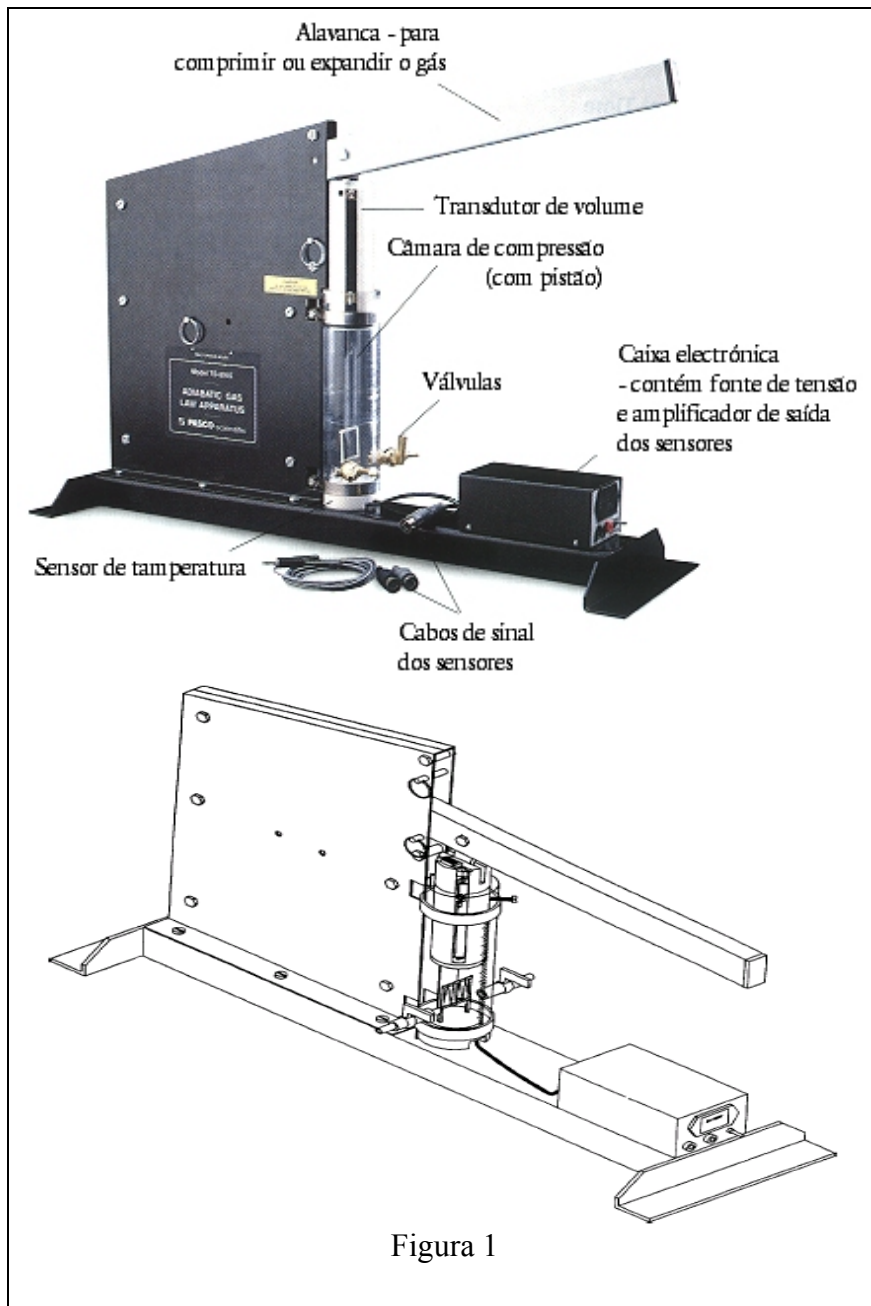


Figura 1

O sistema é ainda constituído por um circuito electrónico que compreende duas tensões de alimentação e amplificadores cujos sinais de saída são tensões analógicas proporcionais à pressão e à temperatura lida pelos transdutores respectivos. A alimentação do circuito é feita por uma fonte de alimentação de cerca de 10 V DC ou por uma pilha de 9 V.

