

CAPÍTULO IV

CICLOS E PROCESSOS IDEAIS

Apesar de não estarmos, no caso de motores de combustão interna, na presença de um ciclo termodinâmico, um ciclo ideal hipotético pode ser útil para mostrar os efeitos de condições de operação diversas, indicar a performance máxima e comparar um tipo de motor com outro.

Há vários tipos de ciclos hipotéticos. Se o fluido considerado for o ar somente, a literatura americana chama o ciclo de "Air Standard Cycle".

4.1 - Ciclo Otto

Para aproximar as condições dos motores, em que a combustão se realiza a volume constante, usa-se o ciclo Otto. Neste ciclo a compressão se dá isentrôpicamente, a combustão a volume constante e a expansão isentrôpicamente. O escape e admissão, que não ocorrem num ciclo, são substituídos por uma transformação a volume constante entre o estado dos gases (ar) de escape e os gases (ar) de admissão.

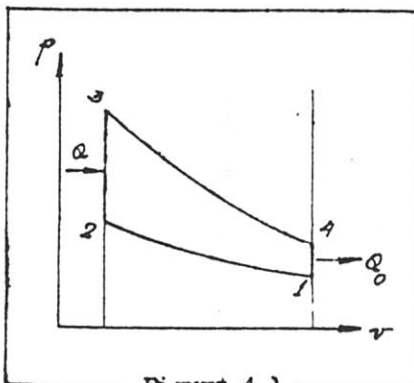


Figura 4.1

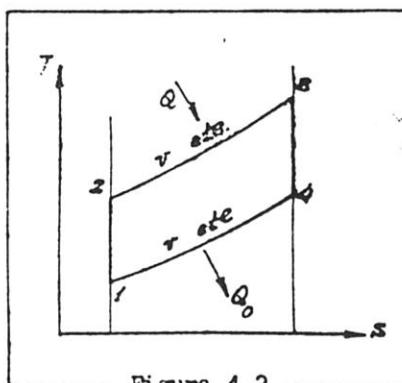


Figura 4.2

Para esse ciclo, podemos escrever:

$$Q = c_v (T_3 - T_2)$$

$$Q_0 = c_v (T_1 - T_4)$$

$$\eta_t = \frac{Q + Q_0}{Q} = 1 + \frac{T_1 - T_4}{T_3 - T_2}$$

$$\eta_t = 1 - \frac{T_1}{T_2} \left(\frac{T_4/T_1 - 1}{T_3/T_2 - 1} \right)$$

mas

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^{k-1} \quad \text{isoentrópica}$$

$$\frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{v_3}{v_4} \right)^{k-1} \quad \text{isoentrópica}$$

e

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{v_3}{v_4} = \frac{1}{r_v} = (\text{relação de compressão})^{-1}$$

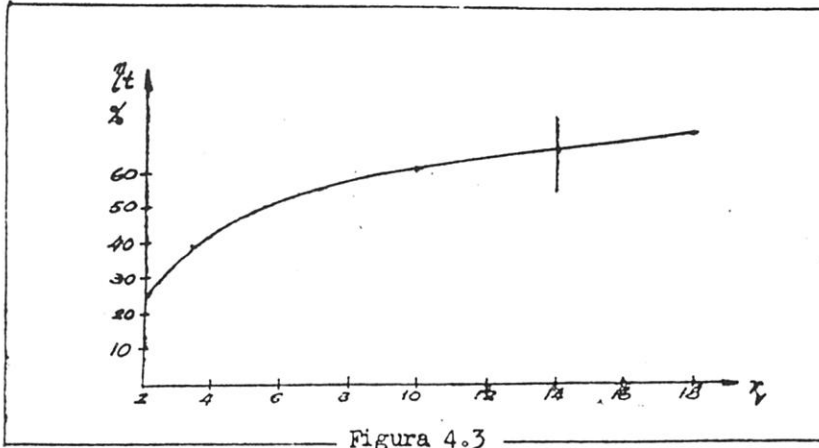
$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{T_4}{T_3} \quad \therefore \quad \frac{T_4}{T_1} = \frac{T_3}{T_2}$$

