

Relatório de Física Experimental III
2004/2005

Engenharia Física Tecnológica

COMPRESSÃO DO GÁS

Estudo da Compressão Adiabática e Isotérmica de Gases

Trabalho realizado por:
Ricardo Figueira, nº53755;
André Cunha, nº53757
Tiago Marques, nº53775

Grupo 1; 3ªfeira 16-20h

Lisboa, 3 de Maio de 2005

Este trabalho surge no âmbito do estudo das propriedades termodinâmicas de processos teoricamente reversíveis: uma compressão adiabática e uma compressão e isotérmica aplicadas a um gás, que neste caso irá ser o ar.

Antes de se explicitar os processos atrás referidos é conveniente definir a imposição teórica alicercial deste trabalho: o Modelo dos Gases Perfeitos.

Este modelo meramente teórico assenta-se nos seguintes postulados:

- Os gases são compostos por moléculas em movimento constante e aleatório, que colidem elasticamente entre si e com as paredes do recipiente.
- O volume total de moléculas é desprezável quando comparado com o volume do recipiente pelo que cada uma delas tem volume nulo, ou seja, é apenas uma partícula pontual.
- As forças de atracção intermoleculares são desprezáveis.

Desta forma, para o estudo de um gás ideal, dada a inexistência de forças intermoleculares, irá ter-se apenas em conta a energia cinética das partículas de gás nos diferentes graus de liberdade (rotacional, vibracional, translacional). A média destas energias é aquilo que macroscopicamente conhecemos por temperatura.

Assim, estabelecendo estas limitações obtemos a chamada Equação dos Gases Perfeitos:

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T,$$

onde o produto da pressão P pelo volume V é igual ao produto do número de moléculas (em mol) pela constante universal dos gases perfeitos R e pela única forma de energia relevante para um gás perfeito, a sua temperatura T (todas as propriedades termodinâmicas presentes na equação são relativas ao gás ideal em estudo) e como se pode demonstrar trivialmente, esta equação é a unificação das leis dos gases de Boyle-Mariotte e de Charles e Gay-Lussac, baptizadas com o nome dos seus descobridores, obtidas experimentalmente entre os séculos XVII e XIX.

Naturalmente, os gases reais não correspondem à descrição anterior, no entanto, o modelo dos gases perfeitos oferece muitas vezes uma boa aproximação à realidade em estudos macroscópicos.

A Equação dos Gases Perfeitos pode ser também obtida teoricamente através da teoria cinética dos gases em consonância com a mecânica estatística, que permitem o estudo de um gás através da análise estatística das suas propriedades moleculares possibilitando assim o estudo das suas propriedades macroscópicas e consequente dedução da relação. Desta forma a equação pode ser escrita de uma forma alternativa:

$$P \cdot V = N \cdot k \cdot T,$$

onde k é a constante de Boltzmann,

$$k = \frac{R}{N_a},$$

N o número de partículas,

$$N = n \cdot N_a,$$

onde N_a é o número de Avogadro.

Para perceber a possibilidade de reversibilidade, é necessário ainda introduzir aqui um aparte, para a Lei da Conservação da Energia, também conhecida por primeira Lei da Termodinâmica. Visto que o sistema troca com o exterior energia mecânica e energia térmica, pela primeira lei da termodinâmica temos que:

$$\Delta U = Q - W \quad \text{ou} \quad dU = \delta Q - \delta W,$$

em que Q e W se referem, respectivamente, ao calor recebido pelo sistema e ao trabalho que o sistema vai exercer no exterior.

Torna-se então conveniente definir os dois processos de transferência de energia existentes neste processo, o calor – energia térmica transferida entre sistemas a temperaturas diferentes, e o trabalho – energia transferida ao aplicar uma força durante um deslocamento.

No primeiro caso, temos então a necessidade de introduzir a grandeza chamada capacidade calorífica, ou seja, a quantidade de calor necessária para aumentar a temperatura de uma dada substância em um grau. Dada a inadequação desta grandeza para o estudo em questão, reintroduz-se então esta grandeza em relação ao número de moléculas presentes, temos então o calor específico molar:

$$C = \frac{1}{n} \cdot \frac{\Delta Q}{\Delta T}.$$

No segundo caso o trabalho efectuado por uma força ao longo de um deslocamento infinitesimal é dado por:

$$\delta W = \vec{F} \cdot \vec{ds}.$$

Desta forma, o trabalho total realizado pela força no deslocamento de A para B vai ser dado por:

$$W = \int_{AB} \vec{F} \cdot \vec{ds}.$$

No caso em estudo pode-se considerar que se atingiram condições de quase-reversibilidade quando a diferença entre a pressão exercida exteriormente sobre o embolo e do interior sobre o mesmo tende para zero.

Desta forma, a transformação pode ser interpretada como uma sucessão de variações infinitesimais de volume em que a pressão interior e exterior são iguais dada por:

$$dV = A \cdot ds$$

em que A é a área da secção do tubo.

