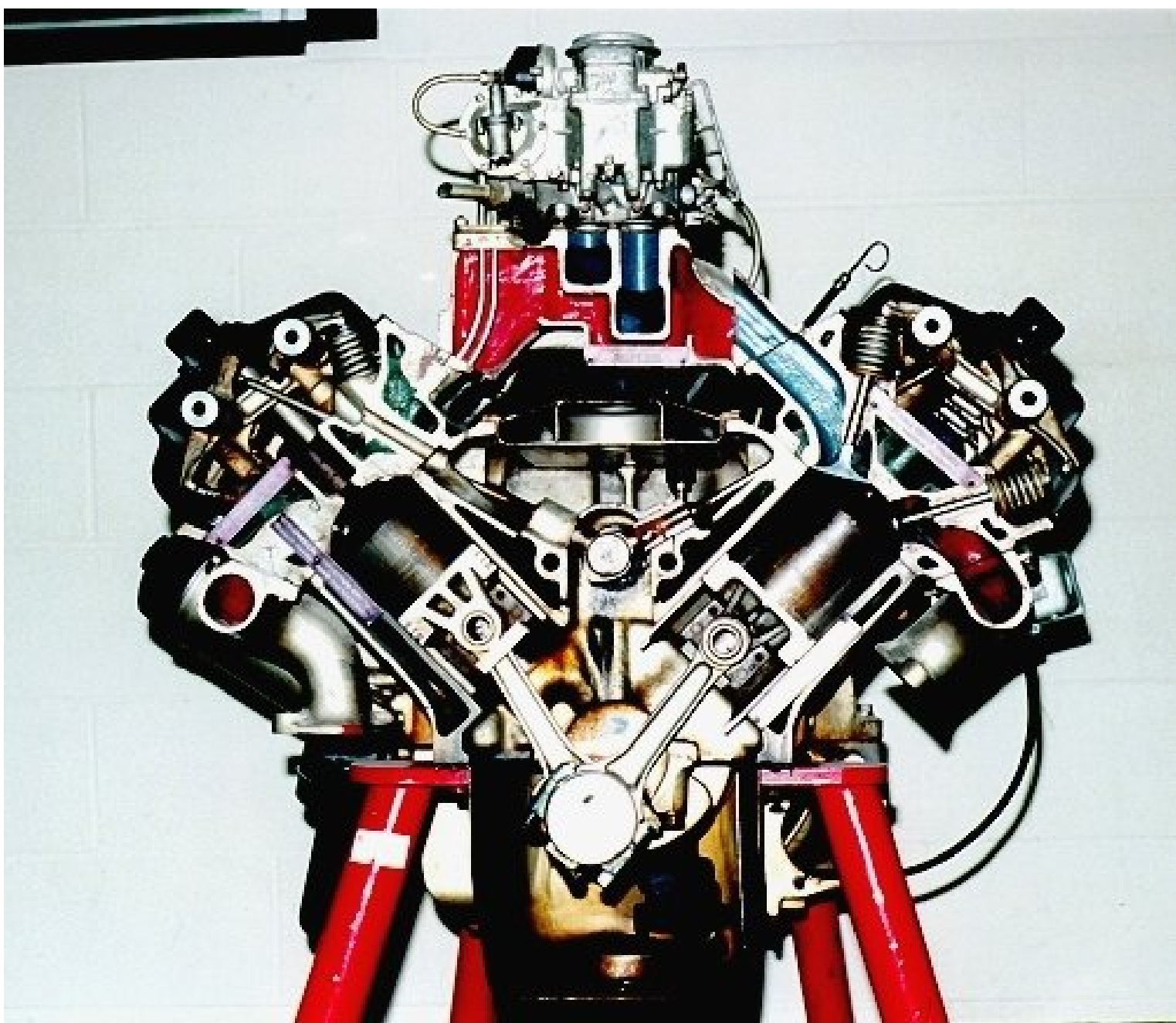


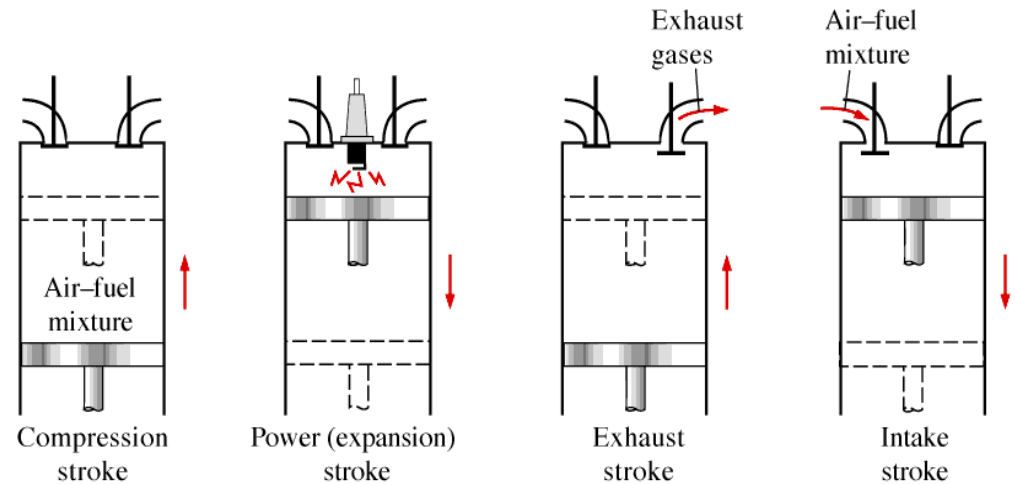
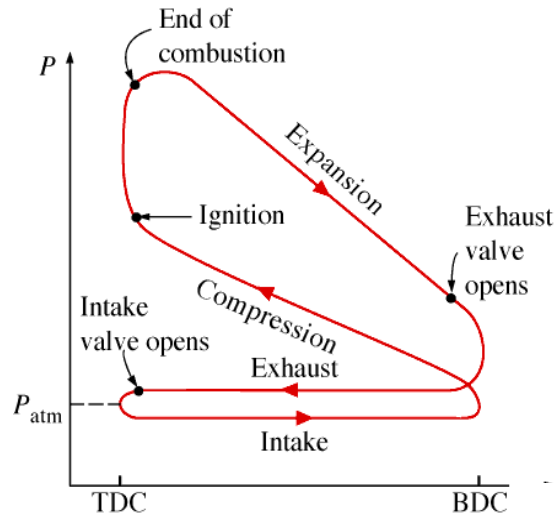
# Ciclo de potência a gás

- **Ciclo de potência: ciclo durante o qual uma quantidade líquida de trabalho é produzida**
