

Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo



Aula 12 – Ciclo Otto e Ciclo Diesel

Ciclo de Potência dos Motores Alternativos



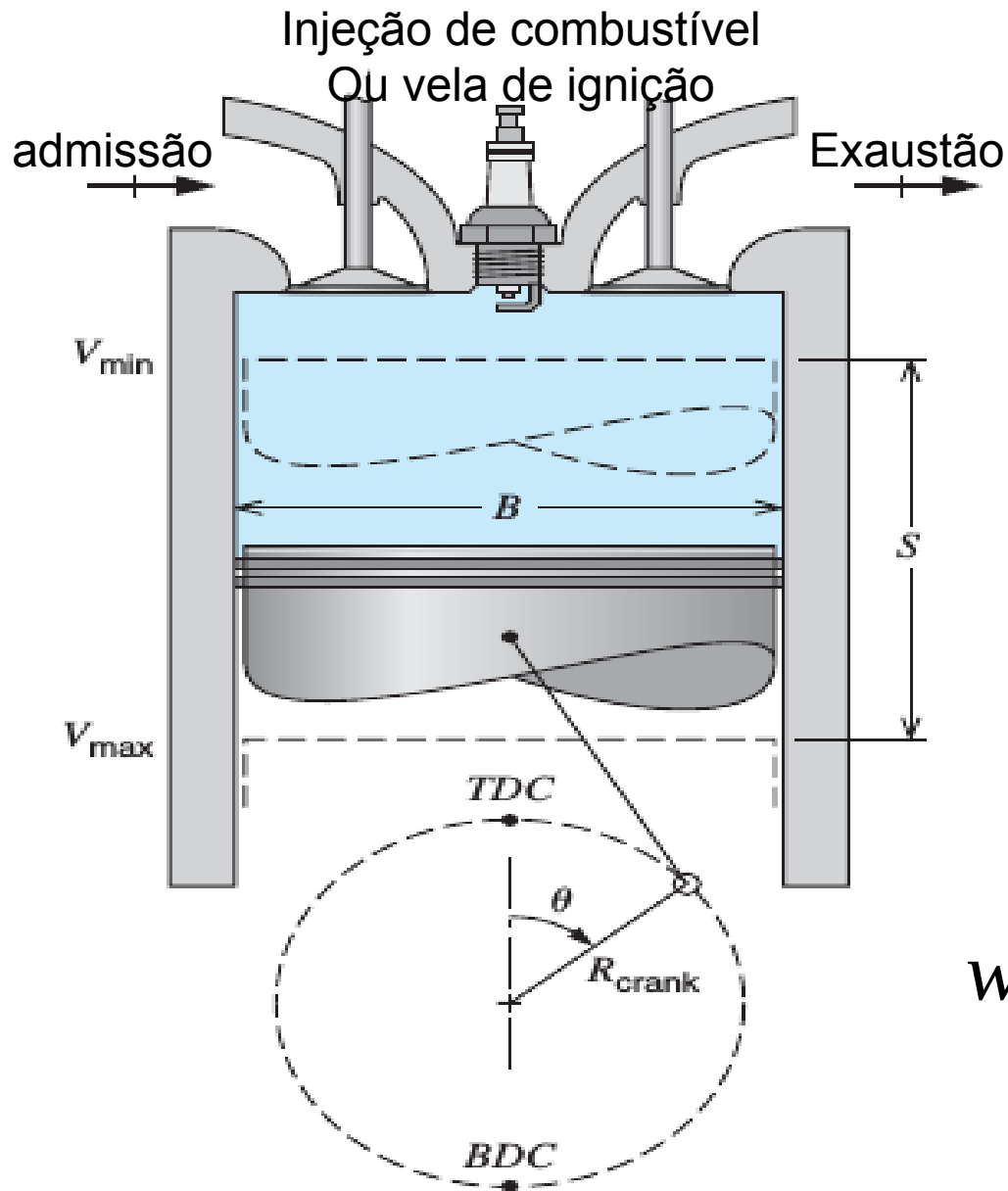
Deslocamento de todos cilindros:

$$V_{desl} = N_{ciclo} (V_{max} - V_{min}) = N_{ciclo} A_{ciclo} S$$

Taxa de compressão:

$$r_v = \frac{V_{max}}{V_{min}}$$

Ciclo de Potência dos Motores Alternativos



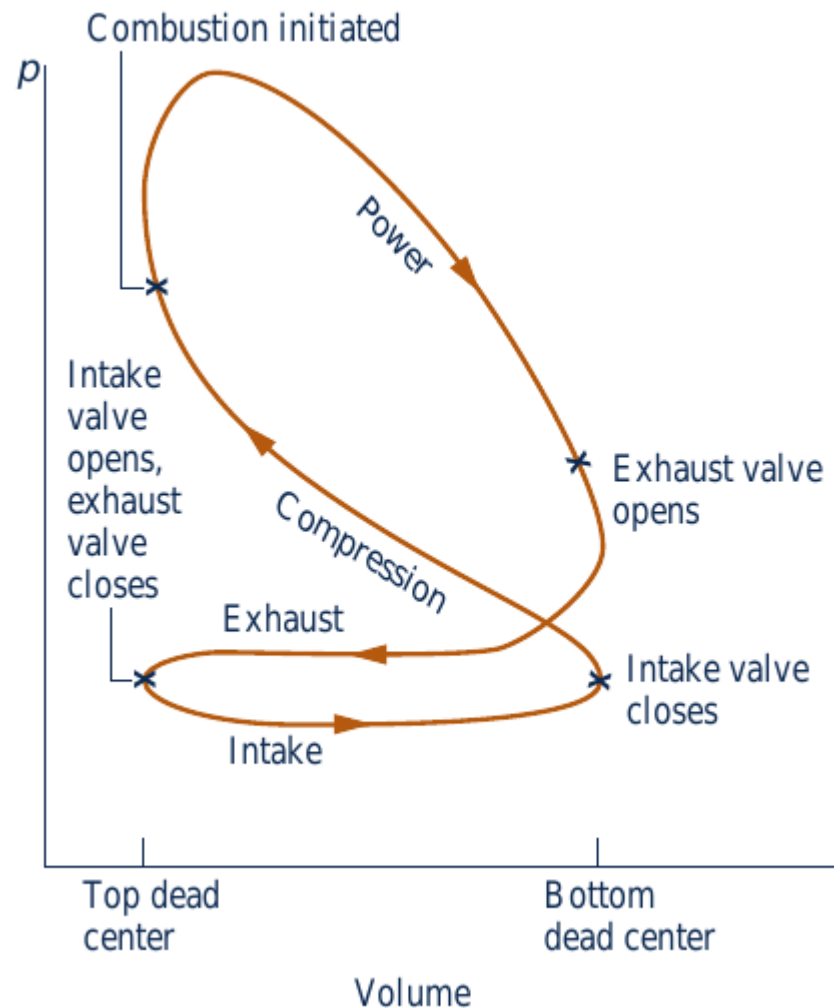
Trabalho líquido específico:

$$w_{liq} = \oint P dv = P_{mef} (v_{max} - v_{min})$$

Ciclo de Potência dos Motores Alternativos



Ciclo Mecânico X Ciclo Termodinâmico



Ciclo Otto

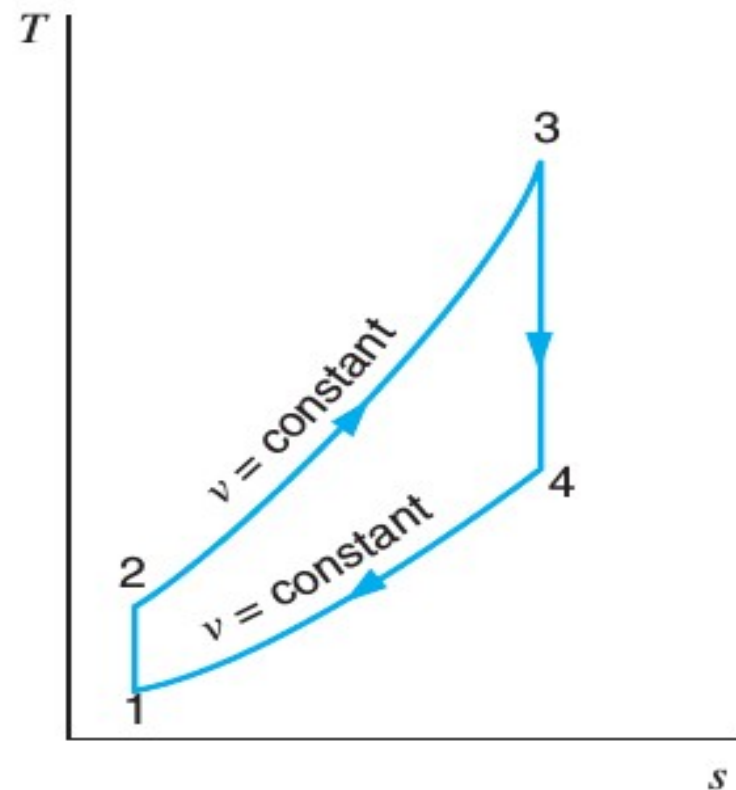
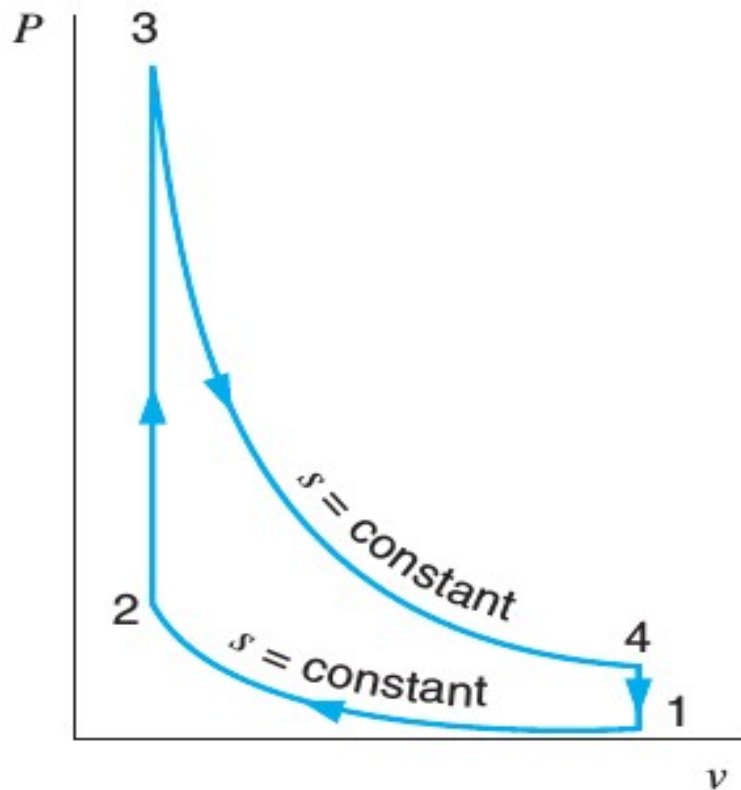


- Mistura ar/combustível é ignitada por centelha
- Aplicações até 250kW - automóveis
- Problema comum: Detonação – limita a razão de compressão possível



Ciclo Otto

- Ciclo Termodinâmico (internamente reversível)



Ciclo Otto



Rendimento térmico:

$$\eta_{\text{térmico}} = \frac{Q_H - Q_L}{Q_H} = \frac{(u_3 - u_2) - (u_4 - u_1)}{(u_3 - u_2)}$$

$$\eta_{\text{térmico}} = 1 - \frac{(u_4 - u_1)}{(u_3 - u_2)} = 1 - \frac{T_1 C_v \left(\frac{T_4}{T_1} - 1 \right)}{T_2 C_v \left(\frac{T_3}{T_2} - 1 \right)}$$

$$\eta_{\text{térmico}} = 1 - \frac{1}{r_v^{k-1}}$$

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

$$\frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{V_3}{V_4} \right)^{k-1} = \frac{1}{r_v^{k-1}}$$

então:

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

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

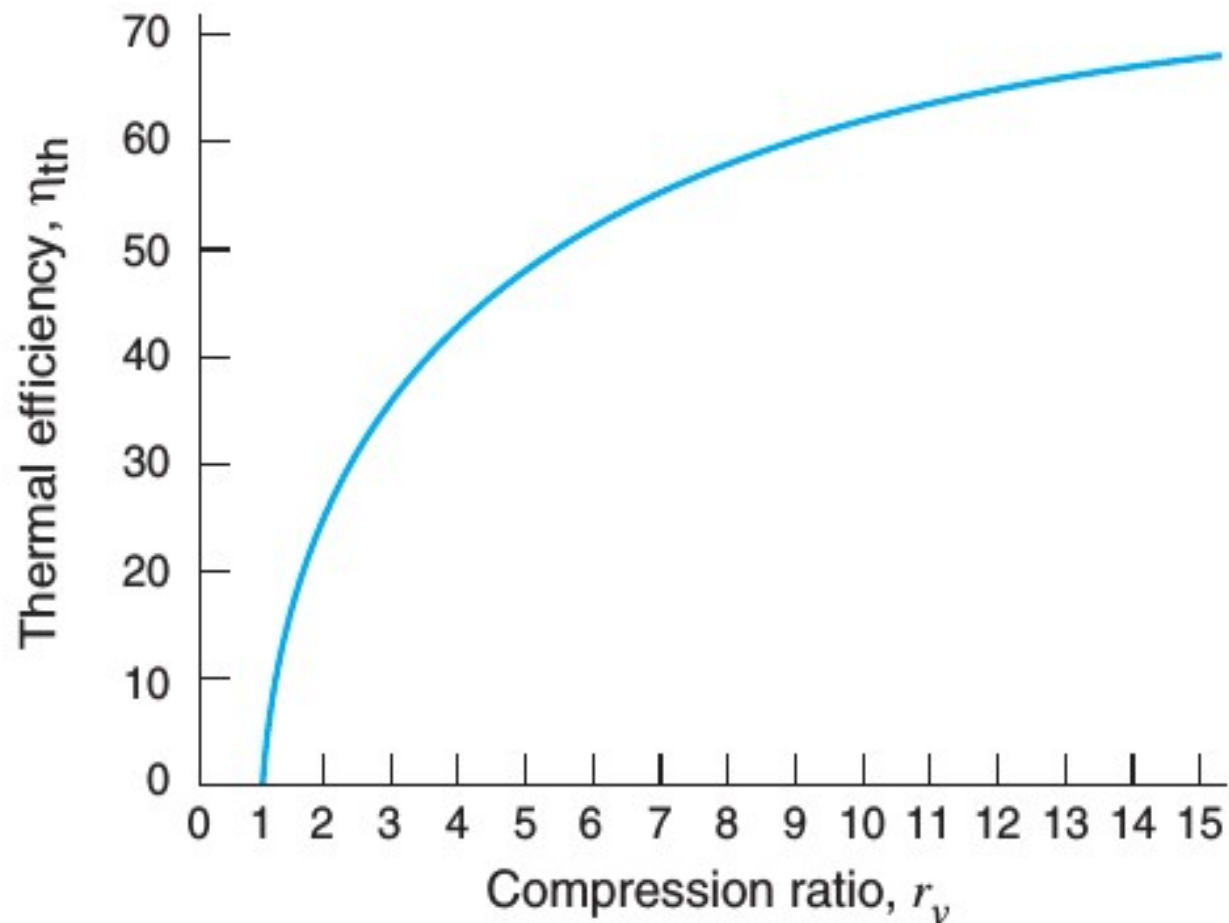
$$\frac{T_3}{T_2} = \frac{T_4}{T_1}$$

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

Ciclo Otto



Rendimento térmico x Taxa de compressão



Ciclo Otto



TABLE 10.2

The Otto Cycle Processes

Process	Energy Eq.	Entropy Eq.	Process Eq.
Compression	$u_2 - u_1 = -{}_1w_2$	$s_2 - s_1 = (0/T) + 0$	$q = 0, s_1 = s_2$
Combustion	$u_3 - u_2 = q_H$	$s_3 - s_2 = \int dq_H/T + 0$	$v_3 = v_2 = C$
Expansion	$u_4 - u_3 = -{}_3w_4$	$s_4 - s_3 = (0/T) + 0$	$q = 0, s_3 = s_4$
Heat rejection	$u_1 - u_4 = -q_L$	$s_1 - s_4 = -\int dq_L/T + 0$	$v_4 = v_1 = C$