Assim sendo, em todo o instante da transformação reversível tem-se que:

$$F = P \cdot A$$

e por conseguinte

$$W = \int_{V_i}^{V_f} P dV.$$

Como já foi referido anteriormente, num gás perfeito considera-se que a energia interna corresponde apenas à energia térmica que por sua vez depende dos graus de liberdade considerados. Como o gás usado, o ar, tem 4 partes de azoto para 1 de oxigénio, pode-se considerar como um gás perfeito diatómico e a temperaturas moderadas para este modelo tem-se que:

$$C = \frac{5}{2} \cdot n \cdot R \cdot T.$$

Desta forma, numa transformação em que não haja trabalho, ou seja, sem variação de volume temos, relacionando a primeira lei da termodinâmica com o calor específico molar:

$$C_V = \frac{1}{n} \cdot \left(\frac{\Delta U}{\Delta T} \right)_{V=const}.$$

E logo, a partir da expressão do calor para gases diatómicos tem-se que:

$$C_V = \frac{5}{2} \cdot R.$$

Por fim, agora pode-se calcular o calor específico a pressão constante através de:

$$C_p = C_V + R.$$

E finalmente, pode-se definir as transformações isotérmica e adiabática.

Numa transformação isotérmica, como o próprio nome indica, consiste numa transformação realizada a temperatura constante. Isto acontece tipicamente quando sistema está em contacto com um “reservatório térmico” exterior, e o sistema muda lentamente permitindo assim o ajustamento da temperatura do sistema à temperatura exterior. Dado que a energia interna depende somente da temperatura, e esta permanece constante então mais uma vez pela primeira lei da termodinâmica:

$$\delta Q = \delta W = P dV,$$

que basicamente significa que durante a transformação isotérmica toda a energia térmica partilhada entre o sistema e o exterior volta a ser partilhada de forma inversa sob a forma de trabalho. Tem-se então:

$$\Delta Q = \Delta W = \int_{V_i}^{V_f} n \cdot R \cdot T \cdot \frac{dV}{V}$$

Donde:

$$\Delta Q = \Delta W = n \cdot R \cdot T \cdot \ln\left(\frac{V_f}{V_i}\right).$$

Numa transformação adiabática, é um processo onde nenhum calor é ganho ou perdido durante a compressão, no caso considerado não há trocas de calor com o exterior durante a compressão e a expansão. Aliás, o termo “adiabático” basicamente descreve algo como sendo impermeável a trocas de calor. Logo neste tipo de transformação ao contrário do que acontece nas transformações isotérmicas, a compressão ou a expansão é de tal forma rápida que não permite ao sistema realizar trocas de calor com o exterior sendo em condições ideais, instantânea. Tendo em conta descrição anterior e dado que a energia interna depende apenas da temperatura do sistema tem-se que

$$\delta Q = nC_v dT + PdV \quad \text{e} \quad \delta Q = 0.$$

A partir destas duas relações obtém-se aplicando a equação de estado dos gases perfeitos verifica-se

$$nC_v dT = -PdV = -nRT \frac{dV}{V}$$

$$\frac{dT}{T} + \frac{R}{C_v} \cdot \frac{dV}{V} = 0$$

$$\ln T + \frac{R}{C_v} \ln V = k_1$$

$$T \cdot V^{\frac{R}{C_v}} = k_2$$

$$PV^{\gamma = \frac{C_p}{C_v}} = k_3,$$

em que $k_{\#}$ são constantes.

Nota: Para a transformação isotérmica, que foi explicada anteriormente, também se verifica

$$PV^{\gamma} = k_4$$

em que se pode ver facilmente através da equação dos gases perfeitos que

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T = k_4$$

que

$$PV^{\gamma=1} = k_4$$

com k_4 constante.

Retomando a transformação adiabática, a relação anterior significa que os valores da pressão e volume para dois estados do sistema durante a transformação verificam

$$P_1V_1^\gamma = P_2V_2^\gamma.$$

Para concluir o estudo deste tipo de transformação, o trabalho pode ser calculado de duas formas distintas. Como

$$\Delta W = \int_{V_i}^{V_f} PdV \quad \text{e} \quad PV^\gamma = P_iV_i^\gamma$$

tem-se

$$\Delta W = P_iV_i^\gamma \int_{V_i}^{V_f} \frac{dV}{V^\gamma}$$

ou seja

$$\Delta W = \frac{P_iV_i^\gamma}{1-\gamma} (V_f^{1-\gamma} - V_i^{1-\gamma}).$$

Por outro lado pela condição inicial de conservação de energia e pela expressão da energia interna de um gás perfeito diatômico obtém-se

$$-\Delta W = \Delta U = nC_v(T_f - T_i).$$

Possuem-se agora as condições teóricas necessárias para proceder experimentalmente.

Introdução Experimental

Nesta experiência pretende-se estudar uma compressão adiabática e uma isotérmica.

Para tal, recorreu-se a um aparato experimental que consiste basicamente num tubo compressor aliado a um sistema de aquisição de dados.

Tubo compressor

A amostra do gás que se pretende analisar é manipulada pelas torneiras na base do cilindro compressor. Este cilindro consiste num êmbolo que se desloca verticalmente, permitindo a variação do volume de gás contido no mesmo. Está munido de diversos sensores que permitem a medição simultânea da pressão, temperatura e volume da amostra.

O controlo directo sobre o êmbolo permite a elaboração de boas aproximações a uma transformações adiabática e isotérmica através de uma manipulação rápida no primeiro caso e lenta no segundo.

Convém considerar o facto da escala presente no cilindro, permitir a calibração dos sistemas de aquisição de dados, assim como o facto de que para compensar alguma quantidade de gás presente no interior das torneiras se deve adicionar 0.06 cm ao deslocamento considerado do êmbolo (informação dada pelo fabricante).