Uma escala milimétrica transparente, (h), na parte da frente do cilindro, facilita medidas directas da posição inicial e final do pistão. Dois pinos metálicos que se podem remover (i) permitem variar as posições limites do pistão e, portanto, os volumes em causa. Na parte lateral esquerda, mais ou menos ao centro, existem dois orifícios para guardar esses pinos quando não estão a ser usados.

Como se pode verificar na figura 3, os tempos de resposta dos transdutores de pressão e volume são desprezáveis. Contudo, a inércia térmica inevitável do sensor de temperatura faz com que a medida de temperatura se atrase cerca de 30 a 50 ms, relativamente às medidas de pressão e volume.

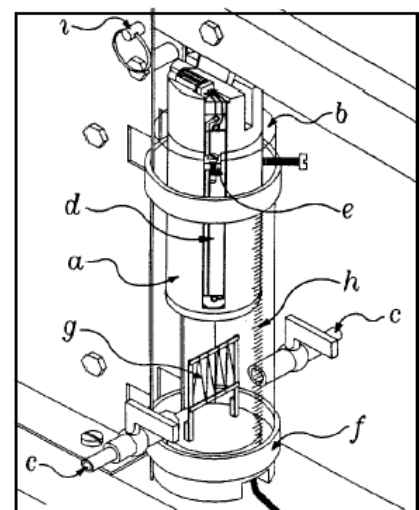


Figura 2

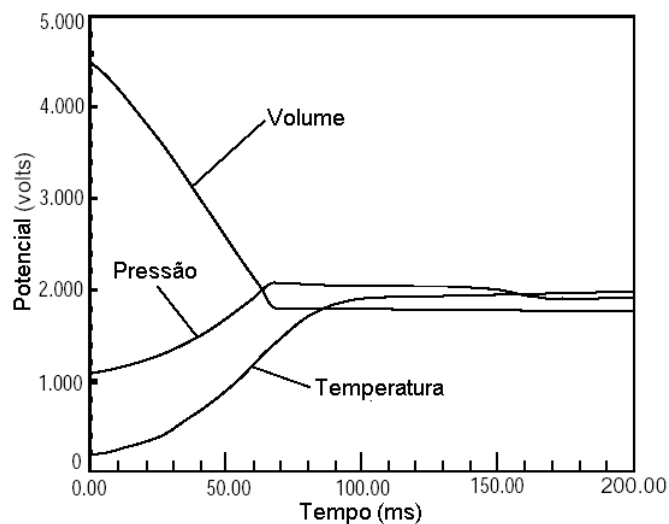


Figura 3

A informação disponibilizada pelo fabricante sobre o aparelho e calibração dos seus sensores é a seguinte:

① Sensor de Pressão – a calibração é tal que a 1.00 V de tensão de saída correspondem 100 kPa de pressão absoluta.

② Sensor de Temperatura – a equação de calibração é:  $T(K) = 34.295V_T + 296.24$ , onde  $V_T$  é a tensão lida à saída do sensor de temperatura. Como alternativa, são fornecidos 3 pares de pontos de calibração ( $V, T$ ): (3.079, 401.00), (1.306, 343.00) e (0.004287, 295.25).

③ Sensor de Posição – para alguns dos cálculos apenas são necessários os volumes inicial e final, o que se pode fazer por leitura directa na escala milimétrica da parte da frente do cilindro. O diâmetro do cilindro é de 4,452 cm. Como em muitos casos o que se determina são razões entre volumes, apenas o conhecimento dos deslocamentos é necessário para os cálculos.

**NOTA – Um pequeno erro na determinação do volume provém do fecho e abertura das válvulas. Adicione 1 cm<sup>3</sup> a todas as medidas de volume ou 0,06 cm aos deslocamentos do pistão.**

### 3. Procedimento experimental

3.1 – Selecione o gás a comprimir (comece pelo ar).

3.2 – Se mudar de gás, proceda à limpeza do sistema do seguinte modo:

a) Ligue a garrafa de gás a uma das torneiras de entrada de gás.

