

Capítulo V

Diagramas de combustão

Os cálculos dos problemas de combustão analiticamente são muito difíceis além de exigirem algumas simplificações. Para diminuir a complexidade do problema foram criados gráficos e tabelas que são utilizados nos problemas normais da engenharia, sendo seus resultados bastante precisos.

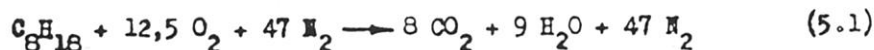
5.1 - Diagramas de mistura não queimada

O primeiro passo é a construção de gráficos para a compressão de mistura de ar e combustível e para isso será suposto a não existência de reações químicas entre ar e combustível.

A mistura é constituída de ar, combustível e gases residuais e uma vez que a participação desses elementos é variável, seria preciso, para estudar todas as condições de trabalho, um grande número de diagramas. Como isso não é prático, os manuais apresentam gráficos para algumas condições consideradas mais importantes, geralmente três: uma para mistura pobre, outra para mistura estequiométrica e a outra para mistura rica de ar e octana C_8H_{18} .

5.2 - Construção do diagrama de mistura não queimada

A construção de um diagrama pode ser melhor compreendida através de um exemplo. Suponhamos uma mistura estequiométrica de octana e ar:



Em massa podemos escrever

$$114 \text{ kg } C_8H_{18} + 400 \text{ kg } O_2 + 1,316 \text{ kg } N_2$$

ou 114 kg de combustível para 1716 kg de ar

ou 0,0665 kg de combustível para 1 kg de ar

ou 1 kg de combustível para 15,1 kg de ar

O diagrama de compressão da mistura estequiométrica é construído para 1,0665 kg de gases.

Por outro lado, a reação acima mostra que

60,5 moles de carga — 64 moles de produtos
e por quilo de ar (ou então por 1,0665 kg de mistura):

$$\frac{60,5 \text{ moles de carga}}{(400 + 1.316) \text{ kg de ar}} = 0,0353 \frac{\text{moles de carga}}{\text{kg de ar}} \quad (5.2)$$

e para os gases queimados

$$\frac{64 \text{ moles de gases queimados}}{(400 + 1.316) \text{ kg de ar}} = 0,0373 \frac{\text{moles de gases queimados}}{\text{kg de ar}} \quad (5.3)$$

e assim temos, para cada quilo de ar:

0,0353 moles de carga — 0,0373 moles de gases queimados.

Por outro lado, nos motores existe uma quantidade f de gases residuais que se mistura à carga $(1 - f)$ de flúido entrando. Portanto os moles de mistura existentes no motor durante a compressão são:

$$0,0373 f + 0,0353 (1 - f)$$

ou seja

$$(0,0353 + 0,002 f) \text{ moles} \quad (5.4)$$

Repetindo o problema para cargas com 110% do ar teóricamente necessário (mistura pobre) e com 85% do ar teóricamente necessário (mistura rica), poderemos resumir os resultados na seguinte tabela:

Mistura	% do ar necessário	massa de mistura	relação comb-ar	relação ar-comb	moles de mistura não queimada
Fraca	110	1,0605	0,0605	16,5	0,0352 + 0,002 f
Correta	110	1,0665	0,0665	15,1	0,0353 + 0,002 f
Rica	85	1,0782	0,0782	12,8	0,0354 + 0,004 f

Três hipóteses serão admitidas para o traçado do diagrama:

a - o flúido dentro do cilindro se encontra na forma de ga-

ses;

b - os gases residuais são constantes e valem $f = 0,10$;

c - durante a compressão não há reações químicas.

Assim sendo, a mistura correta (1,0665 kg) para o traçado do diagrama de compressão é constituída por:

0,10665 kg de gases residuais (10% de 1,0665 $\rightarrow f = 0,1$)

0,9 kg de ar (90% do ar entrando)

$0,9 \times 0,0665 = 0,05985$ kg de combustível (90% do combustível para a mistura)

A relação entre p , V e T para o traçado dos diagramas é obtida a partir de

$$pV = nRT$$

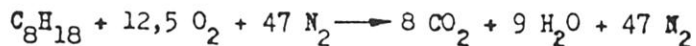
onde n é o número de moles fornecido pela tabela anterior (na coluna "moles de mistura não queimada") substituindo-se f por 0,10.

Para completar o diagrama ficam faltando ainda os valores da energia interna, da entalpia e da entropia.

A energia interna é função só da temperatura (para os gases reais a pressão também influi, mas pouco). Assim os valores de energia interna podem ser obtidos em função da temperatura, por meio de tabelas adequadas. Será chamada energia interna sensível (U_s) porque não ocorrem nem reações químicas nem mudança de estado.

A energia interna de uma mistura de gases é a soma das energias internas de cada componente multiplicadas pelas respectivas massas.