donde

$$\eta_t = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^{k-1}$$

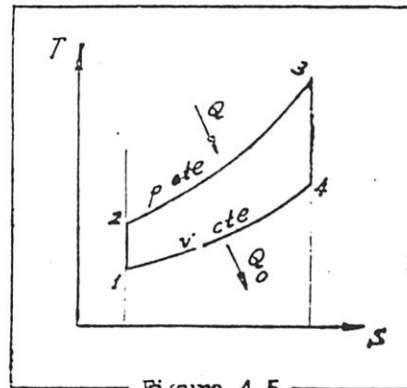
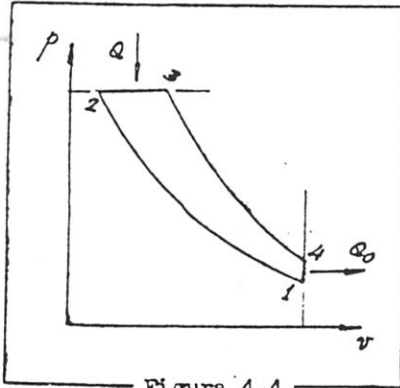
$$\eta_t = 1 - \frac{1}{r_v^{(k-1)}}$$

Interpretando-se essa equação verifica-se que a eficiência térmica varia com a relação de compressão bem como com o flúido empregado. k não é constante para um determinado gás, porém diminui com a temperatura. Pondo a eficiência num gráfico em função de r_v , obtemos a curva da fig.4.3. Vê-se que o aumento de eficiência diminui para compressões e levadas.



4.2 - Ciclo Diesel

Este ciclo representa uma máquina na qual a combustão se dá a pressão constante, condição que pode ser obtida num motor Diesel com injeção a ar retardada.



$$Q = c_p (T_3 - T_2)$$

$$Q_0 = c_v (T_1 - T_4)$$

$$\eta_t = 1 - \frac{Q_0}{Q}$$

$$\eta_t = 1 + \frac{1}{K} \frac{T_1 - T_4}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{1}{K} \frac{T_1}{T_2} \left(\frac{T_4/T_1 - 1}{T_3/T_2 - 1} \right)$$

Porém

$$\Delta S_{14} = \Delta S_{23}$$

$$\Delta S_{14} = c_v \ln \frac{T_4}{T_1} \quad \text{e} \quad \Delta S_{23} = c_p \ln \frac{T_3}{T_2}$$

$$\therefore K \ln \frac{T_3}{T_2} = \ln \frac{T_4}{T_1}$$

Donde

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{r_v^{(K-1)}} \left[\frac{(T_3/T_2)^K - 1}{K(T_3/T_2) - 1} \right]$$

O termo entre colchetes é sempre maior que 1; logo o rendimento desse ciclo é menor do que o do ciclo Otto.

4.3 - Ciclo misto

Esse ciclo se adapta melhor aos motores Diesel da realidade. Seu rendimento fica entre os outros dois ciclos estudados.

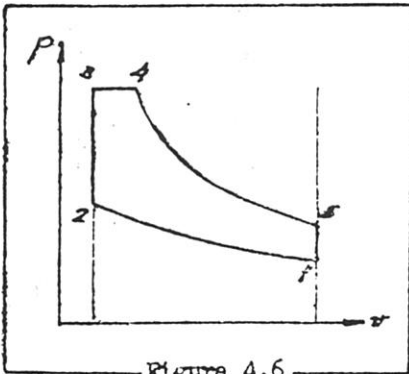


Figura 4.6

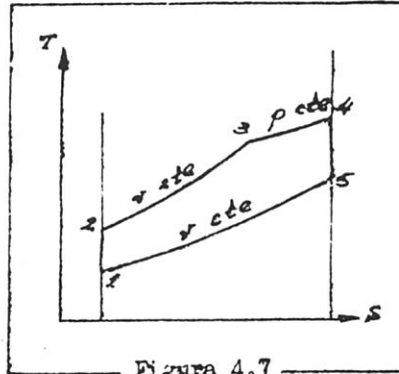


Figura 4.7

4.4 - Comparação entre os três ciclos

- 1) Relação de compressão e calor Q constantes.

$$\eta_{t \text{ Ott.}} > \eta_{t \text{ misto}} > \eta_{t \text{ Diesel}}$$

Pode-se chegar a essa conclusão gráficamente:

