

AULA 10: O PROCESSO ADIABÁTICO

Além dos processos ideais tratados na aula passada (isotérmico, isobárico e isovolumétrico), um quarto tipo de processo tem grande importância na termodinâmica e, notadamente, na termodinâmica da atmosfera: o *processo adiabático*. Um processo adiabático é definido como aquele em que *não há troca de calor entre o sistema e o meio*, ou seja

$$Q = 0 \quad (10.1)$$

Nesse caso, a primeira lei (equação 9.5) se reduz para

$$\Delta U = W = -P_{ex} \Delta V \quad (10.2)$$

ou seja, a energia interna é alterada apenas por troca de energia na forma de trabalho. Como, numa expansão, o trabalho é negativo (o sistema perde energia), a sua energia interna diminui e consequentemente a sua temperatura. Numa compressão, por outro lado, a temperatura aumenta.

Pela definição, um processo adiabático não envolve nenhum fluxo de calor, ou seja, não ocorre troca de energia nem por radiação, nem por condução, nem por convecção. A única forma de realizar um processo adiabático perfeito seria com um corpo branco (não absorve nem emite radiação) no vácuo, eliminando a condução e a convecção. No entanto, diversos processos mais comuns ao nosso redor são considerados adiabáticos. Eles podem ser considerados adiabáticos quando

1. são *tão rápidos* que não há, praticamente, tempo para a troca de calor.

Isso ocorre, por exemplo, quando o ar se comprime (num compressor, numa bomba manual) e, como consequência, é aquecido. Contrariamente, um botijão de gás que é esvaziado rapidamente, congela; o ar numa garrafa de refrigerante apresenta uma névoa logo após abertura: o ar expandiu, esfriou e vapor de água condensou em consequência.

2. envolvem *volumes de matéria tão grandes* que a interface com o meio é relativamente pequena, não dando, praticamente, oportunidade para troca de calor

Esse é o caso, por exemplo, quando grandes massas de ar sobem ou descem na atmosfera terrestre, resultando em variações de pressão e de temperatura. Quando o ar sobe, a pressão diminui, ocorrendo uma expansão adiabática com consequente redução de temperatura.

A seguir deduziremos algumas relações de interesse para uma *expansão ou compressão gasosa reversível adiabática*, isto é, durante a qual não ocorre troca de calor e que é tão lento que podemos considerar que a pressão externa

é igual à interna durante todo o processo, a exemplo do que vimos para o processo isotérmico reversível, em aula anterior. Sendo assim:

$$P_{ex} = P_{in} = \frac{nRT}{V} \quad (10.3)$$

e, substituindo essa relação na 10.2 temos:

$$dU = -\frac{nRT}{V} dV \Rightarrow \frac{dU}{nT} = -\frac{R}{V} dV \quad (10.4)$$

Na relação 10.4 substituímos os símbolos Δ da equação 10.2 por d , indicando matematicamente que, no processo reversível, se trata de diferenças infinitamente pequenas.

Pela relação 9.13 verificamos que

$$dU = C_v dT \quad (10.5)$$

e a substituição da equação 10.5 na 10.4 resulta em

$$dU = -\frac{nRT}{V} dV \Rightarrow \frac{C_v}{nT} dT = \frac{\bar{c}_v}{T} dT = -\frac{R}{V} dV \quad (10.6)$$

A equação 10.6 é uma equação diferencial de fácil resolução, pois, integrando entre o estado inicial (T_1, V_1) e o final (T_2, V_2) obtemos:

$$\int_{T_1}^{T_2} \frac{\bar{c}_v}{T} dT = -\int_{V_1}^{V_2} \frac{R}{V} dV \quad (10.6)$$

cuja solução é

$$\bar{c}_v \ln \frac{T_2}{T_1} = -R \ln \frac{V_2}{V_1} \quad (10.7)$$

Como $\bar{c}_p - \bar{c}_v = R$ (equação 9.19) temos

$$\bar{c}_v \ln \frac{T_2}{T_1} = -(\bar{c}_p - \bar{c}_v) \ln \frac{V_2}{V_1} \Rightarrow \ln \frac{T_2}{T_1} = -\left(\frac{\bar{c}_p}{\bar{c}_v} - 1\right) \ln \frac{V_2}{V_1} \quad (10.8)$$

O quociente \bar{c}_p / \bar{c}_v é, tradicionalmente, representado pela letra grega γ , dessa forma:

$$\ln \frac{T_2}{T_1} = (1 - \gamma) \ln \frac{V_2}{V_1} \Rightarrow \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{1-\gamma} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1} \quad (10.9)$$