Nota – A pressão deve ser inferior a 35 kPa. Deste modo previnem-se danos no cilindro e na alimentação do sensor de temperatura.

b) Retire os pinos que limitam o movimento do pistão de modo a que o intervalo de volumes possíveis seja máximo (aproximadamente entre 16 e 6).

c) Com o pistão em baixo e a segunda torneira de gás fechada, encha todo o volume com o gás.

d) Depois, feche a torneira de entrada de gás e abra a torneira de saída. Segure a alavanca para que o pistão não caia abruptamente.

e) Feche a válvula de saída e volte a encher o volume de gás.

Repita este procedimento pelo menos mais 9 vezes, terminando com o volume cheio de gás.

- 3.3 – Feche a outra válvula de gás antes de iniciar a experiência. Se se escapar algum gás durante a experiência, adicione mais gás até preencher o volume disponível.
- 3.4 – O sistema é alimentado por uma fonte de tensão externa. Verifique que essa opção de alimentação está correctamente seleccionada na caixa electrónica acoplada ao sistema.
- 3.5 – Ligue os terminais dos cabos de ligação com ficha tipo “mini-phone” à parte de trás da caixa electrónica, onde existem as saídas dos sensores de temperatura e pressão.
- 3.6 – Ligue os outros terminais (ficha DIN) dos mesmos cabos, bem como o terminal do sensor de posição do pistão (divisor potencial linear) que está permanentemente ligado à base do cilindro, às entradas analógicas A, B e C da interface CI-6560: A-volume; B-temperatura; C-pressão.
- 3.7 – Verifique a ligação da fonte de alimentação externa à caixa de electrónica, ligue a fonte de tensão e selecione uma tensão de 9V.
- 3.8 – Coloque os pinos que limitam o deslocamento do pistão nas posições seleccionadas de modo a obter-se a compressão desejada. (Note que os melhores resultados experimentais não são obtidos, em geral, com o deslocamento máximo possível.)

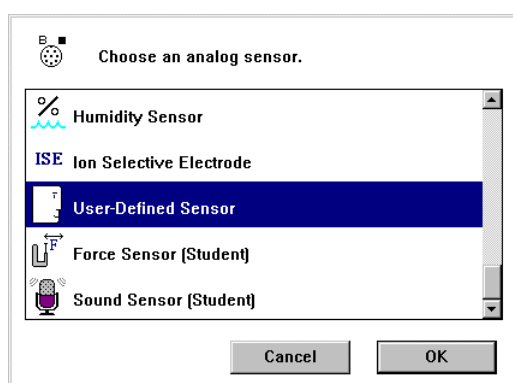


Figura 4

3.9 – Ligue a interface CI-6560 e o computador. Abra o programa *Science Workshop* e configure as 3 entradas A, B e C com sensores definidos pelo utilizador (User-Defined Sensor – fig. 4).

3.10 – É agora necessário calibrar cada um dos sensores. Proceda do seguinte modo:

Abra o menu de calibração do *sensor de posição* (fig. 5). Segure o pistão numa posição mais alta do que a que utilizará na experiência ( $\approx 15$  cm, por exemplo), introduza o valor dessa posição em

metros e selecione “Read” quando a leitura estabilizar. Depois ponha o pistão numa posição baixa (por exemplo, 9 cm) e proceda de modo semelhante.

Abra o menu de calibração do *sensor de temperatura* (fig. 6): use dois dos três pontos de calibração fornecidos pelo fabricante. (Não click em “Read”; depois de introduzir os pontos faça simplesmente “Ok”.