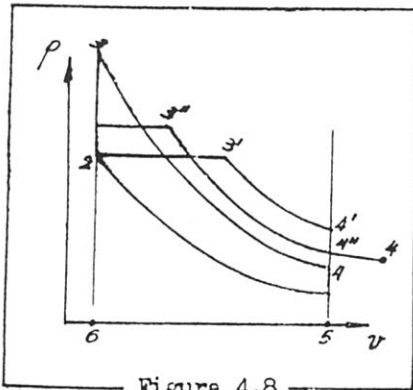


Figura 4.8

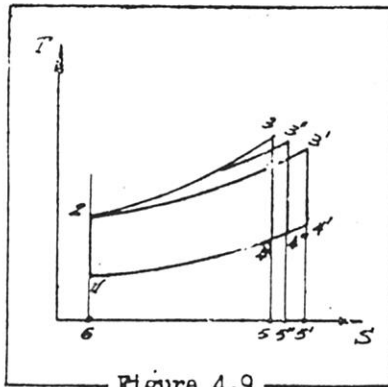


Figura 4.9

Q constante corresponde às áreas 6235 iguais no diagrama TS. O calor rejeitado (Q_0) é representado pelas áreas 6145 e é maior para o ciclo Diesel (menos eficiente).

2) Para Q constante e P_{max} constante, obtém-se

$$\eta_{\text{Diesel}} > \eta_{\text{misto}} > \eta_{\text{Otto}}$$

Ao mesmo resultado se chega, considerando P_{max} constante e trabalho (área do ciclo) constante, ou P_{max} e t_{max} constantes.

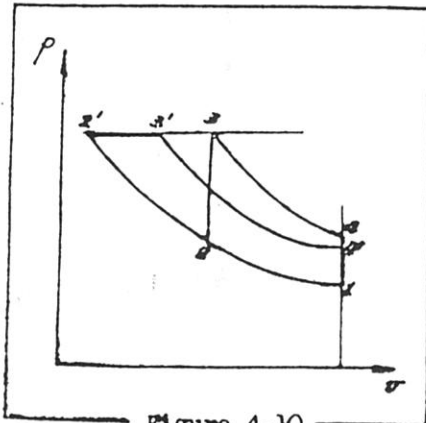


Figura 4.10

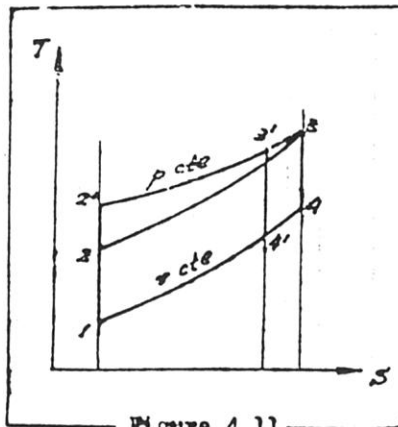


Figura 4.11

4.5 - Efeito do equilíbrio químico e do calor específico variável

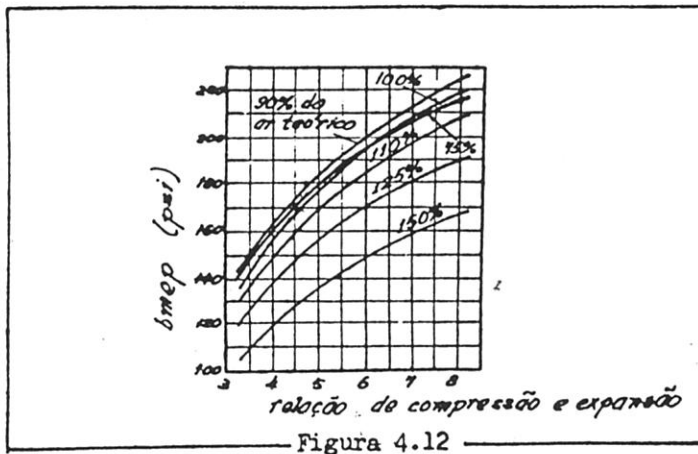


Figura 4.12

Nos ciclos estudados consideramos o calor específico constante. Na realidade a variação do c_p com a temperatura faz com que na compressão e na combustão se atinjam valores menores de pressão e na expansão valores maiores de p (maior trabalho, porém ponto inicial menor).

A dissociação devida ao equilíbrio químico não influe na compressão, porém, como vimos, ocasiona uma temperatura de combustão menor.