- **Ciclo a gás: ciclo no qual o fluido de trabalho permanece no estado gasoso**

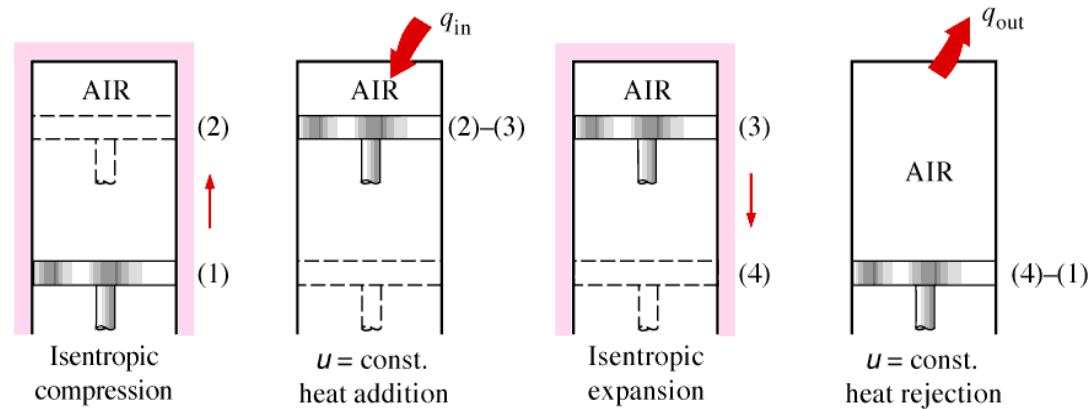
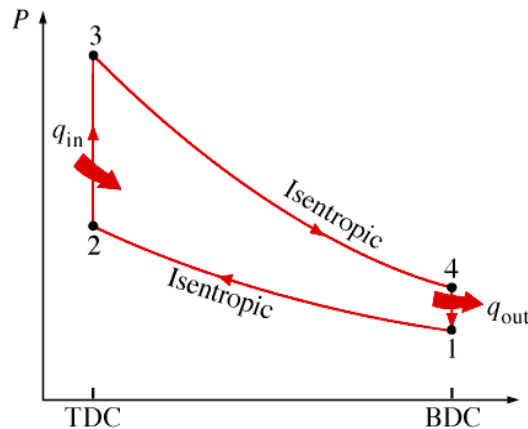


Inside view of a V-8 gasoline engine.