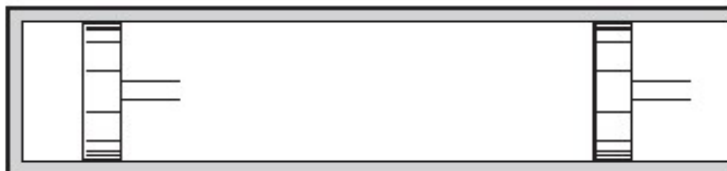
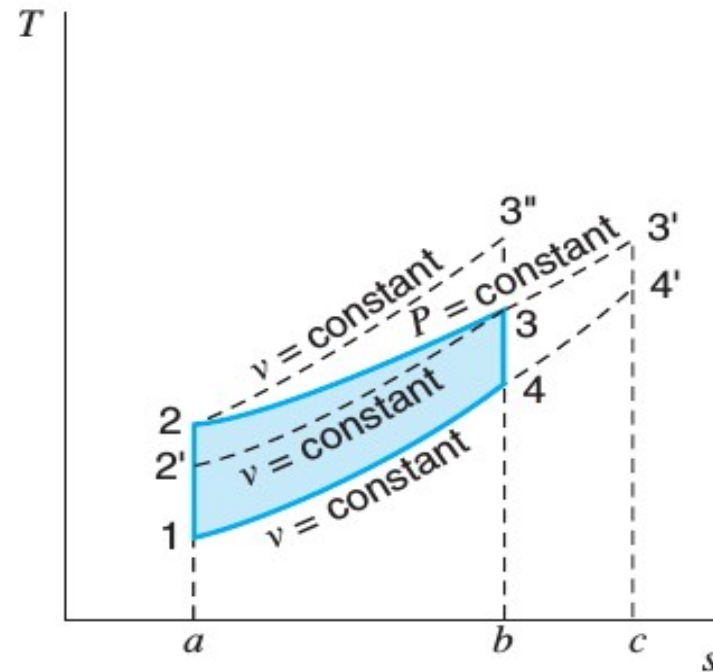
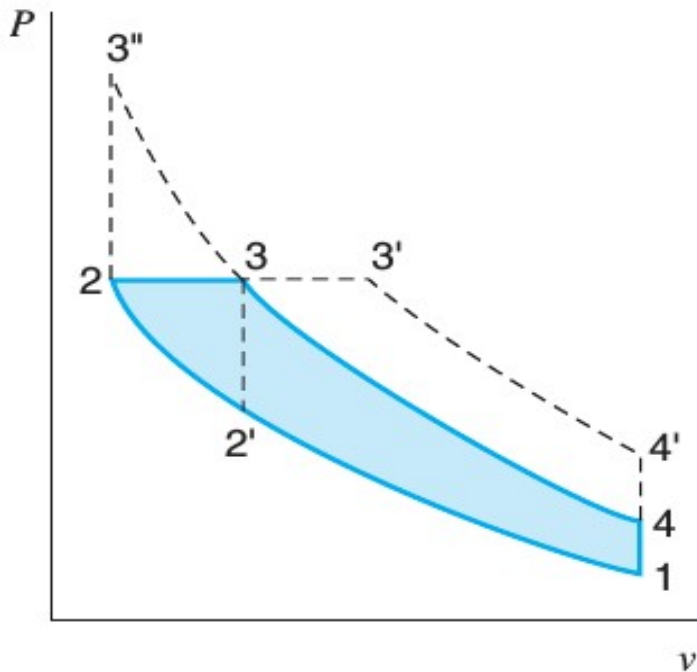
Ciclo Diesel

- Ar é comprimido até pressão alta o suficiente para auto-ignitar o combustível
- Combustível é injetado no final do processo de compressão do ar.
- Normalmente tem rendimento térmico melhor que o Otto e por isso usado para aplicações pesadas.



Ciclo Diesel

- Ignição por Compressão – fornecimento de calor (injeção de combustível): 2-3





Ciclo Diesel

Pela equação da energia temos:

$$q_H = u_3 - u_2 + p_2 w_3 = u_3 - u_2 + p_2 (v_3 - v_2) = h_3 - h_2$$

O rendimento do ciclo Diesel é dado por:

$$\eta_{\text{térmico}} = 1 - \frac{T_1 \left(\frac{T_4}{T_1} - 1 \right)}{kT_2 \left(\frac{T_3}{T_2} - 1 \right)}$$



Ciclo Diesel

- O rendimento é dado por:

$$\eta_{\text{térmico}} = \frac{W_{\text{liq}}/m}{{}_2 Q_3/m} = 1 - \frac{{}_4 Q_1/m}{{}_2 Q_3/m} = 1 - \frac{(u_4 - u_1)}{(h_3 - h_2)}$$

Usando a taxa de compressão e T_1 , temos:

$$v_{r2} = \frac{V_2}{V_1} v_{r1} = \frac{1}{r} v_{r1} \quad T_3 = \frac{V_3}{V_2} T_2 = r_c T_2$$

Onde: $r_c = \frac{V_3}{V_2}$ É chamado de razão de corte.