As figs. 4.13 e 4.12 mostram a variação do rendimento e do b_{mep} em função da relação de compressão, para várias composições da mistura.

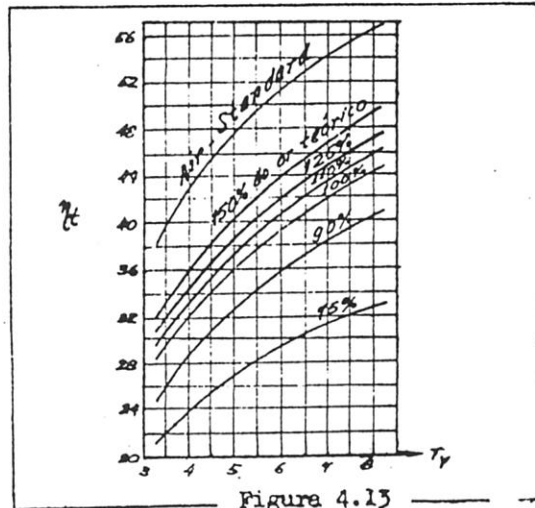


Figura 4.13

4.6 - Motor a ar (hipotético)

Permite achar as expressões para os processos que ocorrem no motor de combustão interna, sem complicações derivadas do equilíbrio químico e c_p variável, porém em geral válidas para qualquer gás. De qualquer maneira, ajuda a formar uma idéia inicial sobre esses processos.

4.7 - Motor de expansão total

Caracteriza-se por um bmap baixo, uma eficiência alta e pelo tamanho grande.

Na prática representa motores de alta rotação nos quais a válvula de admissão fecha muito tarde.

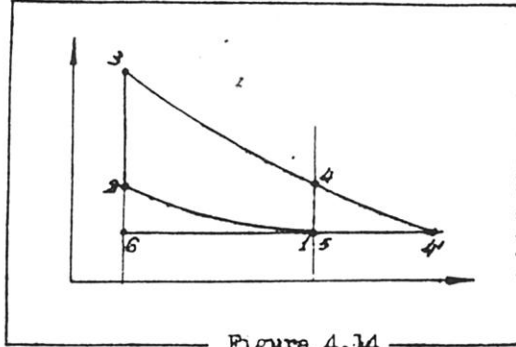


Figura 4.14

4.8 - O processo de escapamento no motor a ar

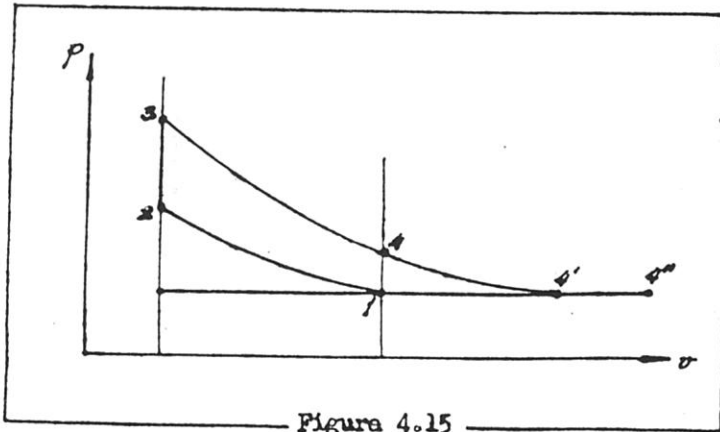


Figura 4.15

No ciclo "Air Standard" a transformação 4-1 era considerada isocórica. Na realidade o que ocorre é o processo de escapamento, que se inicia no ponto 4.

Para efeito de raciocínio, pode-se considerar os gases que estão no cilindro na ocasião da abertura da válvula de escape como que divididos em duas partes.

Uma parte não deixará o cilindro, porém expandir-se-á forçando a outra parte para fora do cilindro. A transformação sofrida por essa parte do gás será, no caso ideal, a isoentrópica 4-4'.

Analisemos em seguida o que acontece com a outra parte (expulsa) do gás. A primeira parcela expulsa está no estado 4 e expandirá para o estado 4', adquirindo velocidade elevada. Essa velocidade, porém, será dissipada em sua maior parte por turbulências e atritos no cano de escapeamento, fazendo com que a temperatura se eleve e o estado do gás passe a 4". As parcelas seguintes terão um estado inicial intermediário entre 4 e 4', atingindo estados finais entre 4' e 4". A última parcela deixará o cilindro no estado 4' sem sofrer expansão. Interessante é notar que a temperatura dos gases de escape será maior do que aquela do gás que permaneceu no cilindro.