# Ciclos real e ideal em motores à explosão por centelha



(a) Actual four-stroke spark-ignition engine



(b) Ideal Otto cycle

# Ciclo padrão a ar

- Modelo simplificado para análise
- Assume que fluido de trabalho passa por ciclo termodinâmico

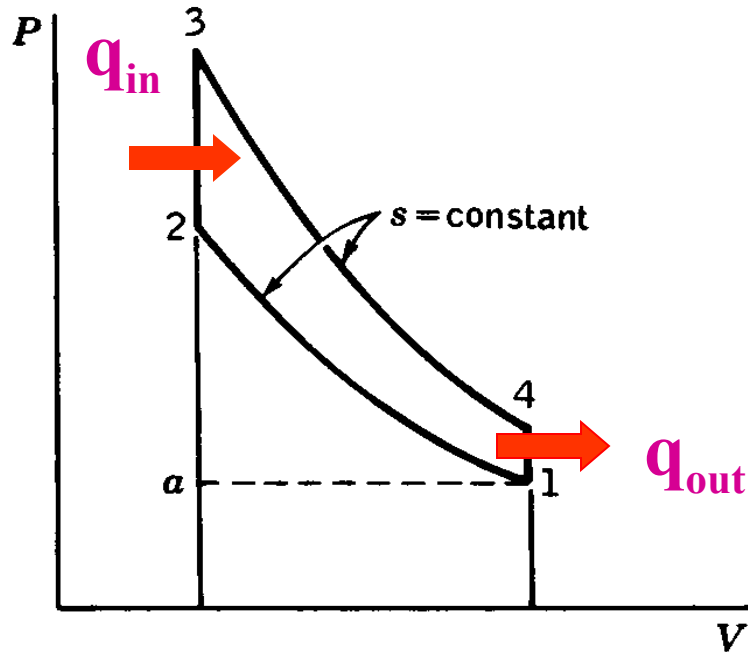
# Ciclo padrão a ar

- Características:
  - Ar é fluido de trabalho para todo o ciclo
    - Considerado gás ideal
  - Não há processos de admissão e exaustão
    - O mesmo ar permanece dentro do motor
  - Combustão é substituída por aquecimento proveniente de fonte externa
  - Descompressão final é substituída por um resfriamento rápido
  - Todos os processos são internamente reversíveis
  - Calor especif. Ar = cte

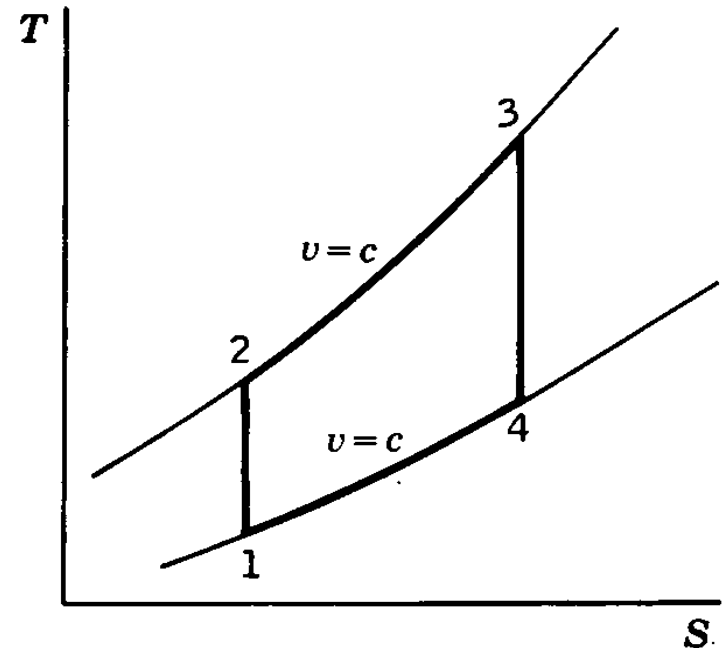
# Ciclo Otto

- Ciclo idealizado composto de 4 Processos internamente reverssíveis:
  - 1 → 2 compressão a  $s=cte$  (PMI → PMS)
  - 2 → 3 adição de calor a  $v=cte$  (no PMS)
    - Simula ignição e combustão
    - Assume que adição de calor ocorre instantaneamente com pistão no PMS
  - 3 → 4 expansão a  $s=cte$  (PMS → PMI)
  - 4 → 1 rejeição de calor a  $v=cte$  (no PMI)
- É modelo simplificado de motores ICE