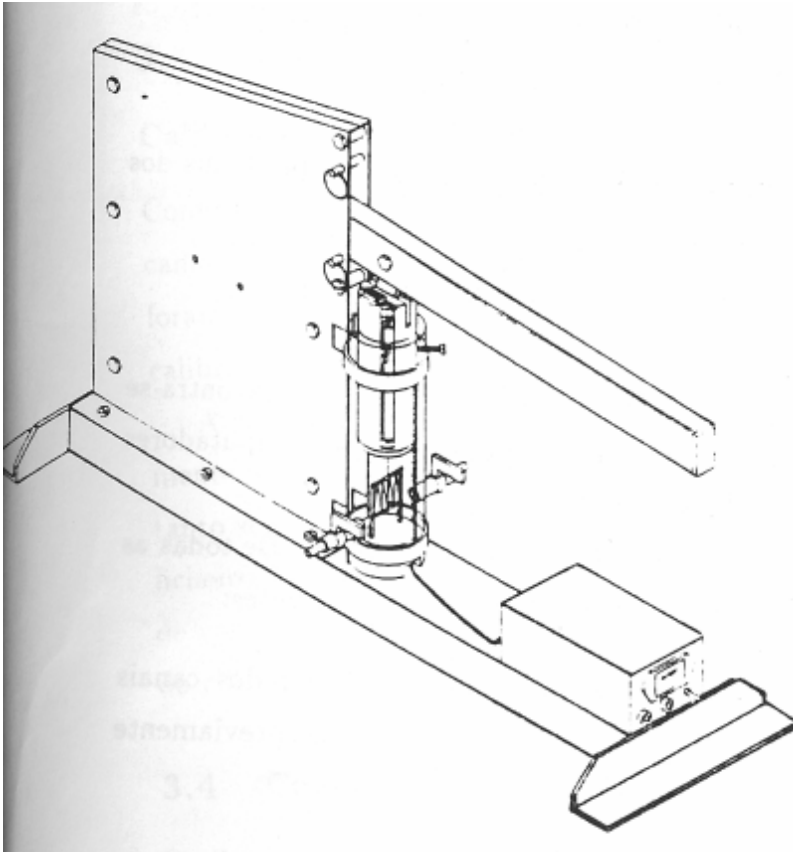


Figura 1: Tubo Compressor

Sistema de aquisição de dados

Os sensores presentes no equipamento estão ligados a um sistema de aquisição de dados ligado a um computador que dispõe do *software* apropriado para tratamento dos dados produzidos no decorrer do trabalho.

O computador usado tem disponíveis os programas *Data Monitor* para aquisição de dados, assim como seu tratamento e ainda um outro programa para simulação de um osciloscópio digital bem como o programa *LINLN*, que permite calcular logaritmos naturais e efectuar regressões lineares para determinar factores relevantes na experiência.

Procedimento Experimental

Antes da realização da experiência propriamente dita, foi necessário realizar uma calibração do volume, uma vez que as calibrações referentes à temperatura e pressão foram previamente efectuadas pelo fabricante.

A calibração é feita dentro do programa *Data Monitor*. Consistiu em associar a dois valores de tensão, medidos pelo sistema de aquisição de dados, dois valores de volume calculados a partir da leitura da altura na escala do cilindro.

$$V = \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 \cdot h;$$

Onde D é o diâmetro do cilindro, sendo este valor 4,409 cm (dado pelo fabricante).

Após realizada a calibração para o volume estudou-se uma compressão isotérmica do ar. Para tal, partindo-se de uma situação em que a pressão do ar é igual à pressão atmosférica, efectuou-se uma compressão o mais lentamente possível, de forma a permitir trocas de calor, para garantir que a temperatura no interior do cilindro varie o mínimo possível. Apesar da velocidade reduzida da compressão, deve garantir-se que o volume final não é superior a metade do volume inicial. A aquisição de dados foi feita utilizando o osciloscópio do programa na escala de tempo 1000 ms/DIV. Durante a compressão **verificou-se que a temperatura se manteve aproximadamente constante**. Leram-se os valores iniciais de volume (**Vi**), pressão (**Pi**) e temperatura (**Ti**), bem como os finais (**Vf**, **Pf**, **Tf**) e registaram-se na Tabela 1.

Análise de Resultados

Com base nos resultados experimentais da actividade, e partindo da equação dos gases perfeitos, determinou-se o número de moles de gás utilizado (Tabela 1):

$$n = \frac{P \cdot V}{R \cdot T};$$

$$\varepsilon_n = \left| \frac{R \cdot P \cdot V}{(R \cdot T)^2} \right| \cdot \varepsilon_T + \left| \frac{V}{R \cdot T} \right| \cdot \varepsilon_P + \left| \frac{P}{R \cdot T} \right| \cdot \varepsilon_V.$$

No programa, fez-se a representação gráfica de log(Pressão) em função de log(Volume), extraindo-se o valor de a , assim como o seu erro. Este valor é dado pelo simétrico do declive da recta. Este valor relaciona Pressão e Volume durante a compressão, da seguinte forma.

$$P \cdot V^\alpha = \text{const} .$$

Como a transformação em questão é teoricamente isotérmica, tem-se que o calor perdido para o exterior e o trabalho realizado sobre o sistema são iguais e são dados por (Tabela 2):

$$\Delta Q = \Delta W = \int_{V_i}^{V_f} P \cdot dV = n \cdot R \cdot T \cdot \ln\left(\frac{V_f}{V_i}\right);$$

$$\varepsilon_{\Delta Q} = \varepsilon_{\Delta W} = \left| R \cdot T \cdot \ln\left(\frac{V_f}{V_i}\right) \right| \cdot \varepsilon_n + \left| n \cdot R \cdot \ln\left(\frac{V_f}{V_i}\right) \right| \cdot \varepsilon_T + \left| \frac{1}{V_i} \cdot n \cdot R \cdot T \right| \cdot \varepsilon_{V_i} + \left| \frac{1}{V_f} \cdot n \cdot R \cdot T \right| \cdot \varepsilon_{V_f} .$$