Assim, na queima completa de octano:



Para 1 kg de ar:

$$\frac{1}{1.716} C_8H_{18} + \frac{12,5}{1.716} O_2 + \frac{47}{1.716} N_2 \text{ moles de carga}$$

Para 0,9 kg de ar:

$$\frac{0,9}{1,716} C_8H_{18} + \frac{12,5 \times 0,9}{1,716} O_2 + \frac{47 \times 0,9}{1,716} N_2 \text{ moles de carga}$$

ou

$$0,000524 C_8H_{18} + 0,00656 O_2 + 0,0246 N_2 \text{ moles de carga} \quad (5.5)$$

E para 0,10665 kg de gases residuais (f = 0,10) te-
remos análogamente:

$$0,000466 CO_2 + 0,000524 H_2O + 0,00274 N_2 \text{ moles de gases resi-} \\ \text{duais} \quad (5.6)$$

Para calcular a energia interna dessa mistura a uma
temperatura qualquer basta conhecer agora a energia interna
de cada componente a essa temperatura e efetuar a seguinte so-
ma:

$$U_s = 0,000524 U_{C_8H_{18}} + (0,00656 + 0,0246) U_{ar} + \\ + 0,000466 U_{CO_2} + 0,000524 U_{H_2O} + 0,00274 U_{N_2} \quad (5.7)$$

Operando dessa maneira podemos calcular os valores
da energia interna para qualquer temperatura e riqueza, que
se reproduzidos num gráfico tomam o aspecto da fig. 5.1.

A entalpia
por sua vez pode tam-
bém ser calculada se
lembrarmos que:

$$H_s = U_s + A pV.$$

Resta pois
calcular a entropia.
A entropia de uma
substância é função
de duas propriedades
e portanto duas pro-
priedades são neces-
sárias para descri-
ver um certo estado,
como por exemplo a o-
riginem para referência. A entropia será considerada nula pe-

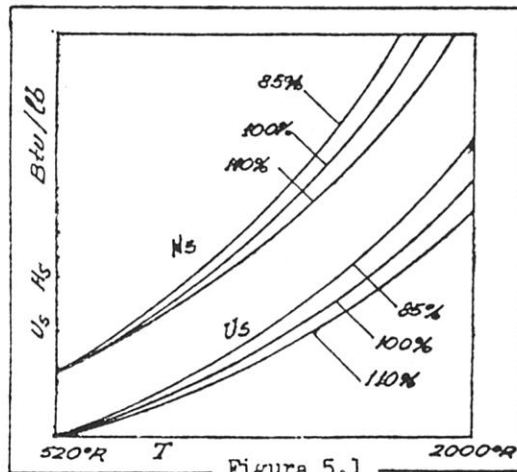


Figura 5.1

ra a pressão de 1 atm e temperatura de 520°R.

Existem diagramas com outras referências (ver, p. ex., Thermodynamics Charts for Combustion Process, de H. C. Hottel, G.C. Willyams, C.N. Satterfield, que tomam para referência $p = 1 \text{ atm}$ e $T = 200^\circ\text{K} = 360^\circ\text{R}$).

A variação de entropia é calculada a partir de

$$dS = c_p \frac{dT}{T} - R \frac{dp}{p} \quad (*)$$

integrando

$$S_2 - S_1 = n \int_{T_1}^{T_2} c_p \frac{dT}{T} - n R \ln \frac{p_2}{p_1}$$

Supondo $S_1 = 0$ para $T_1 = 520^\circ\text{R}$ e $p = 1 \text{ atm}$

$$S_2 = n \int_{520}^{T_2} c_p \frac{dT}{T} - n R \ln p_2$$

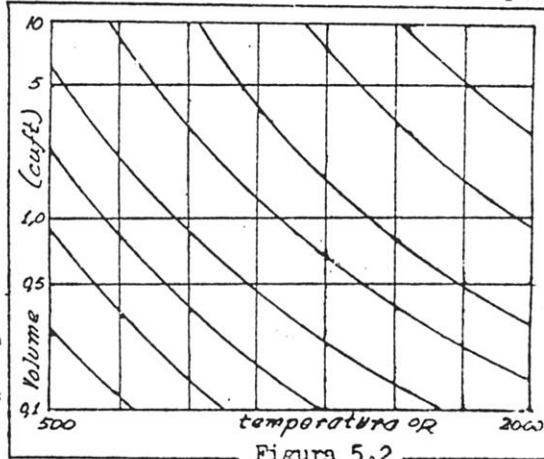
Se fizermos, para facilidade de construção, $T_2 = T_1$

$$\therefore S_2 = - n R \ln p_2$$

A pressão parcial de cada componente é obtida por

$p_i = x_i p$, sendo x_i a fração molar do produto i .