# Ciclo Otto



**Diagrama P-V  
(trabalho)**



**Diagrama T-S  
(transf. de calor)**

# Ciclo Otto

- Para análise “Ar Frio” e considerando  $\Delta KE = \Delta PE = 0$

$$\frac{-W_{comp}}{m} = \frac{{}_1W_2}{m} = \Delta u = c_v(T_1 - T_2)$$

$$\frac{Q_{ent}}{m} = \frac{{}_2Q_3}{m} = \Delta u = c_v(T_3 - T_2)$$

$$\frac{W_{sai}}{m} = \frac{{}_3W_4}{m} = \Delta u = c_v(T_3 - T_4)$$

$$\frac{-Q_{sai}}{m} = \frac{{}_4Q_1}{m} = \Delta u = c_v(T_1 - T_4)$$



# Ciclo Otto

$$\frac{W_{ciclo}}{m} = \frac{W_{sai} - W_{comp}}{m} = c_v [(T_3 - T_4) - (T_2 - T_1)]$$

ou

$$\frac{W_{ciclo}}{m} = \frac{Q_{ciclo}}{m} = \frac{Q_{ent} - Q_{sai}}{m} = c_v [(T_3 - T_2) - (T_4 - T_1)]$$

Logo, para a eficiência térmica:

$$\eta = \frac{W_{ciclo}}{Q_{ent}} = \frac{Q_{ent} - Q_{sai}}{Q_{ent}} = 1 - \frac{Q_{sai}}{Q_{ent}} = 1 - \frac{(T_4 - T_1)}{(T_3 - T_2)}$$

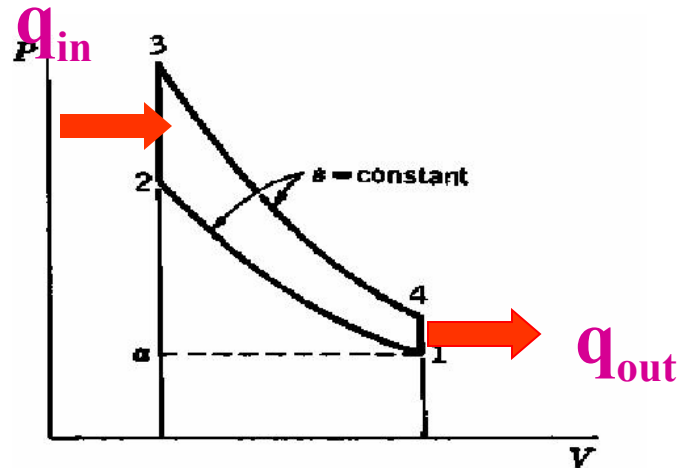
# Ciclo Otto

- Adição de calor 2-3  $Q_H = mC_V(T_3 - T_2)$
- Remoção de calor 4-1  $Q_L = mC_V(T_4 - T_1)$

$$\eta = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{mC_V(T_4 - T_1)}{mC_V(T_3 - T_2)}$$

- Ou, em termos de temperaturas

$$\eta = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{T_1(T_4/T_1 - 1)}{T_2(T_3/T_2 - 1)}$$