Desde que: $V_4 = V_1$, a relação isentrópica no processo 3-4 pode ser expressada desta forma:

$$\frac{V_4}{V_3} = \frac{V_4}{V_3} \frac{V_2}{V_2} = \frac{V_4}{V_2} \frac{V_2}{V_3} \quad \text{sabendo que } V_1 = V_4 \quad \frac{V_1}{V_2} \frac{V_2}{V_3} = \frac{r}{r_c}$$

Processo 2-3:
 $u_3 - u_2 = {}_2 q_3 - {}_2 w_3$
 ${}_2 w_3 = p(v_2 - v_3)$



Ciclo Diesel

Usando a relação anterior:

$$v_{r4} = \frac{V_4}{V_3} v_{r3} = \frac{r}{r_c} v_{r3}$$

$$u_1 - u_2 = C_v (T_4 - T_1)$$

$$h_3 - h_2 = C_p (T_3 - T_2)$$

Sabendo que:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{k-1} = r^{k-1} \quad \text{e} \quad \frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{V_3}{V_4} \right)^{k-1} = \left(\frac{r_c}{r} \right)^{k-1}$$

substituindo na equação do rendimento:

$$\eta_{\text{térmico}} = 1 - \frac{C_v T_1 \left(\frac{T_4}{T_1} - 1 \right)}{C_p T_2 \left(\frac{T_3}{T_2} - 1 \right)} = 1 - \frac{1}{r^{k-1}} \left[\frac{r_c^k - 1}{k(r_c - 1)} \right]$$