Analogamente, à energia interna podemos calcular a entropia do siste-



(*) $dQ - dAL = dU$

$$TdS - p dv = c_v dT$$

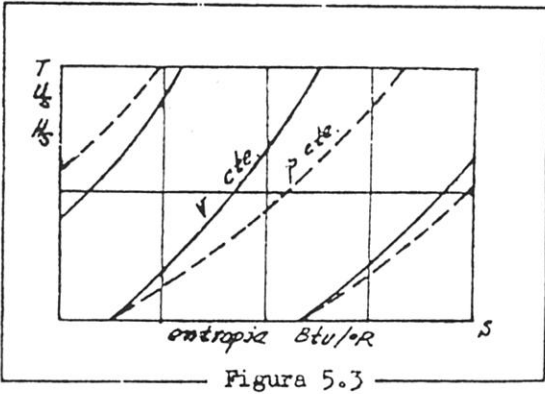
$$\therefore TdS - p dv + p dv = c_v dT + p dv$$

$$= c_p dT + p dv$$

$$TdS + p dv = c_p dT$$

$$dS = c_p \frac{dT}{T} - R \frac{dp}{p}$$

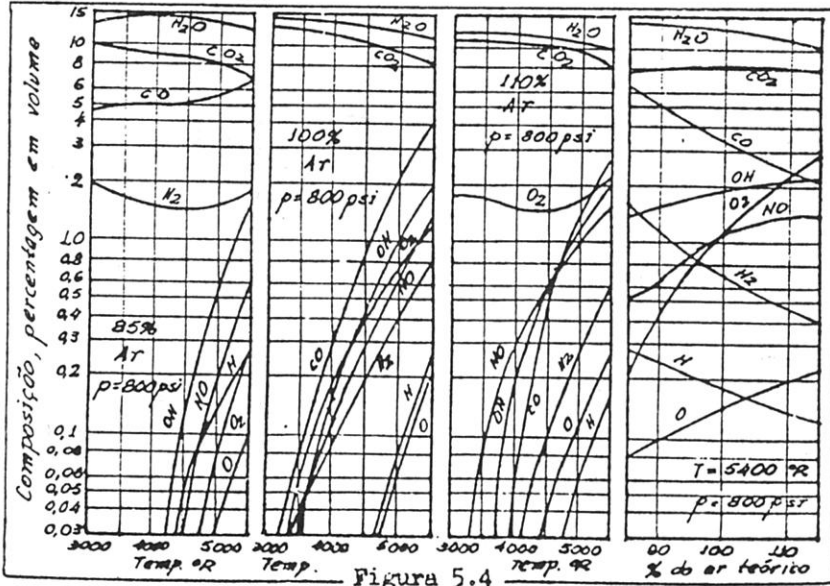
ma como a soma das entropias de cada componente.



Algumas vezes, pode-se encontrar gráficos em que são reunidos os da fig. 5.1 e fig. 5.2, dando a fig. 5.3.

5.3 - Diagramas de mistura queimada

A construção do diagrama de mistura queimada é análoga ao da mistura não queimada e para a mesma massa de mistura (embora os cálculos sejam mais complicados). São necessários 3 diagramas para complementar os três de mistura não queimada. Os componentes da mistura queimada são determinados conforme o exercício visto sobre dissociação e equilíbrio químico no cap. III.



Efetuando-se os cálculos, os resultados podem ser colocados em gráficos que tomam o aspecto da fig. 5.4.

A referência do diagrama para a energia interna foi escolhida 520°R ; mas como vários componentes estão presentes, é necessário escolher quais os que terão a energia interna nula no ponto de referência. A escolha foi feita para corresponder como compostos também presentes na mistura não queimada: CO_2 , H_2O (vapor), O_2 e N_2 .

A energia interna de qualquer substância na mistura em equilíbrio químico é determinada pelo resfriamento da substância desde a temperatura de equilíbrio até a de referência obtendo-se assim a parte sensível da energia interna. A substância é então convertida, a volume constante em um ou mais dos componentes básicos (CO_2 , H_2O , O_2 , N_2) sendo obtido o calor de reação (que pode ser negativo ou positivo, conforme seja a reação endotérmica ou exotérmica).

Repetindo-se o processo para cada substância, a soma de todas dá a energia interna da mistura.

Para o cálculo da entropia repete-se processo semelhante.

Colocando num gráfico os resultados obtidos da maneira acima, obtemos diagramas como o da fig. 5.5.

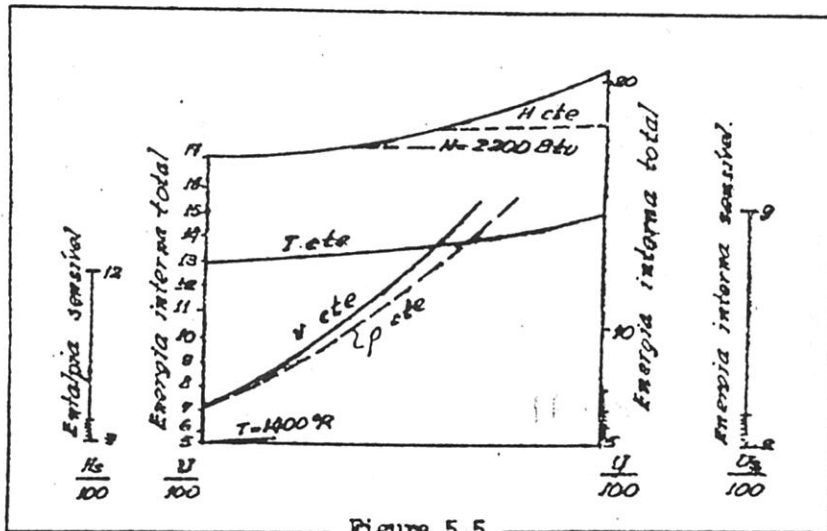


Figura 5.5

Note que os valores U e U_g (escala do lado direito), neste diagrama para mistura rica, não são iguais porque U contém além de U_g também a energia interna na forma latente química, pois há combustível presente na mistura.