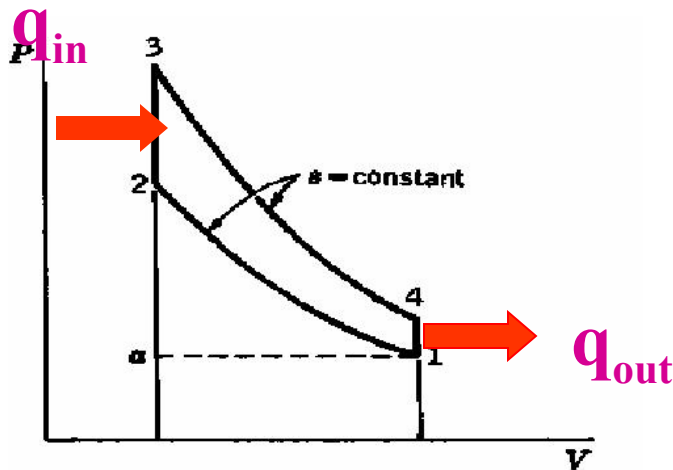


# Ciclo Otto

- 1-2 e 3-4 são processos adiabáticos: relações entre T e V

$$\frac{T_2}{T_1} = \underbrace{\left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1} = \left( \frac{V_4}{V_3} \right)^{\gamma-1}}_{\text{SAME VOLUME RATIO}} = \frac{T_3}{T_4} \Rightarrow \frac{T_2}{T_1} \equiv \frac{T_3}{T_4}$$

$$\eta = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{1}{(r)^{\gamma-1}}; \quad r = \frac{V_1}{V_2}$$



# Performance do ciclo com hipótese de ar frio

$$\eta_{th, Otto} = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{1}{r^{k-1}}$$

Parece a eficiência de Carnot mas não é!  $T_{low}$  e  $T_{high}$  não são constantes.

Quais são as limitações desta expressão?

# Eficiência térmica de um ciclo Otto ideal

- Com a **hipótese de ar frio**, a eficiência térmica do ciclo é

$$\eta_{th, Otto} = 1 - \frac{1}{r^{k-1}}$$

onde  $r$  é a taxa de compressão e  $k$  é a razão de calores específicos  $C_p / C_v$ .

# Eficiência térmica do ciclo Otto

$$\eta_{th, Otto} = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{1}{r^{k-1}}$$

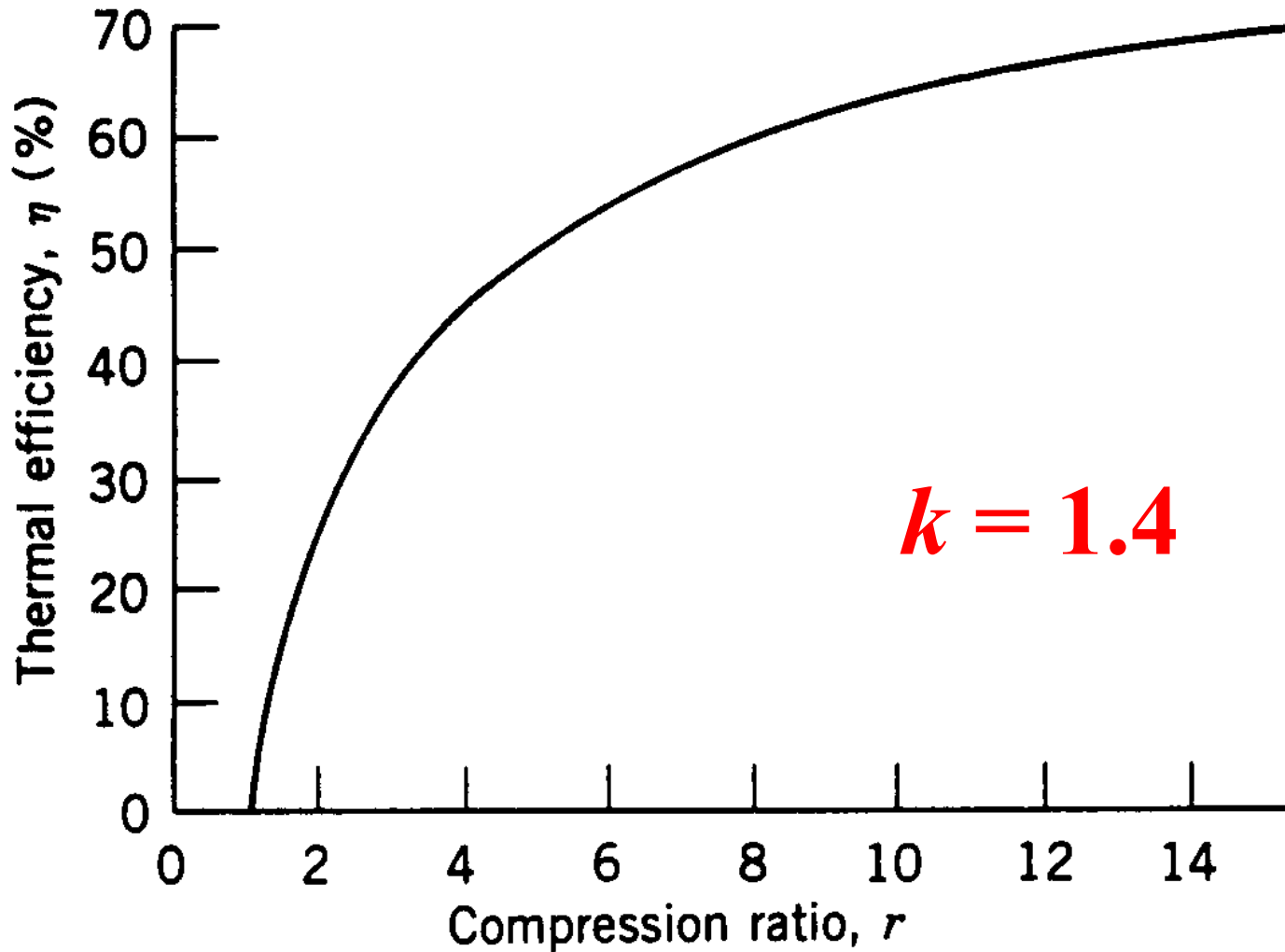
- Aumento da taxa de compressão aumenta a eficiência
  - É vantajoso para motores de combustão interna trabalharem com  $r$  elevado
- Está de acordo com uma análise baseado nas temperaturas, pois:
  - Aumento diferença entre temperaturas na entrada e na saída  $\Rightarrow \uparrow \eta$