Também se pode obter um valor para o trabalho através da integração numérica do diagrama PV, já que:

$$\Delta W = \int_{V_i}^{V_f} P \cdot dV .$$

Teoricamente, numa compressão isotérmica pura, a variação da energia interna do gás deveria ser zero, uma vez que $U = U(T)$. No entanto, tal não aconteceu experimentalmente, uma vez que a temperatura do gás variou ligeiramente. Desta forma a variação da energia do gás é dada por (Tabela 3):

$$\Delta U = n \cdot C_v \cdot (T_f - T_i);$$

$$\varepsilon_{\Delta U} = |C_v \cdot (T_f - T_i)| \cdot \varepsilon_n + |n \cdot C_v| \cdot \varepsilon_{T_f} + |n \cdot C_v| \cdot \varepsilon_{T_i} .$$

Com este valor de variação de energia interna, é possível estimar um novo valor para as trocas de calor do sistema com o exterior, partindo do Primeiro Princípio (Tabela 4):

$$\Delta Q = \Delta U + \Delta W ;$$

$$\varepsilon_{\Delta Q} = \varepsilon_{\Delta U} + \varepsilon_{\Delta W} .$$

Actividade 2

Procedimento Experimental

Nesta parte do trabalho, estudou-se uma compressão adiabática do ar. Realizou-se uma compressão, partindo de uma situação inicial idêntica à da actividade anterior, mas, desta vez, efectuou-se rapidamente. Desta forma, minimiza-se as perdas de calor através das paredes do cilindro garantindo-se uma compressão próxima da adiabática. Devido à maior rapidez da compressão, a aquisição de dados foi feita na escala de tempo de 10 ms/DIV. Novamente, mediram-se os valores iniciais de volume (**Vi**), pressão (**Pi**) e temperatura (**Ti**), bem como os finais (**Vf**, **Pf**, **Tf**) e registaram-se na Tabela 5.

Análise dos Resultados

Começou-se por calcular o número de moles do gás e a variação da energia interna (Tabelas 5 e 6, respectivamente) e determinar o coeficiente adiabático (γ), da mesma forma que na actividade anterior.

Se estivessemos perante uma transformação adiabática pura, teoricamente teríamos:

$$\Delta Q = 0;$$

Nestas condições, pelo Primeiro Princípio, o trabalho seria dado por (Tabela 6):

$$-\Delta W = \Delta U = n \cdot C_V \cdot (T_f - T_i);$$

$$\varepsilon_{\Delta W} = |C_V \cdot (T_f - T_i)| \cdot \varepsilon_n + |n \cdot C_V| \cdot \varepsilon_{T_f} + |n \cdot C_V| \cdot \varepsilon_{T_i}.$$

Ou, em função dos volumes e pressões por (Tabela 7):

$$\Delta W = \frac{P_i \cdot V_i^\gamma}{1 - \gamma} \cdot (V_f^{1-\gamma} - V_i^{1-\gamma});$$

$$\varepsilon_{\Delta W} = \left| \frac{V_f^{1-\gamma} \cdot V_i^\gamma - V_i^{1-\gamma}}{1 - \gamma} \right| \cdot \varepsilon_{P_i} + \left| \frac{P_i \cdot (V_i - \gamma \cdot V_f^{1-\gamma} \cdot V_i^\gamma)}{V_i \cdot (\gamma - 1)} \right| \cdot \varepsilon_{V_i} + |P_i \cdot V_f^{-\gamma} \cdot V_i^\gamma| \cdot \varepsilon_{V_f}.$$

Em alternativa, também se pode obter um valor para o trabalho pela integração numérica do diagrama PV.

Admitindo que as trocas de calor não são nulas e que seguem a seguinte condição:

$$dQ = -\beta \cdot n \cdot dT;$$

isto é, trocas de calor infinitesimais, directamente proporcionais ao número de moles de gás e à variação infinitesimal de temperatura. O valor do coeficiente γ é dado por:

$$\gamma_{\text{exp}} = \frac{C_V + R + \beta}{C_V + \beta}.$$

Donde, se facilmente extrai o parâmetro β (Tabela 8):

$$\beta = \frac{C_V + R - \gamma_{\text{exp}} \cdot C_V}{\gamma_{\text{exp}} - 1};$$

$$\varepsilon_{\beta} = \left| \frac{C_V \cdot (1 - R)}{(\gamma_{\text{exp}} - 1)^2} \right| \cdot \varepsilon_{\gamma_{\text{exp}}}$$

Utilizando o parâmetro β , foi possível estimar as perdas de calor através de (Tabela 9):

$$\Delta Q = -\beta \cdot n \cdot (T_f - T_i);$$

$$\varepsilon_{\Delta Q} = |\beta \cdot (-T_f + T_i)| \cdot \varepsilon_n + |-\beta \cdot n| \cdot \varepsilon_{T_f} + |\beta \cdot n| \cdot \varepsilon_{T_i} + |n \cdot (-T_f + T_i)| \cdot \varepsilon_{\beta}.$$

Comparou-se este valor com o calculado pelo primeiro princípio (Tabela 10):

$$\Delta Q = \Delta U + \Delta W;$$

$$\varepsilon_{\Delta Q} = \varepsilon_{\Delta U} + \varepsilon_{\Delta W}.$$

Onde a variação de energia interna é dada como descrito anteriormente e o trabalho é obtido pela integração numérica do diagrama PV.