A massa que permanece no cilindro é (pto. 5)

$$m_5 = \frac{V_1}{v'_4}$$

e no fim do tempo de escapeamento

$$m_6 = m_e = \frac{V_6}{v'_4} = \frac{V_2}{v'_4}$$

Nesse ponto vamos definir a fração de gases queimados na mistura total por peso:

$$f = \frac{m_e}{m_m}$$

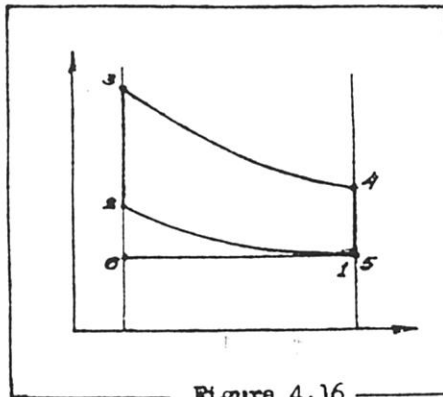


Figura 4.16

onde m_m é o peso da mistura total (gases novos mais resíduo de gases queimados).

Se o m_m constante na compressão, combustão e expansão, podemos escrever

$$m_m = \frac{V_1}{v_1} = \frac{V'_4}{v'_4} = \frac{V_4}{v_4}$$

e

$$r = \frac{V_6}{v'_4} \cdot \frac{v'_4}{V_4} = \frac{V_6}{V_4}$$

onde $V_{4'}$ = volume ocupado por m_m se for expandido até a pressão ambiente.

4.9 - Energia contida nos gases de escape

O trabalho num ciclo Otto é

$$L_{\text{Otto}} = (u_1 - u_2) + (u_3 - u_4)$$

ou então

$$L_{\text{Otto}} = A \int_1^2 p dv + A \int_3^4 p dv$$

Num motor de expansão total, o trabalho será

$$\begin{aligned} L &= (u_1 - u_2) + (u_3 - u_{4'}) + A \int_{4'}^1 p dv \\ &= (u_1 - u_2) + (u_3 - u_{4'}) + A p_0 (V_1 - V_{4'}) \end{aligned}$$

A diferença entre os dois trabalhos é a energia dos gases de escape (por ciclo)

$$L_{\text{escape}} = (u_4 - u_{4'}) + A p_0 (V_1 - V_{4'})$$

4.10 - Processo de admissão ideal

Terminado o processo de escapamento, inicia-se o re-enchimento do cilindro pelo processo de admissão. O sistema que podemos considerar para esse processo tem como fronteiras a superfície superior do pistão de um lado e a atmosfera (através da válvula de admissão, aberta) do outro lado. Trata-se portanto de um sistema aberto. Aplicando o 1º prin

cípio a esse sistema

$$Q - AL = \Delta E_f + \Delta E_a$$

onde

$$L = \int_0^1 pdv = p_1 (V_1 - V_6) = p_1 \cdot m_m \cdot v_1 - p_1 \cdot m_e \cdot v_6$$

$$Q = 0 \quad (\text{isocentrópico})$$

$$\Delta E_f = -m_a (u_a + A p_a \cdot v_a) = \text{energia do gás que entra}$$

$$\Delta E_a = E_{a \text{ fim}} - E_{a \text{ início}} = m_m \cdot u_m - m_e \cdot u_e$$

Substituindo, vem:

$$-(A p_1 m_m v_1 - A p_1 m_e v_6) = -m_a (u_a + A p_a v_a) + (m_m u_m - m_e u_e)$$

$$m_m (u_m + A p_1 v_1) = m_a (u_a + A p_a v_a) + m_e (u_e + A p_6 v_6)$$

$$\boxed{m_m h_m = m_a h_a + m_e h_e}$$

Lembrando que

$$f = \frac{m_e}{m_m} \quad \text{e} \quad m_m = m_a + m_e$$

podemos escrever

$$h_m = (1 - f) h_a + f h_e$$

Exercícios:

- 1) Um ciclo Otto usando ar tem uma relação de compressão $r_v = 8$. No início da compressão a temperatura é de 27°C e a pressão de 1 atm. O calor é fornecido numa razão de 710 kcal/kg ar.