# Limitações da eficiência

$$\eta_{th, Otto} = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{1}{r^{k-1}}$$

- Se  $r$  for muito grande
  - $T_{ar}$  excede  $T_{ignição}$  e ocorre ignição espontânea quando pistão se aproxima do PMS
  - Normalmente se utiliza  $9 < r < 10$

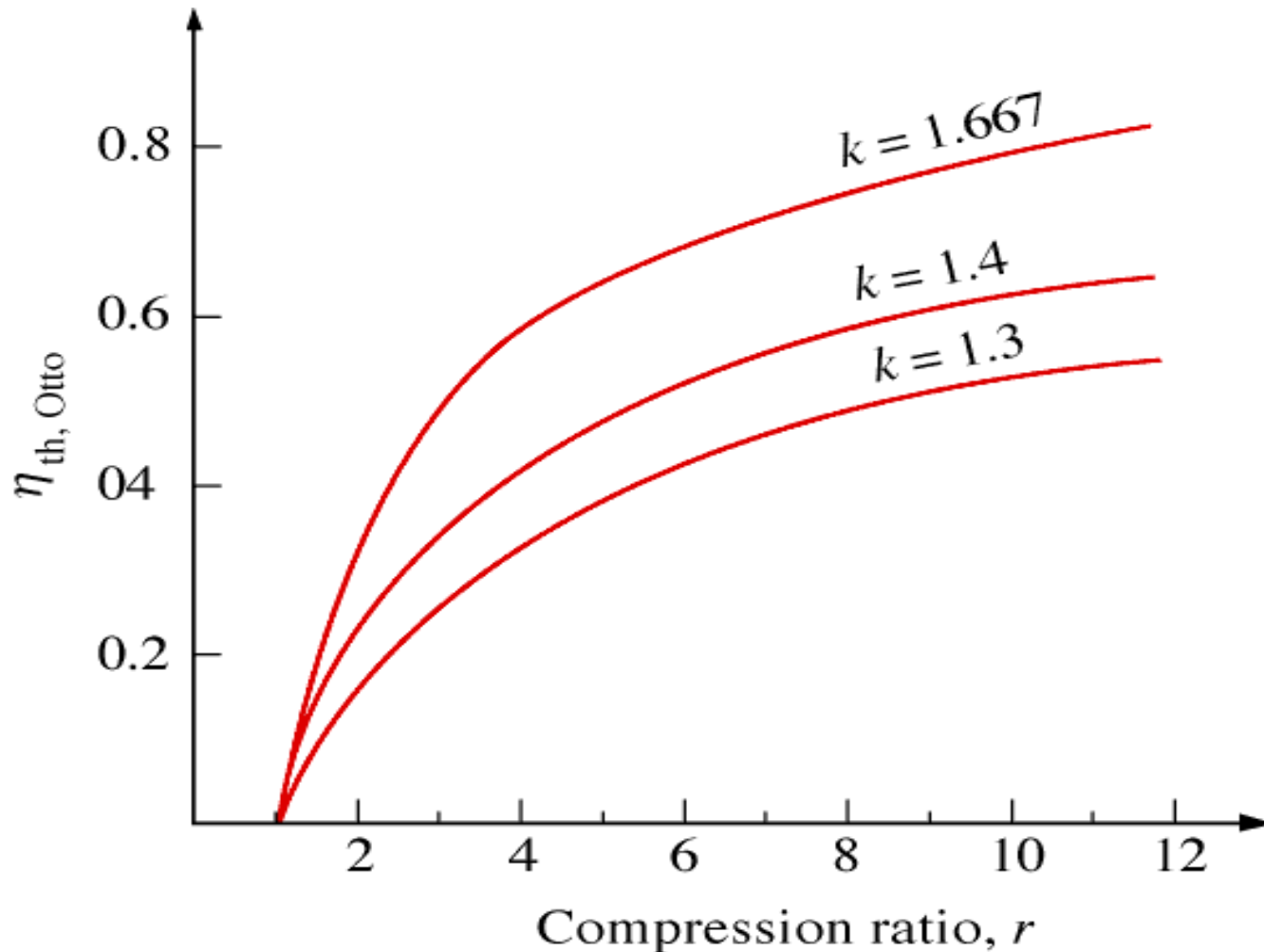
# Efeito da taxa de compressão na eficiência do ciclo Otto