Discussão de Resultados

Na primeira actividade do trabalho, fez-se um estudo aprofundado de uma compressão isotérmica. A quantidade de gás no interior do tubo compressor diminuiu ligeiramente durante a transformação (de $0,01018 \pm 2,623 \times 10^{-5}$ para $0,01008 \pm 4,698 \times 10^{-5}$ mol). Esta diminuição é muito pequena, cerca de 0,98% da quantidade inicial, e fica-se a dever a eventuais fugas de gás que possam ter existido.

Foi obtido, experimentalmente, através do declive do Gráfico 2 o valor de a , $0,9996 \pm 0,001949$. Este valor cobre o valor esperado, 1, apresentando um desvio à exactidão de 0,04% e um desvio à precisão de 0,19%.

Admitindo que a transformação é perfeitamente isotérmica, estimou-se para o trabalho exercido sobre o gás e o calor libertado, o valor de $19,27 \pm 0,2680$ J (desvio à precisão de 1,39%). Neste cálculo tomou-se a temperatura média das temperaturas inicial e final. Este valor é muito próximo do obtido para o trabalho pela integração numérica do diagrama PV (Gráfico 1) ($19,61 \pm 0,005$ J) embora não o cubra com a margem de erro. Isto, leva-nos a concluir que a aproximação da transformação em questão a uma isotérmica tem as suas limitações.

Como se verificou uma variação de temperatura, foi possível estimar a variação de energia interna do gás, obtendo-se o valor de $1,620 \pm 0,007960$ J. Com este valor e com o do trabalho dado pela integração numérica do diagrama PV e, recorrendo ao primeiro princípio da termodinâmica foi possível estimar um novo valor para o calor recebido pelo gás durante a compressão. Desta forma obteve-se o valor de $-17,99 \pm 0,01296$ J. O baixo desvio à precisão deste valor (0,072%) fica-se a dever ao facto de apenas o erro da variação de energia interna ser significativo, uma vez que se considerou o erro do trabalho calculado através da integração numérica como metade do último algarismo significativo (precisão da escala).

Na segunda parte desta experiência, realizou-se um estudo de uma compressão adiabática. Contrariamente ao que era esperado, o número de moles de gás contido no interior do tubo aumentou durante a compressão. Desta forma, obteve-se como valor inicial $0,01031 \pm 0,0002565$ e $0,01033 \pm 0,000408$ como valor final. Esta variação deve-se ao facto de a medição da temperatura ser feita com um ligeiro atraso e isso afectar as quantidades de gás calculadas. Esta limitação não teve consequências de maior importância na primeira actividade uma vez que como a compressão foi lenta, a temperatura variou muito lentamente. No entanto, para a actual actividade, a compressão foi feita o mais depressa possível de modo a minimizar eventuais trocas de calor com o exterior. Desta forma, o valor da temperatura aparece atrasado face aos valores de pressão e volume. Para compensar este erro experimental, aumentou-se o erro da medição da temperatura para 1°C . Assim, apesar do aumento do valor da quantidade de gás, este encontra-se dentro da margem de erro.

Através do declive do Gráfico 4, foi possível obter o valor do coeficiente adiabático para o ar (isto, supondo que a transformação foi perfeitamente adiabática). O valor obtido foi de $1,356 \pm 0,001395$ (desvio à precisão de 0,10%) que é bastante próximo do valor real, $7/5 = 1,4$ (desvio à exactidão de 3,1%). Apesar da proximidade dos valores, o valor teórico não é coberto pelo experimental com a margem de erro. Tal facto deve-se à transformação em questão não ser adiabática e logo o valor de γ não ser 1,4.

De seguida calculou-se a variação de energia interna obtendo-se $13,637 \pm 0,8681$ J (desvio à precisão de 6,37%). Para o valor de trabalho realizado pelo sistema obteve-se $-15,51 \pm 2,285$ J. Da comparação destes valores verifica-se a relação, quando consideradas as margens de erro:

$$-\Delta W = \Delta U .$$

O que seria de esperar numa transformação adiabática. O trabalho calculado por integração numérica do diagrama PV (Gráfico 3) foi de $-15,42$ J, encontrando-se este valor abrangido pela margem de erro experimental do valor obtido através das Pressões e Volumes.

No entanto, se admitirmos trocas de calor e considerarmos o modelo descrito no procedimento experimental, calculou-se o valor de β como sendo $2,5677 \pm 1,6692$. Com este valor estimou-se para as trocas de calor $-1,6855 \pm 1,2030$ J (desvio à precisão muito elevado de 71,4%).

De seguida, com o trabalho da integração numérica, e o valor obtido para o trabalho exercido pelo gás, estimou-se um outro valor para a troca de calor, obtendo-se, assim, $-1,7831 \pm 0,87305$ J. Os dois valores obtidos são muito semelhantes, encontrando-se abrangidos pelos respectivos erros experimentais, o que nos leva a concluir que o modelo usado é válido para a nossa compressão “quase adiabática” (trocas de calor muito baixas).

Conclusões

Este trabalho tinha como objectivos, o estudo do comportamento do ar numa compressão adiabática e numa compressão isotérmica. De uma forma geral, os resultados foram muito bons. Tal facto deveu-se às inúmeras tentativas de compressões até se obterem resultados próximos do pretendido.