Ciclo Diesel

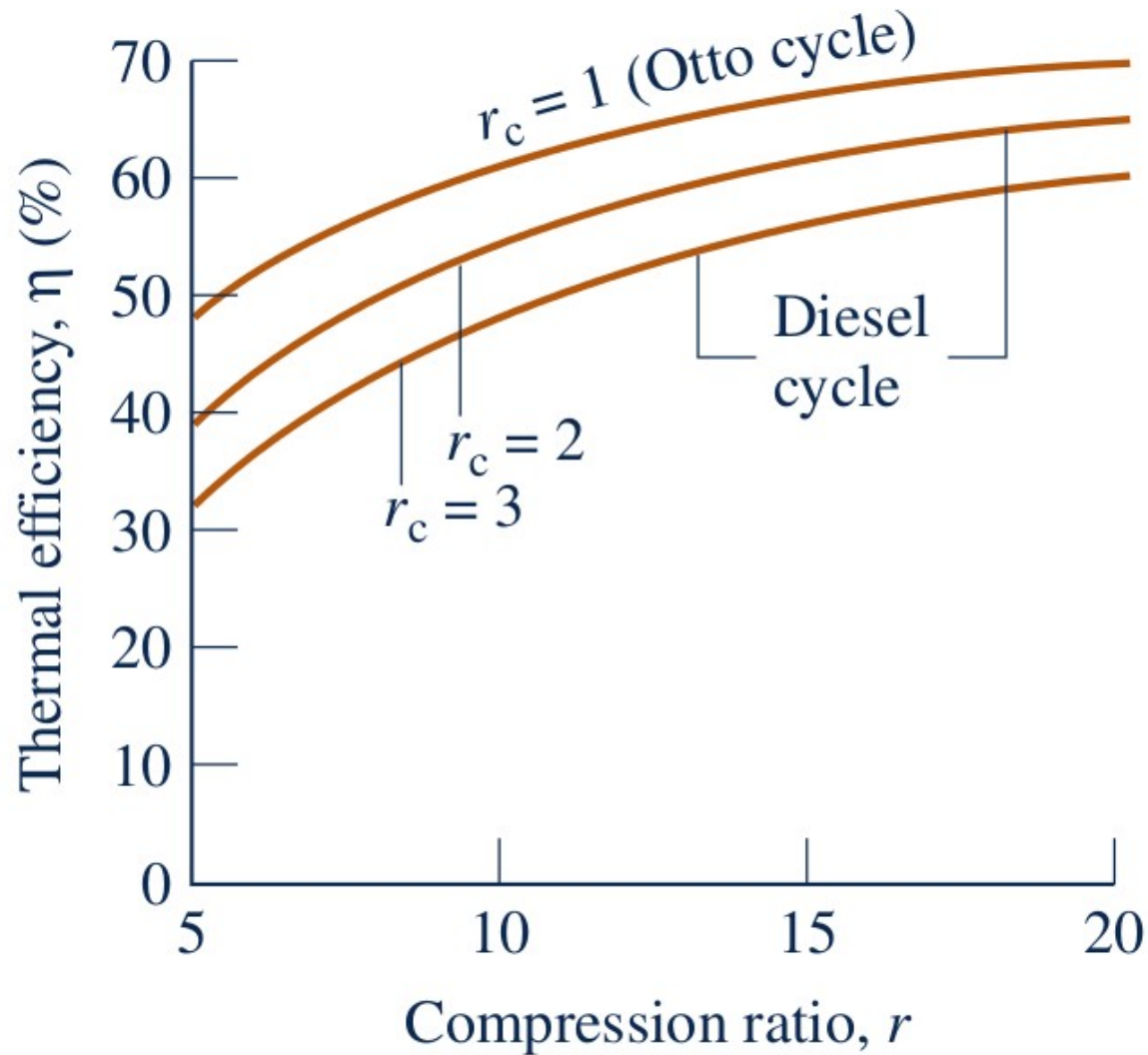


TABLE 10.3

The Diesel Cycle Processes

Process	Energy Eq.	Entropy Eq.	Process Eq.
Compression	$u_2 - u_1 = -{}_1W_2$	$s_2 - s_1 = (0/T) + 0$	$q = 0, s_1 = s_2$
Combustion	$u_3 - u_2 = q_H - {}_2W_3$	$s_3 - s_2 = \int dq_H/T + 0$	$P_3 = P_2 = C$
Expansion	$u_4 - u_3 = -{}_3W_4$	$s_4 - s_3 = (0/T) + 0$	$q = 0, s_3 = s_4$
Heat rejection	$u_1 - u_4 = -q_L$	$s_1 - s_4 = -\int dq_L/T + 0$	$v_4 = v_1 = C$

Ciclo Otto x Ciclo Diesel





Exercício – Ciclo Otto

- Exemplo 10.7
 - A relação de compressão num ciclo padrão a ar Otto é 10. No início do curso de compressão, a pressão é igual a 0,1MPa e a temperatura é 15°C. Sabendo que a transferência de calor ao ar, por ciclo é igual 1800kJ/kg de ar, determine:
 - 1. A pressão e a temperatura no estado final de cada processo do ciclo.
 - 2. O rendimento térmico
 - 3. A pressão média efetiva.

Exercício – Ciclo Otto



- Estado 1

$$P_1 = 0,1 \text{ MPa} \quad T_1 = 288,2 \text{ K}$$

- Modelo: gás ideal com calor específico constante e avaliado a 300K
- Análise: Equação da entropia para o processo de compressão 1-2

$$s_2 = s_1$$

Assim:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{k-1} \quad \text{E} \quad \frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^k$$

Exercício – Ciclo Otto



- Primeira Lei da termodinâmica

$$q_H = q_3 = u_3 - u_2 = c_v (T_3 - T_2)$$

- Segunda Lei da termodinâmica para o processo de expansão 3-4

$$s_4 = s_3$$

Assim:

$$\frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{V_4}{V_3} \right)^{k-1} \quad \text{E} \quad \frac{P_3}{P_4} = \left(\frac{V_4}{V_3} \right)^k$$

Exercício – Ciclo Otto



- Também

$$\eta_{\text{térmico}} = 1 - \frac{1}{r_v^{k-1}} \quad \text{E} \quad P_{\text{mef}} = \frac{W_{\text{liq}}}{V_1 - V_2}$$

- Solução:

$$v_1 = \frac{0,287 \times 288,2}{100} = 0,827 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$T_2 = T_1 r_v^{k-1} = 288,2 \times 10^{0,4} = 723 \text{ K}$$

$$P_2 = P_1 r_v^k = 0,1 \times 10^{1,4} = 2512 \text{ MPa}$$

$$V_2 = \frac{0,827}{10} = 0,0827 \text{ m}^3/\text{kg}$$



Exercício – Ciclo Otto

$${}_2q_3 = c_v(T_3 - T_2) = 1800 \text{ kJ/kg}$$

$$T_3 = T_2 + {}_2q_3 / C_v \longrightarrow T_3 - T_2 = \frac{1800}{0,717} = 2510 \text{ K}$$