# Ciclo Otto

A eficiência térmica do ciclo Otto aumenta com a razão de calores específicos  $k$  do fluido de trabalho



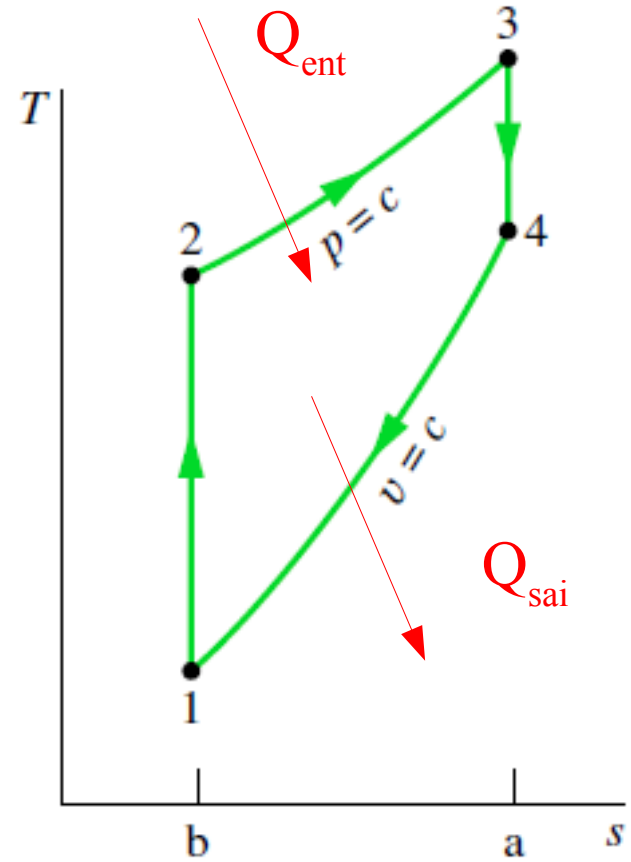
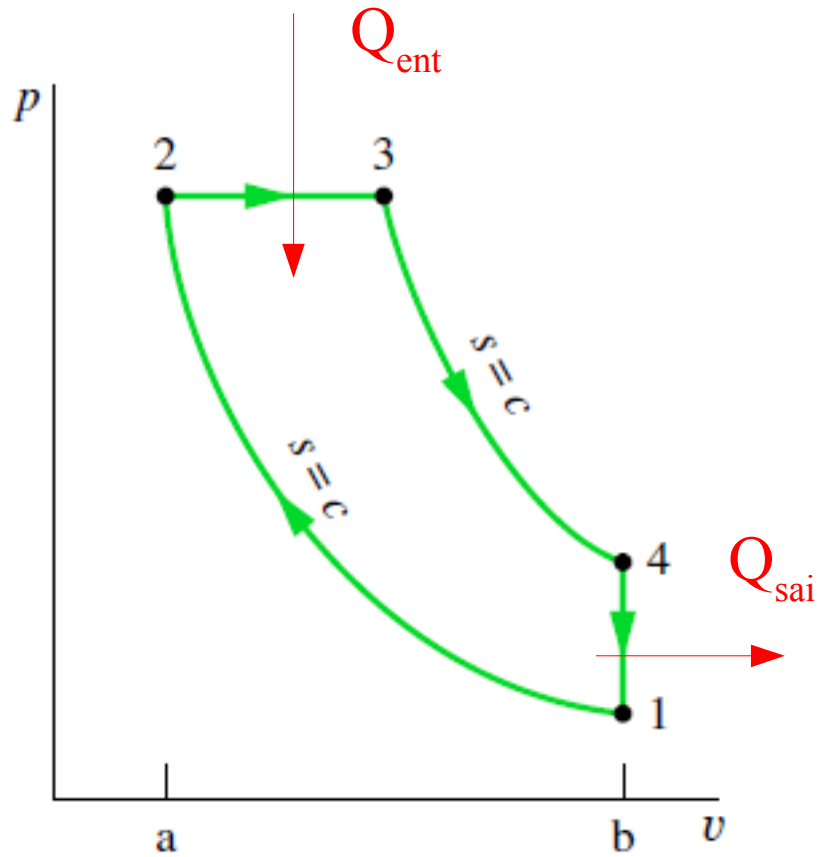
# Ciclo Diesel