Foi visível que ambas as compressões não se comportaram de forma ideal. Na isotérmica a temperatura não se manteve constante, e na adiabática foi notória a presença de trocas de calor com o exterior.

No entanto, a suposta transformação isotérmica não se afastou muito de uma ideal. A variação de temperatura foi muito pequena, 7,7 K, quando comparada com o seu valor médio, 305,35 K. Também se verificou uma variação de energia interna muito reduzida (cerca de 8,26% do trabalho exercido sobre o gás). Uma vez que no modelo de gás perfeito esta é uma função exclusiva da temperatura.

Em relação à compressão adiabática, esta também se aproximou bastante da ideal. No entanto, se em vez de em vez de considerarmos uma transformação adiabática pura, levarmos em consideração trocas de calor pequenas proporcionais a um parâmetro β , os resultados são ainda mais satisfatórios.

É ainda, importante destacar alguns erros elevados calculados por propagação de erros. Isto deve-se ao facto da forma como os erros se propagam, apesar de erros não muito grandes nas medições.

Como fontes de erro é importante destacar as seguintes:

- Eventuais erros na calibração dos instrumentos de aquisição de dados, que poderão ter repercussões em todas as medidas;
- Erros nas leituras dos próprios instrumentos;
- O modelo de Gás perfeito, considerado neste trabalho, é apenas uma aproximação do verdadeiro comportamento do ar;
- O próprio ar é uma mistura, algo complexa, de diferentes gases com números de átomos por moléculas diferentes. Não é, portanto, de esperar que o valor de γ seja, de facto, 1,4;
- Eventuais fugas de gás, inerentes ao aparato, durante as compressões.

Bibliografia

- Aulas teóricas do Professor Figueirinhas;
- *Contribuição para o desenvolvimento do ensino da Física Experimental no IST*, António C. Ribeiro, Pedro Sebastião e Francisco Tomé
- *Termodinâmica e Mecânica Estatística*, Apontamentos da disciplina de Termodinâmica e Estrutura da Matéria do Professor Orfeu Bertolami;
- *Termodinâmica*, Enrico Fermi;
- www.wikipedia.org