Portanto: $T_3 = 3234 \text{ K}$

$$\frac{T_3}{T_2} = \frac{P_3}{P_2} = \frac{3234}{723,9} = 4,467 \quad \text{Portanto: } P_3 = 11,222 \text{ MPa}$$

$$\frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{V_4}{V_3} \right)^{k-1} = 10^{0,4} = 2,51 \quad \text{Portanto } T_4 = 1287,5 \text{ K}$$

$$\frac{P_3}{P_4} = \left(\frac{V_4}{V_3} \right)^k = 10^{1,4} = 25,12 \quad \text{Portanto } P_4 = 0,4467 \text{ MPa}$$



Exercício – Ciclo Otto

$$\eta_{\text{térmico}} = 1 - \frac{1}{r_v^{k-1}} = 1 - \frac{1}{10^{0,4}} = 0,602 = 60,2$$

Verificando o valor:

$${}_4 q_1 = c_v (T_1 - T_4) = 0,717 (288,2 - 1287,5) = -716,5 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta_{\text{térmico}} = 1 - \frac{716,5}{1800} = 0,602 = 60,2$$

$$w_{liq} = 1800 - 716,5 = 1083,5 \text{ kJ/kg}$$

$$P_{mef} = \frac{w_{liq}}{v_1 - v_2} = \frac{1083,5}{(0,827 - 0,0827)} = 1456 \text{ kPa}$$

Exercício – Ciclo Diesel



- Exemplo 12.8
- Um ciclo padrão a ar Diesel apresenta relação de compressão igual a 20 e o calor transferido ao fluido de trabalho, por ciclo, é 1800kJ/kg. Sabendo que no início do processo de compressão, a pressão é igual a 0,1MPa e a temperatura é 15 °C, determine:
 - 1. A pressão e a temperatura em cada ponto do ciclo.
 - 2. O rendimento térmico
 - 3. A pressão média efetiva

Exercício – Ciclo Diesel



- Estado 1

$$P_1 = 0,1 \text{ MPa} \quad T_1 = 288,2 \text{ K}$$

- Modelo: gás ideal com calor específico constante e avaliado a 300K
- Análise: Equação da entropia para o processo de compressão 1-2

$$s_2 = s_1$$

Assim:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{k-1} \quad \text{E} \quad \frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^k$$

Exercício – Ciclo Diesel



- Primeira Lei da termodinâmica para o processo

2-3

$$q_{H=2} q_3 = c_p (T_3 - T_2)$$

- Segunda Lei da termodinâmica para o processo de expansão 3-4

$$s_4 = s_3$$

Assim:

$$\frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{V_4}{V_3} \right)^{k-1}$$

Exercício – Ciclo Diesel



- Também

$$\eta_{\text{térmico}} = \frac{W_{\text{liq}}}{q_H} \quad \text{E} \quad P_{\text{mef}} = \frac{W_{\text{liq}}}{v_1 - v_2}$$

- Solução:

$$v_1 = \frac{0,287 \times 288,2}{100} = 0,827 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$v_2 = \frac{v_1}{20} = \frac{0,827}{20} = 0,04135 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{k-1} = 20^{0,4} = 3,3145 \rightarrow T_2 = 955,2 \text{ K}$$

Exercício – Ciclo Diesel



$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^k = 20^{1,4} = 66,29 \rightarrow P_2 = 6,629 \text{ MPa}$$

$$q_H = {}_2q_3 = c_p (T_3 - T_2) = 1800 \text{ kJ/kg}$$

$$T_3 - T_2 = \frac{1800}{1,004} = 1793 \text{ K} \quad \text{Portanto: } T_3 = 2748 \text{ K}$$

$$\frac{V_3}{V_2} = \frac{T_3}{T_2} = \frac{2748}{955,2} = 2,8769 \quad \text{Portanto: } v_3 = 0,11896 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{0,827}{0,11896} \right)^{0,4} = 2,1719 \quad \text{Portanto: } T_4 = 1265 \text{ K}$$

Exercício – Ciclo Diesel



$$q_L = {}_1q_4 = c_v(T_1 - T_4) = 0,717(288,2 - 1265) = -700,4 \text{ kJ/kg}$$

$$w_{liq} = 1800 - 700,4 = 1099,6 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta_{térmico} = \frac{w_{liq}}{q_H} = \frac{1099,6}{1800} = 61,1$$

$$P_{mef} = \frac{w_{liq}}{v_1 - v_2} = \frac{1099,6}{(0,827 - 0,04135)} = 1400 \text{ kPa}$$