- Pede-se: a) o rendimento do ciclo
 b) o trabalho que o ciclo pode fornecer
 c) temperaturas e pressões em cada ponto
 d) imep.

a) rendimento teórico

relação de compressão

$$r_v = \frac{v_1}{v_2} = 8$$

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{r_v^{k-1}} =$$

$$= 1 - \frac{1}{8^{1,4-1}} = 0,565$$

$$\eta_t = 56,5\%$$

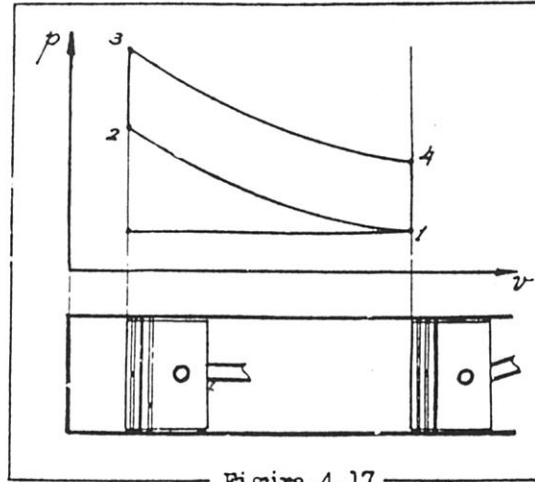


Figura 4.17

b) Trabalho que o ciclo pode fornecer

$$L = \eta_t \cdot Q = 0,565 \times 710 = 400 \text{ kcal/kg a}$$

$$L = 400 \times 426 = 170.400 \text{ kgm/kg}$$

c) Temperaturas e pressões em cada ponto

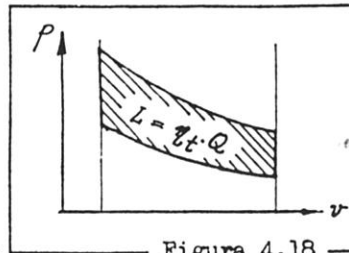


Figura 4.18

Ponto 1

$$p_1 = 1 \text{ atm} = 1 \text{ kg/cm}^2$$

$$T_1 = 273 + 27 = 300^\circ\text{K}$$

$$v_1 = \frac{R T_1}{p_1} = \frac{29,27 \times 300}{10.000} = 0,88 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Ponto 2

1 - 2 compressão adiabática

$$p_1 v_1^K = p_2 v_2^K \quad \therefore \quad p_2 = p_1 \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^K$$

$$p_2 = 1 \times 8^{1,4} = 18,4 \text{ kg/cm}^2$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{K-1} \quad \therefore \quad T_2 = T_1 (r_v)^{K-1}$$

$$v_2 = \frac{R T_2}{p_2} = \frac{29,27 \times 690}{18,4 \times 10^4} = 0,11 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Ponto 3 2 - 3 combustão a volume constante

$$Q = m c_v (T_3 - T_2)$$

$$c_v = 0,171 \text{ kcal/kg} \cdot ^\circ\text{K}$$

$$\therefore \quad 710 = 0,171 (T_3 - T_2)$$

$$T_3 - T_2 = 4130$$

$$T_3 = 4130 + T_2 = 4.820^\circ\text{K}$$

$$\frac{p_3}{p_2} = \frac{T_3}{T_2} \quad p_3 = p_2 \frac{T_3}{T_2} = 18,4 \times \frac{4820}{690}$$

$$p_3 = 129 \text{ kg/cm}^2$$

$$v_3 = v_2 = 0,11 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Ponto 4 3 - 4 Expansão adiabática

$$\frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{v_4}{v_3}\right)^{K-1} \quad \therefore \quad T_4 = \frac{T_3}{(r_v)^{K-1}} = \frac{4820}{8^{0,4}}$$

$$T_4 = 2100^\circ\text{K}$$

$$v_4 = v_1 = 0,88 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$p_4 = \frac{R T_4}{v_4} = \frac{29,27 \times 2100}{0,88} = 70.000 \text{ kg/m}^2$$

$$p_4 = 7 \text{ atm}$$

d) imep

$$\text{imep} = \frac{L}{V} = \frac{170.400}{V_1 - V_2} = 22,2 \times 10^4 \text{ kg/m}^2$$

$$\text{imep} = 22,2 \text{ kg/cm}^2$$

2) Um motor que trabalha com ar e com $r_v = 8$ funciona com uma mistura de ar novo (0,97 kg) e gases residuais (0,03 kg). O calor é fornecido à razão de 710 kcal/kg de ar novo. No início da compressão as condições são: $t = 60^\circ\text{C}$ e $p = 1 \text{ atm}$.