Os diagramas para mistura quimicamente correta e para mistura pobre mostram que $U = U_g$, na região de baixas temperaturas porque as quantidades de combustível presente, como H_2 e CO , são muito pequenas.

A entalpia é obtida a partir de

$$H = U + A p_v$$

e

$$H_g = U_g + A p_v$$

5.4 - A combustão

Se no diagrama $U = f(T)$, que traçamos para mistura não queimada, somarmos o calor liberado na combustão, teremos o diagrama $U = f(T)$ para os gases queimados.

A curva OE é a curva de $U = f(T)$ para a queima completa da mistura. A diferença entre as curvas AB (de mistura não queimada) e CE (combustão completa) é o poder calorífico do combustível para cada temperatura.

A linha CE , que segue de perto a linha CD , é a curva representativa da função $U = f(T)$ para a

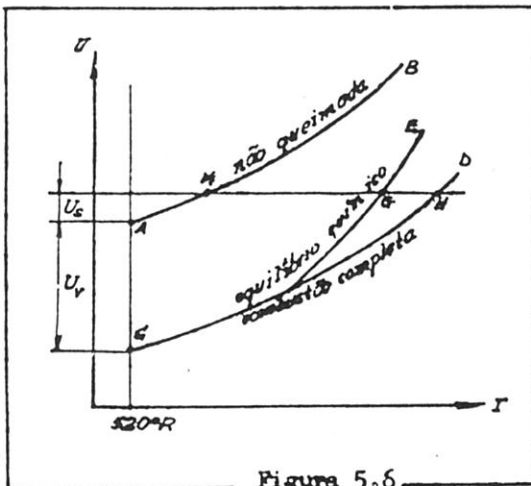


Figura 5.6

mistura queimada, mas não completamente e sim em função do equilíbrio químico (de acordo com a fig. 5.4). A curva de combustão com equilíbrio químico converge até a temperatura de $1600^\circ K$. Nessa temperatura diz-se que o equilíbrio químico congela. Verificou-se, em laboratório, que numa transfor

meção rápida os gases da combustão se encontram em equilíbrio químico de acordo com a fig. 5.4, mas que ao atingir a temperatura de 1600°K, esse equilíbrio congela, isto é, observa-se que a proporção, em volume, dos gases em temperaturas abaixo de 1600°K é a mesma que a essa temperatura. Verificou-se, posteriormente, que o equilíbrio congelado se manifesta em temperatura mais elevada até, mas para os problemas normais é perfeitamente razoável admitir 1600°K.

Já vimos que quando a mistura é queimada adiabaticamente a volume constante a transformação se faz com energia constante. De fato, pelo 1º princípio

$$Q - \Delta L = U_G - U_M = 0$$

$$U_G(\text{gases queimados}) = U_M(\text{mistura não queimada}) \quad (5.9)$$

Conhecendo a energia interna da mistura não queimada U_M e supondo uma mistura estequiométrica, por exemplo, de ar e combustível, existem 0,0665 kg de combustível presente por quilo de ar ou seja $(1 - f)$ 0,0665 kg de combustível é aspirado pelo motor.

O poder calorífico inferior da octana é 10.750 ... kcal/kg.

Portanto

$$U_V = U_A - U_C = 10.750 (1 - f) 0,0665 = 712 (1 - f) \text{ kcal} \quad (5.10)$$

ou

$$U_V = 19.270 (1 - f)(0,0665) = 1,281 (1 - f) \text{ Btu}$$

Por outro lado, de acordo com a equação (5.9)

$$U_G = U_V + U_S$$

O valor de U_V é obtido pela equação (5.10) e o de U_S do diagrama de compressão.

Quando o cálculo de U_V é feito para uma mistura com 110% de ar

$$U_V = 650 (1 - f) \text{ kcal} \quad (5.11)$$

ou

$$U_V = 1.166 (1 - f) \text{ Btu}$$

Para uma mistura com 85% de ar, os gases residuais conterão H_2 e CO de combustão incompleta que precisam ser considerados, porque irão se misturar com ar e combustível frescos. Admitindo que a energia química contida nesses gases é de 75 kcal por 1,0782 kg de mistura, o valor de U_V é

$$U_V = 840 (1 - f) + 75 f \text{ kcal} \quad (5.12)$$

ou

$$U_V = 1507 (1 - f) + 300 f \text{ Btu}$$

5.5 - Aplicações aos motores Diesel

As propriedades do fluido trabalhando num motor Diesel podem ser determinadas com auxílio do diagrama de mistura fraca. Embora só próximo da plena carga o diagrama represente a realidade pode ser utilizado com aproximações. As principais discrepâncias são:

- 1- O diagrama de compressão supõe uma mistura de ar e combustível ao passo que nos motores Diesel somente no fim da compressão é injetado o combustível;
- 2- O diagrama de compressão é baseado em $f = 10\%$ e nos motores Diesel $f = 2\%$;
- 3- A relação ar-combustível, no Diesel, varia com a carga;
- 4- A combustão pode ocorrer mais a pressão constante que os de explosão; além disso pode ocorrer num lado ou noutro da câmara.