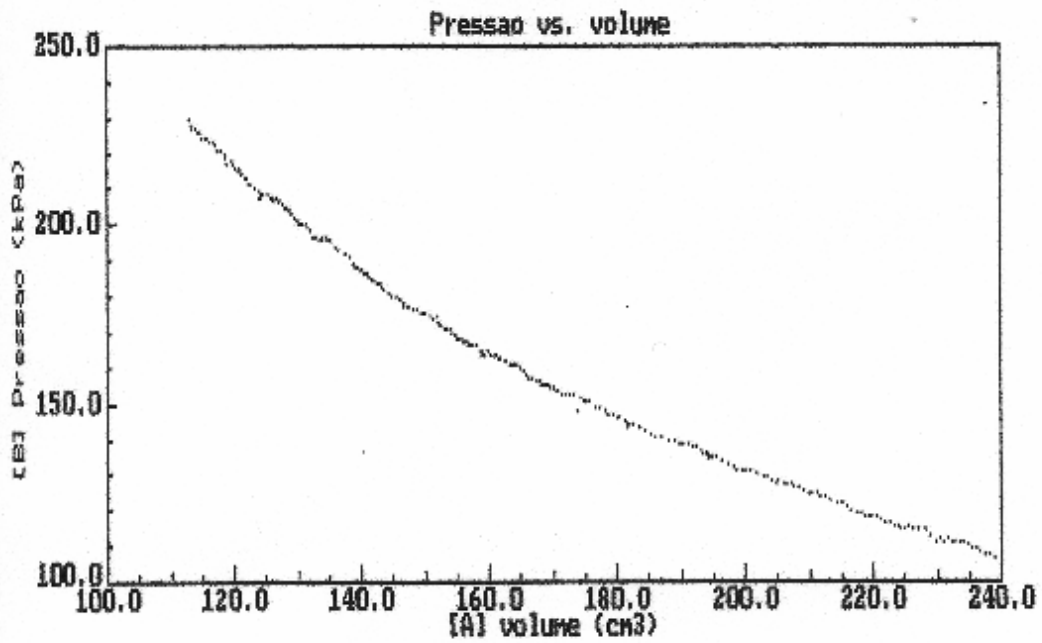


Gráfico 1: Diagrama PV da compressão Isotérmica

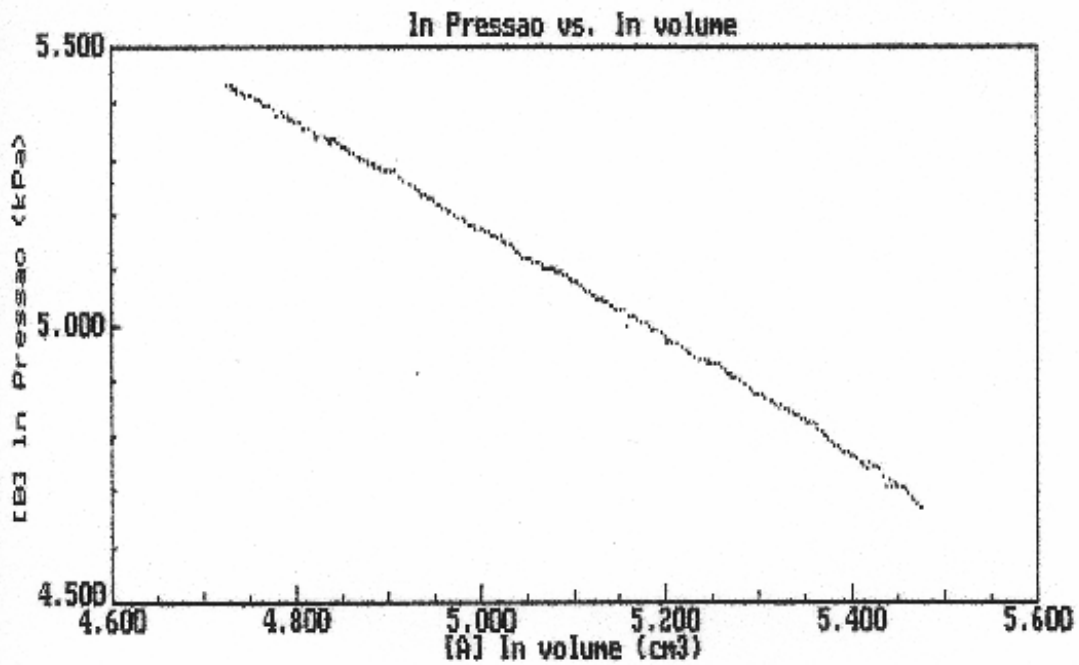


Gráfico 2: Gráfico dos logaritmos da Pressão e Volume da compressão Isotérmica

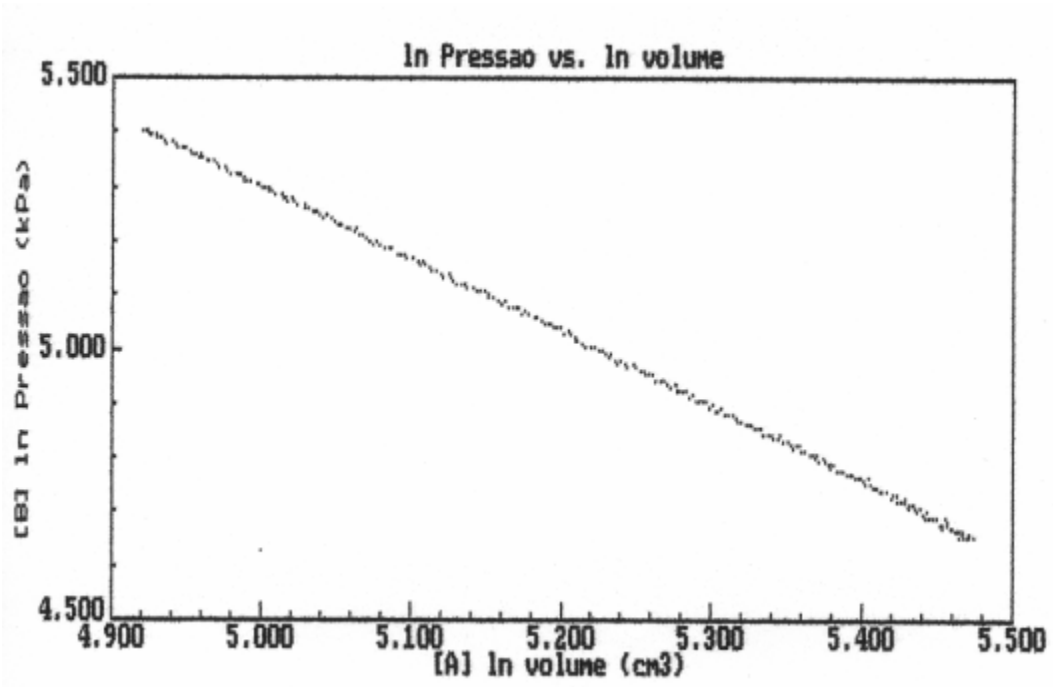


Gráfico 3: Diagrama PV da compressão Adiabática

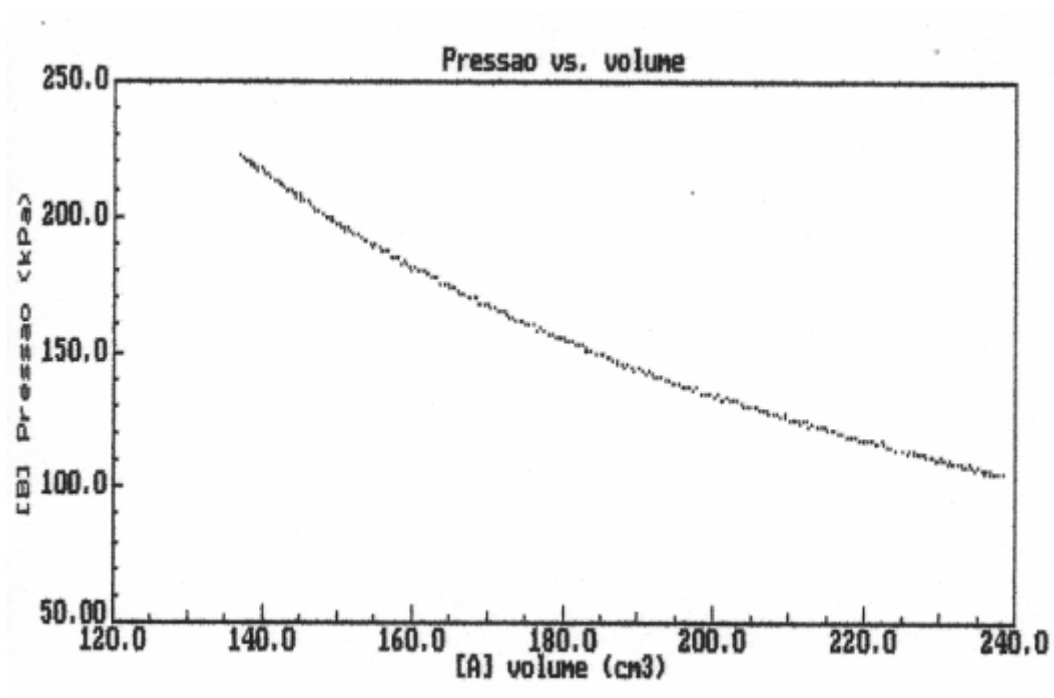


Gráfico 4: Gráfico dos logaritmos da Pressão e Volume da compressão Adiabática

	P (Pa)	ϵ_p (Pa)	V (m ³)	ϵ_v (m ³)	T (°C)	ϵ_T (°C)	T _{médio} (°C)	$\epsilon_{Tmédio}$ (°C)	R (J.mol ⁻¹ .K ⁻¹)	n (mol)	ϵ_n (mol)	n _{médio} (mol)	ϵ_n (mol)
inicial	106700	50	0,000239	0,0000005	28,35	0,005	32,2	3,85	8,31	0,01018	2,623E-05	0,01013	4,698E-05
final	229300	50	0,0001129	0,0000005	36,05	0,005				0,01008	4,698E-05		

Tabela 1 - Registo dos valores envolvidos na compressão isotérmica de um gás e cálculo das respectivas quantidades

n (mol)	ϵ_n (mol)	T (°C)	ϵ_T (°C)	V _i (m ³)	ϵ_{V_i} (m ³)	V _f (m ³)	ϵ_{V_f} (m ³)	$\Delta Q = \Delta W$ (J)	$\epsilon_{\Delta Q} = \epsilon_{\Delta W}$ (J)
0,01013	4,69803E-05	32,2	3,85	0,000239	0,0000005	0,0001129	0,0000005	-19,27	0,2701

abela 2 - Cálculo do calor recebido pelo sistema com base nos valores recolhidos assumindo que este é igual ao trabalho realizado pelo gás

n (mol)	ϵ_n (mol)	T _i (°C)	ϵ_{T_i} (°C)	T _f (°C)	ϵ_{T_f} (°C)	C _v	ΔU	$\epsilon_{\Delta U}$ (J)
0,01013	4,69803E-05	28,35	0,005	36,05	0,005	20,775	1,620	0,009619

Tabela 3 - Cálculo da variação de energia interna do sistema com base nos valores recolhidos

ΔU (J)	$\epsilon_{\Delta U}$ (J)	ΔW_{Graf} (J)	$\epsilon_{\Delta W}$ (J)	ΔQ (J)	$\epsilon_{\Delta Q}$ (J)
1,620	0,009619	-19,61	0,005	-17,99	0,01462