Pede-se:

- a) Temperaturas e pressões em cada ponto do ciclo (supor calor específico variável)
- b) Trabalho útil
- c) Rendimento térmico
- d) imep.

a) Temperaturas e pressões em cada ponto

Ponto 1

$$T_1 = 273 + 60 = 333^\circ\text{K}$$

$$p_1 = 1 \text{ atm}$$

$$v_1 = \frac{R T_1}{p_1} = \frac{29,27 \times 333}{10^4} = 0,975 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Ponto 2

1 - 2 Compressão adiabática

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{k-1}$$

Cálculo de K médio

$$\text{a } 330^\circ\text{K} \quad k = 1,4$$

$$\text{a } 700^\circ\text{K} \quad k = 1,3$$

$$k_m = 1,38$$

$$T_2 = 333 \times 8,038 = 733^\circ\text{K}$$

$$v_2 = \frac{v_1}{8} = \frac{0,975}{8} = 0,122 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$p_2 = \frac{R T_2}{v_2} = \frac{29,27 \times 733}{0,122 \times 10^4} = 21,5 \text{ kg/cm}^2$$

Ponto 3 2 - 3 combustão a volume constante

O calor fornecido a volume constante é igual à variação de energia interna (sensível)

$$\text{para } T_2 = 733^\circ\text{K} = 1370^\circ\text{R} \quad U_2 = 4174 \text{ Btu/mol lb} = \\ = 144 \text{ Btu/lb} = 80 \text{ kcal/kg}$$

$$Q_v = 710 \times 0,97 = 590 \text{ kcal/kg mistura}$$

$$Q_v = U_3 - U_2 \quad \therefore U_3 = 770 \text{ kcal/kg} = 40.500 \text{ Btu/mol}$$

$$\therefore T_3 = 6742^\circ\text{R}$$

$$T_3 = 3740^\circ\text{K}$$

$$v_3 = v_2 = 0,122 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$p_3 = \frac{R T_3}{v_3} = \frac{29,27 \times 3740}{0,122 \times 10^4} = 90 \text{ kg/m}^2$$

Ponto 4 3 - 4 Expansão adiabática

$$k_{\text{médio}} = 1,285$$

$$\frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{v_3}{v_4}\right)^{k-1} \quad \therefore T_4 = T_3 \left(\frac{1}{8}\right)^{1,285} = 2050^\circ\text{K}$$

$$\frac{p_4}{p_3} = \left(\frac{v_3}{v_4}\right)^k \quad \therefore p_4 = p_3 \left(\frac{1}{8}\right)^{1,285} = 6,2 \text{ kg/cm}^2$$

$$v_4 = v_1 = 0,975 \text{ m}^3/\text{kg}$$

b) Trabalho útil

$$AL = (U_3 - U_4) - (U_2 - U_1)$$

$$U_3 = 770 \text{ kcal/kg}$$

$$T_4 = 2050^\circ\text{K} = 3700^\circ\text{R} \quad U_4 = 19.156 \text{ Btu/lbmol}$$

$$U_4 = 363 \text{ kcal/kg}$$

$$U_2 = 80 \text{ kcal/kg}$$

$$T_1 = 333^\circ\text{K} = 600^\circ\text{R} \quad U_1 = 560 \text{ Btu/lbmol}$$

$$U_1 = 10,8 \text{ kcal/kg}$$

$$L = (770 - 363) - (80 - 10,8) = 338 \text{ kcal/kg}$$

c) Rendimento térmico

$$\eta_t = \frac{L}{Q_v} = \frac{338}{690} = 0,49 \text{ ou } 49\%$$

d) imep

$$\text{imep} = \frac{L}{V_1 - V_2} = \frac{338 \times 426}{(0,975 - 0,122) 10^4} = 16,8 \text{ kg/cm}^2$$

3) Calcular a temperatura e a quantidade de gases residuais no espaço nocivo do motor a ar do exercício anterior.