Exercícios:

- 1) Ocorre combustão a volume constante de 1 lb de ar e combustível 10% pobre. A temperatura e pressão finais são $T = 4800^\circ R$ e $p = 100$ psia. Quais eram as condições antes da combustão?

Do diagrama de entropia para os gases queimados obtemos, para p e T ,

$$U = 1288 \text{ Btu} \quad (\text{energia interna total})$$

$$V = 29,6 \text{ cuft} \quad (\text{volume da mistura})$$

$$S = 0,662 \text{ Btu}/^\circ R \quad (\text{entropia})$$

$$H = 1650 \text{ Btu} \quad (\text{entalpia}).$$

A energia interna total é a soma da energia química e da energia sensível.

$$U_{\text{químico}} = h_i \times 0,0605 (1 - f)$$

com $f = 0$ e $h_i = 19.270 \text{ Btu/lb}$

$$U_q = 1.166 \text{ Btu}$$

A energia interna sensível, antes da combustão, pode agora ser obtida (veja 5.9)

$$U_{\text{total}_1} = U_{s_1} + U_{q_1} = U_{\text{total}_2}$$

onde o índice 1 \rightarrow antes da combustão
2 \rightarrow depois da combustão

$$U_{s_t} = U_{t_2} - U_{q_1} = 1288 - 1166 = 122 \text{ Btu}$$

Com as variáveis de estado U e V antes da combustão, entramos no diagrama de mistura não queimada (a influência de f é desprezível) e obtemos

$$T_1 = 1110^\circ\text{R}$$

Pela equação de Clapeyron, obtemos a pressão

$$P_1 = \frac{n R_o T_1}{V} \quad n = 0,0352 + 0,002 f$$

$$P_1 = \frac{0,0352 \times 1545 \times 1110}{19,6 \times 144} = 21,4 \text{ psia}$$

2) Um ensaio de motor forneceu os seguintes dados:

Ignição - 12° antes do PMS

Pressão nesse instante: 120 psia

Volume da câmara de combustão, nesse instante:

8 cu.in.

Por meio de fotografias através de uma janela na câmara de combustão, determinou-se que a combustão chegou ao fim 35° depois do PMS. Nesse instante, o volume da câmara era de 12 cu.in., e a pressão na mesma 250 psia. O trabalho

realizado durante a compressão foi computado através de diagramas obtidos com indicadores. Ele correspondeu a:

antes do PMS: 4 Btu
depois do PMS: 102 Btu

A relação ar-gasolina determinou-se como sendo de 15:1 e a carga admitida medida e calculada foi de $1,218 \times 10^{-3}$ lb/ciclo, com $0,122 \times 10^{-3}$ lb de gases residuais por ciclo.

Qual foi o calor perdido durante a combustão?

O fator 15:1 corresponde a 100% de ar. Como os diagramas de combustão são para 1 lb de ar, ou seja, 1,0665 lb de mistura, precisamos determinar a relação entre a massa de mistura da tabela e aquela admitida pelo motor:

$$FM = \text{fator de multiplicação} = \frac{1,0665}{0,001218 + 0,000122} = 796$$

O volume da câmara de combustão dum motor que admitiria 1 lb de ar por ciclo:

$$V_1 = \frac{FM \times cc}{12^3} = \frac{796 \times 8}{12^3} = 3,68 \text{ cuft}$$

$$V_2 = \frac{796 \times 12}{12^3} = 5,53 \text{ cuft}$$

Combustível admitido por ciclo:

$$\frac{\text{massa da carga fresca}}{1 + \text{relação AC}} = \frac{1,218 \times 10^{-3}}{1 + 15} = 7,6 \times 10^{-5} \text{ lb}$$

Ampliado para um motor correspondente à tabela, temos

$$\text{massa de combustível} = 796 \times 7,6 \times 10^{-5} = 0,0605 \text{ lb}$$

Para fins de verificação: Sabemos que a quantidade de combustível na proporção estequiométrica é de 0,0665 lb de combustível para 1 lb de ar. A fração de gases residuais, no nosso caso, é

$$f = \frac{0,122}{1,218 + 0,122} = 0,0896$$

A quantidade de combustível para $(1 - f)$ lb de ar,

é $0,0665 (1 - f) = 0,0665 \times 0,914 = 0,0605$ (confere)

A energia interna química desse combustível é

$$U_{q_1} = 0,0605 \times 19270 = 1165 \text{ Btu}$$

A temperatura no instante de ignição:

$pV = RT$ com $R = 0,381$ para 100% de ar e $f = 10\%$

$$T = \frac{120 \times 3,68}{0,381} = 1160^\circ R$$

Poderíamos calcular n

$$n = 0,0353 + 0,002 f = 0,03548$$

$$R = \frac{n R_o}{144} = \frac{0,03548 \times 1545}{144} \approx 0,381$$

∴ $T = \frac{pV}{n R_o} = \frac{120 \times 144 \times 3,68}{0,03548 \times 1545} = 1160^\circ R$

No diagrama de mistura 100% com $T = 1160^\circ R$ tira-

se

$$U_{B_1} = 135 \text{ Btu}$$

A energia total no fim da combustão:

$U = 715 \text{ Btu}$ (para $p = 250$ e $V = 5,53$)

Fazendo o balanço térmico

$Q = 715 - 1300 + 98 = -487 \text{ Btu}$ (o sinal indica calor perdido)

Calor perdido aparente:

$$\frac{-487}{1165} = 41,8\%$$

3) Motor Otto a plena carga.