Sabemos também que

Aula 10: O processo adiabático

$$\frac{P_2 V_2}{P_1 V_1} = \frac{T_2}{T_1} \quad (10.10)$$

e, combinando 10.10 com 10.9:

$$\frac{P_2 V_2}{P_1 V_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1} \Rightarrow \frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^\gamma \quad (10.11)$$

Da relação 10.9 extraímos que, para um processo adiabático reversível:

$$T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_2^{\gamma-1} \Rightarrow T V^{\gamma-1} = \text{constante} \quad (10.12)$$

e, da equação 10.11 deduzimos a relação entre P e V para o mesmo processo:

$$P_1 V_1^\gamma = P_2 V_2^\gamma \Rightarrow P V^\gamma = \text{constante} \quad (10.13)$$

Podemos ainda deduzir que a relação entre P e T será:

$$P_1^{\frac{1}{\gamma}-1} T_1 = P_2^{\frac{1}{\gamma}-1} T_2 \Rightarrow P^{\frac{1}{\gamma}-1} T = \text{constante} \quad (10.14)$$

O coeficiente γ , que aparece em todas essas equações é, como já vimos:

$$\gamma = \frac{\bar{c}_p}{\bar{c}_v} = \frac{\bar{c}_v + R}{\bar{c}_v} = 1 + \frac{R}{\bar{c}_v}$$

Dessa forma, quanto maior o calor específico de um gás, menor o seu γ . Para gases monoatômicos, como o He e o Ar:

$$\gamma = \frac{\bar{c}_p}{\bar{c}_v} = \frac{\frac{5}{2}R}{\frac{3}{2}R} = \frac{5}{3} = 1,67$$

Para gases diatômicos como o ar, O₂ e N₂:

$$\gamma = \frac{\bar{c}_p}{\bar{c}_v} = \frac{\frac{7}{2}R}{\frac{5}{2}R} = \frac{7}{5} = 1,40$$

Gases compostos por moléculas maiores, que possuem calor específico maior, têm valores de γ menores: $\gamma_{\text{CO}_2} = 1,31$; $\gamma_{\text{C}_3\text{H}_8} = 1,13$; $\gamma_{\text{H}_2\text{O}} = 1,33$.

LCE-200 Física do Ambiente Agrícola

O TRABALHO DE UM PROCESSO ADIABÁTICO

Pela relação (10.2) verificamos que, para um processo adiabático:

$$W = \Delta U$$

Vimos também que:

$$\Delta U = C_v \Delta T$$

Combinando as duas relações acima, temos que:

$$W = C_v \Delta T \quad (10.15)$$

UM EXEMPLO DE UM PROCESSO ADIABÁTICO

Observemos agora, como exemplo, a expansão adiabática de 1000 mol de ar atmosférico ($\gamma = 1,4$), ocupando inicialmente, à pressão P_1 de 500 kPa (aproximadamente 5 atm) um volume V_1 de 5 m³, expandindo até a pressão final P_2 de 100 kPa (aproximadamente 1 atm). Pergunta-se: *Quais as temperaturas inicial (T_1) e final (T_2) do processo, e qual o volume final (V_2)?*

Utilizando a equação universal de gases, calculamos a temperatura inicial T_1 :

$$T_1 = \frac{P_1 V_1}{nR} = \frac{500 \cdot 10^3 \cdot 5}{1000 \cdot 8,314} = 300,7 \text{ K}$$

Para calcular T_2 e V_2 temos dois caminhos alternativos. O primeiro é calcular T_2 pela equação 10.14 e depois V_2 pela equação universal de gases:

$$P_1^{\frac{1}{\gamma}-1} T_1 = P_2^{\frac{1}{\gamma}-1} T_2 \Rightarrow T_2 = T_1 \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{\frac{1}{\gamma}-1} = 300,7 \left(\frac{500 \cdot 10^3}{100 \cdot 10^3}\right)^{\frac{1}{1,4}-1} = 189,9 \text{ K}$$

$$V_2 = \frac{nRT_2}{P_2} = \frac{1000 \cdot 8,314 \cdot 189,9}{100 \cdot 10^3} = 15,8 \text{ m}^3$$

Como caminho alternativo, podemos calcular V_2 pela equação 10.13 e depois T_2 pela equação universal de gases:

$$P_1 V_1^\gamma = P_2 V_2^\gamma \Rightarrow V_2 = V_1 \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{\frac{1}{\gamma}} = 5 \left(\frac{500 \cdot 10^3}{100 \cdot 10^3}\right)^{\frac{1}{1,4}} = 15,8 \text{ m}^3$$

$$T_2 = \frac{P_2 V_2}{nR} = \frac{100 \cdot 10^3 \cdot 15,8}{1000 \cdot 8,314} = 190,0 \text{ K}$$

Aula 10: O processo adiabático

Observa-se que os valores obtidos pelos dois caminhos são (praticamente) iguais, a pequena diferença devendo-se ao arredondamento de números.