Do exercício anterior

$$p_4 = 6,2 \text{ kg/cm}^2$$

$$T_4 = 2050^\circ\text{K}$$

$$v_4 = 0,975 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$v_6 = 0,122 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Cálculo de f

$$f = \frac{m_e}{m_m} = \frac{V_6/v_4}{V_4/v_4} = \frac{v_6}{v_4}$$

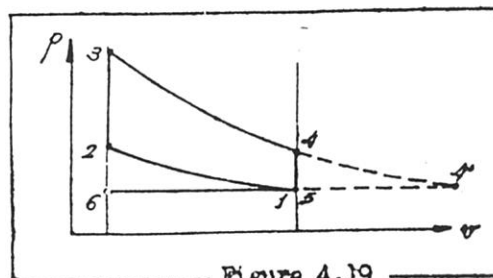


Figura 4.19

Supondo que 1-4' seja uma expansão isentrópica:

$$p_4 v_4^k = p_{4'} v_{4'}^k \quad \therefore \quad v_{4'} = v_4 \left(\frac{p_4}{p_{4'}} \right)^{1/k}$$

$$p_{4'} = p_1 = 1 \text{ atm}$$

$$k_m = 1,31$$

$$v_{4'} = 0,973 \left(\frac{6,2}{1} \right)^{1/1,31}$$

$$v_{4'} = 3,9 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$f = \frac{v_6}{v_{4'}} = \frac{0,122}{3,0} = 0,0313 \quad (\text{compare com o valor admitido anteriormente})$$

Temperatura dos gases residuais:

$$\frac{T_{4'}}{T_4} = \left(\frac{p_{4'}}{p_4} \right)^{(k-1)/k} \quad T_{4'} = 2050 \left(\frac{1}{6,2} \right)^{0,31/1,31}$$

$$T_{4'} = 1.340^\circ\text{K}$$

- 4) Calcular a temperatura da mistura para o motor do exercício 2, se a temperatura e a pressão da carga fresca são 27°C e 10 atm.

$$m_m h_m = m_a h_a + m_e h_e$$

$$h_m = (1 - f) h_a + f h_e$$

onde o índice *m* se refere à mistura no fim da aspiração; *a* para a carga entrando e *e* para gases residuais.

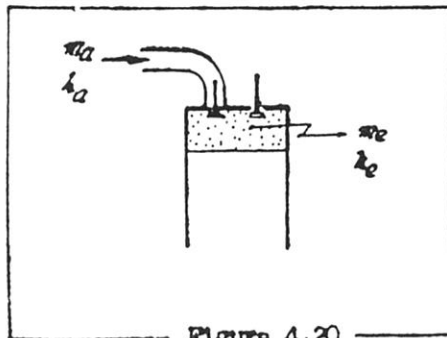


Figura 4.20

Admitindo um c_p médio

$$c_p T_m = (1 - f) c_p T_a + f c_p T_e$$

$$\therefore T_m = (1 - f) T_a + f T_e$$

Com $f = 0,0313$; $T_a = 273 + 27 = 300^\circ\text{K}$ e $T_e = T_4 = 1340^\circ\text{K}$

$$T_m = (1 - 0,0313) 300 + 0,0313 \times 1340$$

$$T_m = 322,5^\circ\text{K}$$

Compare com o valor 330°K , admitido anteriormente.

5) Determinar o rendimento volumétrico do motor e ar do ex.2,

$$\eta_v = \frac{m_a}{m_t}$$

sendo

m_a = massa de carga entrando

m_t = massa total de carga que poderia ser admitida = massa de carga para preencher o volume deslocado pelo pistão quando se desloca do PMS para o PMI, medido nas condições atmosféricas.

Para 1 kg $m_m = 1 \text{ kg}$

$$f = 0,0313$$

$$m_a = 0,969 \text{ kg}$$

$$m_t = \frac{p_1 v}{R T_1} = \frac{10^4 \times 0,853}{29,27 \times 300} = 0,971 \text{ kg}$$

$$v = v_1 - v_2 = 0,975 - 0,122 = 0,853 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\eta_v = \frac{m_a}{m_t} = \frac{0,969}{0,971} = 0,996$$

$$\eta_v = 99,6\%$$