Combustível: Octana com 85% de ar

Relação de compressão: $r = 6:1$

Pressão de admissão: $14,7 \text{ psia}$

Temperatura de admissão: $90^\circ F$ (gasolina completamente vaporizada)

Pressão de escape: 14,7 psia

A fração dos gases residuais, bem como a temperatura da mistura, têm que ser estimadas, para serem verificadas no fim do problema. Sejam:

$$f = 0,045$$

$$T_1 = 645^\circ\text{R} \text{ (temperatura da mistura no início da compressão)}$$

Admite-se:

combustão a v cte (2-3)

expansão 3-4 adiabática

compressão 1-2 adiabática

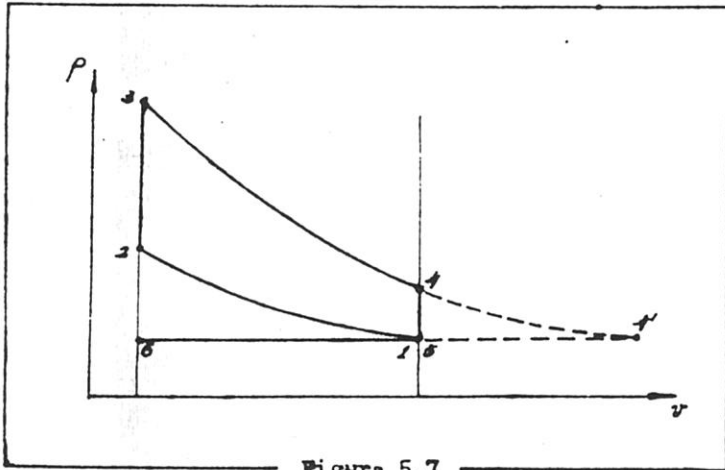


Figura 5.7

1) Compressão (1-2)

Partindo de T_1 e p_1 (645°R e $14,7$ psia), vem:

$$V_1 = \frac{n R_o T_1}{p_1} = \frac{(0,0354 + 0,004 \times 0,045) \times 1545 \times 645}{14,7 \times 144}$$

$$V_1 = 16,8 \text{ cuft}$$

$$U_{s_1} = f(T_1) = 25 \text{ Btu}$$

$$V_2 = \frac{V_1}{6} = \frac{16,8}{6} = 2,8 \text{ cuft}$$

$(T_1, V_1) \xrightarrow{\text{isocent. óptica}} (T_2, V_2)$; pelo diagrama

$$T_2 = 1150^\circ\text{R}$$

$$U_{s_2} = 135 \text{ Btu}$$

$$p_2 = \frac{n R_o T_2}{V_2} = \frac{0,354 \times 1545 \times 1150}{2,8 \times 144} = 156 \text{ psia}$$

2) Combustão (2-3)

$$U_V = 1507 (1 - f) + 300 f = 1507 \times 0,955 + 300 \times 0,045$$

$$U_V = 1453 \text{ Btu}$$

$$U_3 = U_{s_2} + U_V = 135 + 1453 = 1589 \text{ Btu}$$

$$V_3 = V_2 = 2,8 \text{ cuft}$$

Entrando com U_3 e V_3 no diagrama de combustão, obtemos

$$p_3 = 780 \text{ psia}$$

$$T_3 = 5000^\circ\text{R}$$

$$s_3 = 0,577 \text{ Btu/}^\circ\text{R}$$

3) Expansão (3-4)

No ponto 4 conhecemos $V_4 = V_1$ e $s_4 = s_3$.

Do diagrama, vem

$$p_4 = 80 \text{ psia}$$

$$T_4 = 3300^\circ\text{R}$$

$$U_4 = 1010 \text{ Btu}$$

4) Escoamento dos gases de escape (4-5)

$$p_5 = p_{4^*} = 14,7 \text{ psia}$$

$$S_5 = S_{4'} = S_4 = 0,577 \text{ Btu/}^\circ\text{R}$$

Do diagrama, vem

$$V_{4'} = 66 \text{ cuft}$$

$$T_{4'} = T_5 = 2325^\circ\text{R}$$

$$U_{4'} = 725 \text{ Btu}$$

$$U_{s_{4'}} = 433 \text{ Btu}$$

$$H_{s_{4'}} = 612 \text{ Btu}$$

A diferença entre $V_{4'}$ e $U_{s_{4'}}$ é a energia química contida nos gases de escape. No cálculo de U_c , em (2) assumimos para esse valor 300 Btu; o valor correto seria .. $725 - 433 = 292 \text{ Btu}$.