Se realizarmos uma expansão com os mesmos parâmetros iniciais mas com um outro gás de \bar{c}_p , \bar{c}_v e, conseqüentemente, γ diferentes, teremos um outro caminho de expansão. Para um gás monoatômico ($\gamma=1,67$) verificamos, por exemplo, que $V_2=13,1\text{ m}^3$ e $T_2=162,4\text{ K}$. Para um gás com moléculas maiores, como por exemplo o propano (C_3H_8 , $\gamma=1,13$) calculamos, analogamente, que $V_2=20,8\text{ m}^3$ e $T_2=250,2\text{ K}$.

Essas três expansões (com $\gamma=1,13$, $\gamma=1,40$ e $\gamma=1,67$) podem ser vistas no diagrama PV da figura 10.1, conjuntamente com algumas linhas isotérmicas.

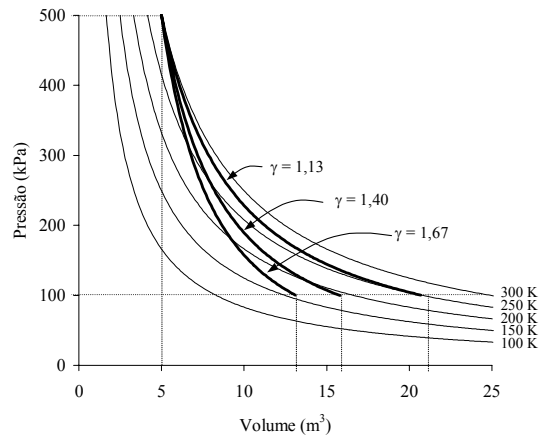


Figura 10.1 - Isotermas e adiabatas

Verifica-se, nessa figura, que a linha de um processo adiabático num diagrama PV cruza as isotermas. Vê-se também que, quanto maior γ (o que corresponde a \bar{c}_p e \bar{c}_v menores), maior o ângulo entre isotermas e adiabatas. Interpretando isso, quanto menor \bar{c}_p e \bar{c}_v , maior o decréscimo de temperatura em relação à variação do volume: aumentando o volume de um gás de uma determinada quantidade ΔV , se o seu calor específico for menor, a sua temperatura reduzirá mais.

Podemos deduzir o mesmo fato também pela teoria já vista. Combinando as equações 9.12 e 9.13 temos

LCE-200 Física do Ambiente Agrícola

$$\bar{c}_v = \frac{\Delta U}{n\Delta T}$$

e combinando essa equação com a 10.2 temos:

$$\bar{c}_v = \frac{-P_{ex}\Delta V}{n\Delta T} \Rightarrow \frac{\Delta T}{\Delta V} = -\frac{P_{ex}}{n\bar{c}_v} \quad (10.16)$$

A equação 10.16 mostra que, quanto maior \bar{c}_v (conseqüentemente, maior também \bar{c}_p e menor γ), menor será o quociente $\Delta T/\Delta V$, ou seja, menor a variação de temperatura por variação de volume, como vimos na figura 10.1.

Aula 10: O processo adiabático

EXERCÍCIOS

1. O calor molar a pressão constante (\bar{c}_p) do ar atmosférico é $29,0 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ e do gás propano (C_3H_8) é $67,3 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Um mol de ambos os gases, ocupando, à pressão de $3,2\cdot 10^5 \text{ Pa}$, um volume de 8 litros cada um, é expandido adiabaticamente ao volume de 20 litros.
 - a) Calcular, para ambos os gases, o calor molar a volume constante (\bar{c}_v) e o valor do coeficiente γ .
 - b) Qual é a temperatura inicial e final do processo de expansão para ambos os gases?
 - c) Representar o processo para cada gás no mesmo diagrama PV.
2. Um volume de ar seco é aquecido pela superfície da Terra, a uma altitude de 550 m acima do nível do mar, onde a pressão atmosférica equivale a $0,94\cdot 10^5 \text{ Pa}$, atingindo a temperatura de 310 K. O volume de ar começa então a subir, expandindo-se adiabaticamente, até chegar à altitude de 1550 m acima do nível do mar, onde a pressão atmosférica equivale a $0,84\cdot 10^5 \text{ Pa}$. Calcular a temperatura do ar ao chegar a essa altitude.

Respostas: 1. a) ar: $20,7 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$; 1,40; propano: $59,0 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$; 1,14;
b) inicial: 308 K; final ar: 213 K; final propano: 271 K; 2. 300,3 K