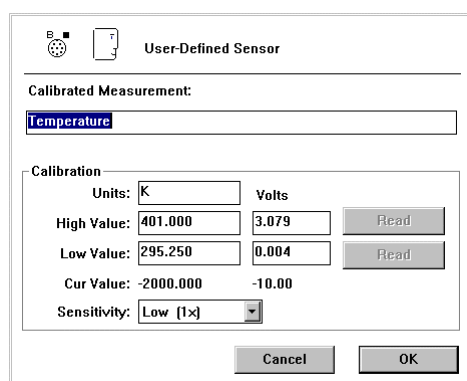


Figura 6

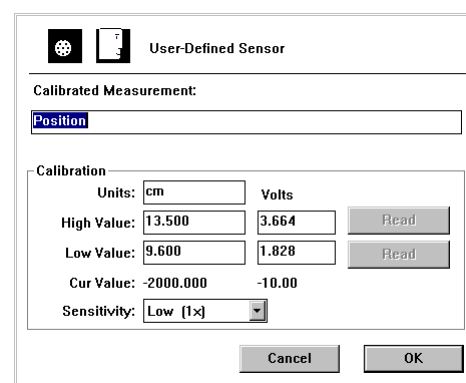


Figura 5

Abra o menu de calibração do *sensor de pressão* (fig. 7): a pressão em kPa é 100 vezes a tensão do aparelho. Introduza o valor em kPa que corresponde a

cada valor de tensão apresentado e faça “Ok” sem seleccionar “Read”.

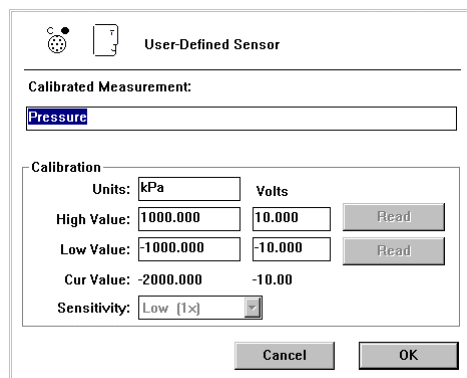


Figura 7

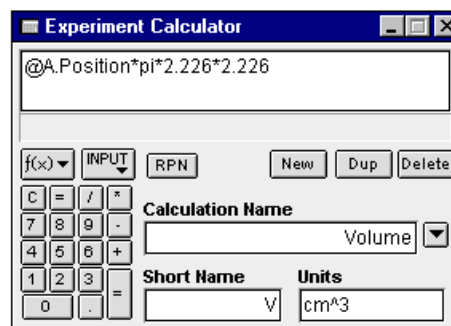


Figura 8

3.11 – Volte ao menu principal, abra as “Sampling Options” e seleccione uma frequência de leitura de 100 Hz.

3.12 – Prepare o tratamento que pretende dar aos dados. Comece por fazer corresponder a posição do pistão a um dado volume utilizando o recurso de máquina de calcular do programa (fig. 8), introduzindo, através da tecla “INPUT”, o sinal do sensor adequado. Escreva a fórmula do cálculo do volume, dê-lhe um nome, bem como à grandeza calculada e escolha as unidades. No fim, carregue em “Enter” para guardar o cálculo.

Faça “New” na mesma opção de calculadora e prepare o cálculo do logaritmo dos dados da pressão e do volume.

3.13 – Prepare o gráfico:  $\log P(\log V)$ , bem como uma tabela com as três colunas de dados (V, T, P).

3.14 – Finalmente, seleccione “Start”, realize a compressão do gás e pare a acumulação de dados.

#### 4. Tratamento de dados

4.1 – A partir do gráfico de  $\log P$  em função de  $\log V$ , seleccione os dados experimentais que lhe pareçam mais correctos e determine  $\gamma$ . Comente o valor obtido tendo em conta os seguintes dados tabelados para o ar seco:  $C_p = 1005 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ,  $C_v = 718 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ .

4.2 – Represente graficamente  $P(V)$  e realize uma integração numérica entre os extremos dos dados que lhe pareçam mais correctos, a fim de determinar o trabalho realizado sobre o gás durante o processo adiabático. A partir da eq. (5), determine o valor esperado do trabalho realizado e compare-o com o valor medido. Nota: pode utilizar a função gráfica de localização de pontos para conhecer as coordenadas dos pontos extremos da integração.

4.3 – Utilize o valor inicial da pressão e volume usados na alínea anterior e procure na tabela o valor correspondente da temperatura. Use também o valor do volume final da alínea anterior. Recorrendo às equações (3) e (4) da secção introdutória, determine a temperatura e pressão esperadas pela lei adiabática dos gases. Compare com os valores experimentais e comente.