O volume em 5 é 16,8 cuft; logo,

$$(U_5) = \frac{V_5}{V_{4'}} U_{4'} = \frac{16,8}{66} \cdot 725 = 184 \text{ Btu}$$

$$(U_{s_5}) = \frac{V_5}{V_{4'}} U_{s_{4'}} = \frac{16,8}{66} \cdot 433 = 110 \text{ Btu}$$

$$(H_{s_5}) = \frac{V_5}{V_{4'}} H_{s_{4'}} = 0,255 \times 612 = 156 \text{ Btu}$$

(U_5) , (U_{s_5}) e (H_{s_5}) são as energias e a entalpia do gas remanente.

5) Escapamento (5-6)

$$V_6 = V_2 = 2,8 \text{ cuft}$$

$$r = \frac{V_2}{V_{4'}} = \frac{2,8}{60} = 0,0424$$

O valor estimado foi de 0,045, o que é suficientemente próximo da realidade.

6) Admissão (6-1)

A carga fresca de fração $(1 - f)$ é misturada a pressão constante com a fração f dos gases residuais:

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

$$h_e = H_{s_6} = H_{s_4} = 612 \text{ Btu}$$

$$h_a = H_{s_a} = f (\text{temperatura da carga nova}) = f(550) = 44 \text{ Btu}$$

$$h_m = 0,0424 \times 612 + 0,9576 \times 44 = 68 \text{ Btu}$$

Do diagrama de energia dos gases não queimados, vem

$$T_1 = f (h_m) = 635^\circ\text{R} \quad (\text{o valor admitido foi } 645^\circ\text{R})$$

7) Rendimento térmico

$$L = (U_3 - U_4) - (U_{s_2} - U_{s_1})$$

$$L = (1589 - 1010) - (136 - 25) = 468 \text{ Btu}$$

$$\eta_t = \frac{\sum L}{p_{c_i} \times F}$$

$$F = \text{peso do combustível admitido} = (1 - f) 0,0782 = 0,0749 \text{ lb}$$

$$\eta_t = \frac{468}{19.240 \times 0,0749} = 0,325 \rightarrow 32,5\%$$

8) Pressão média indicada (imep)

$$\text{imep} = \frac{\sum L}{144 (V_1 - V_2)} = \frac{468 \times 778}{144 (16,8 - 2,8)} = 180 \text{ psi}$$

9) Rendimento volumétrico

$$\eta_v = \frac{m_a}{m_t} = \frac{\text{ar admitido}}{\text{ar para encher o volume deslocado nas cond. atm.}}$$

$$m_a = (1 - f)$$

$$m_t = \frac{pV}{R_{\text{ar}} T} = \frac{14,7 \times 144 \times 14}{53,5 \times 520} = 1,065 \text{ lb}$$

$$\eta_v = \frac{0,9576}{1,065} = 0,899 \quad 89,9\%$$

A mistura ao ser comprimida se compõe de

ar novo $1 \text{ lb} \times (1 - f) = 0,9576 \text{ lb}$
 combustível novo $0,0782 (1 - f) = 0,0749 \text{ lb}$
 ar para formar residual $1 \text{ lb} \times f = 0,0424 \text{ lb}$
 comb." " " $0,0782 f = 0,0033 \text{ lb}$

$$\text{Total} = 1,0782 \text{ lb}$$

4) Motor Otto com carga parcial

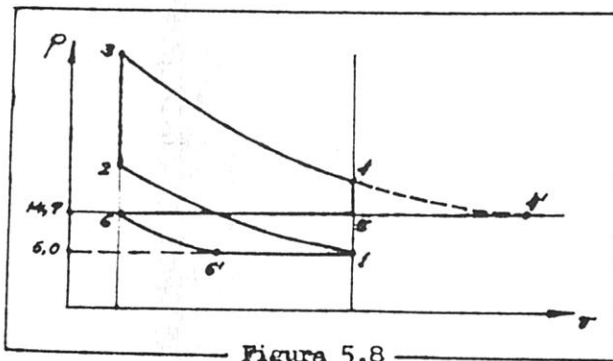


Figura 5.8

$$r_v = 6:1$$

$$P_6 = 14,7 \text{ psia}$$

$$P_1 = 5,0 \text{ psia}$$

1) Compressão (1-2)

Assumindo $f = 0,122$

$$T_1 = 810^\circ\text{R}$$

vem

$$U_{s_1} = 60 \text{ Btu}$$

$$n = 0,0354 + (0,004 \times 0,122) = 0,0359 \text{ moles}$$

$$V_1 = \frac{n R_o T_1}{P_1} = \frac{0,0359 \times 1545 \times 810}{5 \times 144} = 62,4 \text{ cuft}$$

$$V_2 = \frac{62,4}{6} = 10,4 \text{ cuft}$$

$$(V_1, T_1) \xrightarrow{\text{isoentr.}} (V_2, T_2) \quad \therefore \quad T_2 = 1410^\circ\text{R}$$

$$U_{s_2} = 196 \text{ Btu}$$

$$P_2 = \frac{n R_o T_2}{V_2} = \frac{0,359 \times 1545 \times 1410}{10,4 \times 144} = 51,5 \text{ psia}$$