Tabela 4 - Cálculo do calor recebido pelo sistema com base na determinação a partir do gráfico do trabalho exercido pelo gás

	P (Pa)	ϵ_p (Pa)	V (m ³)	ϵ_v (m ³)	T (°C)	ϵ_T (°C)	T _{médio} (°C)	$\epsilon_{Tmédio}$ (°C)	R (J.mol ⁻¹ .K ⁻¹)	n (mol)	ϵ_n (mol)	n _{médio} (mol)	ϵ_n (mol)
inicial	104800	50	0,0002385	0,000005	18,45	1	50,25	1	8,31	0,01031	0,0002565	0,01032	0,0004083
final	222500	50	0,000137	0,000005	82,05	1				0,01033	0,0004083		

Tabela 5 - Registo dos valores envolvidos na compressão isotérmica de um gás e cálculo das respectivas quantidades

n (mol)	ϵ_n (mol)	T _i (°C)	ϵ_{Ti} (°C)	T _f (°C)	ϵ_{Tf} (°C)	C _v	$\Delta U = -\Delta W$ (J)	$\epsilon_{\Delta U}$ (J)
0,01032	0,0004083	18,45	1	82,05	1	20,775	13,637	0,96831

Tabela 6 - Cálculo da variação da energia interna

P _i (Pa)	ϵ_{Pi} (Pa)	V _i (m ³)	ϵ_{Vi} (m ³)	V _f (m ³)	ϵ_{Vf} (m ³)	γ	ΔW (J)	$\epsilon_{\Delta W}$ (J)
104800	50	0,0002385	0,000005	0,0001	0,000005	1,4	-15,51	2,285

Tabela 7 - Cálculo do trabalho exercido pelo gás

C _v	R	γ_{exp}	ϵ_γ	β	ϵ_β
20,775	8,31	1,356	0,0014	2,568	1,669

Tabela 8 - Determinação do parâmetro β , proporcional às trocas de calor

β	ϵ_β	n (mol)	ϵ_n (mol)	T _{final} (°C)	T _{inicial} (°C)	ϵ_T (°C)	ΔQ (J)	$\epsilon_{\Delta Q}$ (J)
2,568	1,669	0,01032	0,00041	82,05	18,45	1	-1,685	1,215

Tabela 9 - Estimativa das trocas de calor com base no parâmetro β

ΔU	$\epsilon_{\Delta U}$ (J)	ΔW_{Graf} (J)	$\epsilon_{\Delta W}$ (J)	ΔQ (J)	$\epsilon_{\Delta Q}$ (J)
13,637	0,968	-15,42	0,005	-1,783	0,973

Tabela 10 - Cálculo do calor recebido pelo sistema com base na determinação a partir do gráfico do trabalho exercido pelo gás