2) Combustão (2-3)

$$V_2 = V_3 = 10,4 \text{ cuft}$$

$$U_V = 1507 (1 - f) + 300 f = 1507 \times 0,878 + 300 \times 0,122 = 1359 \text{ Btu}$$

donde

$$P_3 = 196 \text{ psia}$$

$$T_3 = 4850^\circ\text{R}$$

$$S_3 = 0,676 \text{ Btu}$$

3) Expansão (3-4)

$$S_4 = S_3$$

$$V_4 = V_1 = 62,4 \text{ cuft}$$

$$P_4 = 22 \text{ psia}$$

$$T_4 = 3310^\circ\text{R}$$

$$U_4 = 1010 \text{ Btu}$$

4) Expansão (4-4')

$$S_{4'} = S_3$$

$$P_{4'} = P_{4''} = 14,7 \text{ psia}$$

$$V_{4'} = 86 \text{ cuft}$$

$$T_{4''} = T_5 = 3080^\circ\text{R}$$

(compare com o ex.3)

$$U_{s_{4'}} = 640 \text{ Btu}$$

$$H_{s_{4'}} = 878 \text{ Btu}$$

$$z = \frac{V_2}{V_{4'}} = \frac{10,4}{86} = 0,121 \quad \text{confere com o valor admitido.}$$

5) Escape (4-5)

$$T_5 = T_{4'} = 3080^\circ R \quad p_5 = 14,7 \text{ psia}$$

$$(U_{s_5}) = \frac{V_5}{V_{4'}} U_{s_{4'}} = \frac{62,4}{86} \times 640 = 465 \text{ Btu}$$

$$(H_{s_5}) = \frac{V_5}{V_{4'}} H_{s_{4'}} = \frac{62,4}{86} \times 878 = 636 \text{ Btu}$$

Escape 5-6

$$T_6 = T_5 \quad v_6 = v_5 = v_{4'}$$

$$V_6 = 10,4 \text{ cuft}$$

$$6) \text{ Energia interna em 6} = f U_{s_{4'}} = 77,5 \text{ Btu}$$

$$\text{Entalpia em 6} = f H_{s_{4'}} = 106 \text{ Btu}$$

7) Expansão 6-6'

Para facilitar os cálculos, podemos continuar a expansão 3-4-4' até 5 psia.

Logo:

$$s_4 = s_{6'} = 0,676 \quad \text{e} \quad p_{6'} = 5 \text{ psia}$$

donde

$$V_{6'} = 210 \text{ cuft}$$

$$T_{6'} = 2420^\circ R$$

$$U_{s_{6'}} = 470 \text{ Btu}$$

$$H_{s_{6'}} = 660 \text{ Btu}$$

Como em 6 só temos uma fração f no cilindro, vem:

$$f V_{6'} = 25,4 \text{ cuft}$$

$$f U_{s_{6'}} = 57 \text{ Btu}$$

$$f H_{s_{6'}} = 80 \text{ Btu}$$

8) Admissão

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

com $h_a = f (460 + 80) = 42 \text{ Btu}$ vem

$$h_m = 116,8 \text{ Btu}$$

$\therefore T_1 = 805^\circ\text{R}$ (valor admitido 810°R)

9) Rendimento térmico

Trabalho na admissão

$$+ L_{66'} = f (U_{s_6} - U_{s_{6'}}) = 77,5 - 57 = 20,5 \text{ Btu}$$

$$+ L_{6'1} = \frac{p_1 (V_1 - f V_6)}{778} = 34 \text{ Btu}$$

Trabalho durante o escapamento

$$L_{56} = p_5 (f V_6 - V_4) = 14,7 (10,4 - 62,4) = - 141 \text{ Btu}$$

Trabalho na expansão e compressão

$$L = (U_3 - U_4) - (U_{s_2} - U_{s_1}) = (1555 - 1010) - (196 - 60) = 409 \text{ Btu}$$

O trabalho total é

$$L = 409 + 34 + 20,5 - 141 = 322,5 \text{ Btu/ciclo}$$

A perda devido ao estrangulamento da admissão é:

$$409 - 322,5 = 86,5 \text{ Btu}$$

Consumo de combustible por ciclo

$$(1 - f) \times 1,0782 = 0,0688 \text{ lb}$$

Rendimiento térmico

$$\eta_t = \frac{322,5}{\text{pci} \times 0,0688} = \frac{322,5}{19.240 \times 0,0688}$$

$$\eta_t = 0,244 \longrightarrow 24,4\%$$

10) imep

$$\text{imep} = \frac{322,5 \times 778}{(62,4 - 10,4) \times 144} = 33,5 \text{ psi}$$

11) Rendimiento volumétrico

$$m_t = \frac{pV}{RT} = \frac{14,7 \times 144,52}{53,3 \times 520} = 3,95$$

ar admitido num ciclo $\longrightarrow (1 - f) = 0,879 \text{ lb}$

$$\eta_v = \frac{0,875}{3,95} = 0,222 \longrightarrow 22,2\%$$