- Este ciclo modela os motores ICO
- Óleo Diesel é combustível normalmente utilizado
- Diferença em relação ao Otto:
  - Calor é adicionado à  $P=\text{cte}$
- Ideia: se  $r$  for suficientemente grande
  - Comprime-se o ar antes de se injetar combustível
  - Combustível é injetado ao final da compressão
  - $T_{\text{ar}}$  excede  $T_{\text{ignição}}$  e ocorre ignição espontânea quando pistão se aproxima do PMS
  - Não é necessário centelha
  - OBS: para óleo Diesel,  $r \geq 14$

# Ciclo Diesel

- Ciclo idealizado composto de 4 Processos internamente reversíveis:
  - 1 → 2 compressão a  $s=\text{cte}$  (PMI → PMS)
  - 2 → 3 adição de calor a  $P=\text{cte}$ 
    - Simula injeção de combustível e combustão
  - 3 → 4 expansão a  $s=\text{cte}$  (posição → PMI)
  - 4 → 1 rejeição de calor a  $v=\text{cte}$  (no PMI)
- É modelo simplificado de motores ICO

# Ciclo Diesel



# Ciclo Diesel

- Para análise “Ar Frio” e considerando  $\Delta KE = \Delta PE = 0$

$$\frac{-W_{comp}}{m} = \frac{{}_1W_2}{m} = \Delta u = c_v(T_1 - T_2)$$

$$\frac{W_{sai\ parte1}}{m} = \frac{{}_2W_3}{m} = P(v_3 - v_2)$$

$$\frac{W_{sai\ parte2}}{m} = \frac{{}_3W_4}{m} = \Delta u = c_v(T_3 - T_4)$$

$$\frac{Q_{ent}}{m} = \frac{{}_2Q_3}{m} = \Delta u + P\Delta v = \Delta h = c_p(T_3 - T_2)$$

$$\frac{-Q_{sai}}{m} = \frac{{}_4Q_1}{m} = \Delta u = c_v(T_1 - T_4)$$

# Ciclo Diesel

$$\frac{W_{ciclo}}{m} = \frac{Q_{ciclo}}{m} = \frac{Q_{ent} - Q_{sai}}{m} = c_p(T_3 - T_2) - c_v(T_4 - T_1)$$

Logo, para a eficiência térmica:

$$\eta = \frac{W_{ciclo}}{Q_{ent}} = \frac{Q_{ent} - Q_{sai}}{Q_{ent}} = 1 - \frac{Q_{sai}}{Q_{ent}} = 1 - \frac{c_v(T_4 - T_1)}{c_p(T_3 - T_2)}$$

# Ciclo Diesel

- Define-se razão de corte:  $r_c = \frac{V_3}{V_2}$

- E, para processos isentrópicos:

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

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

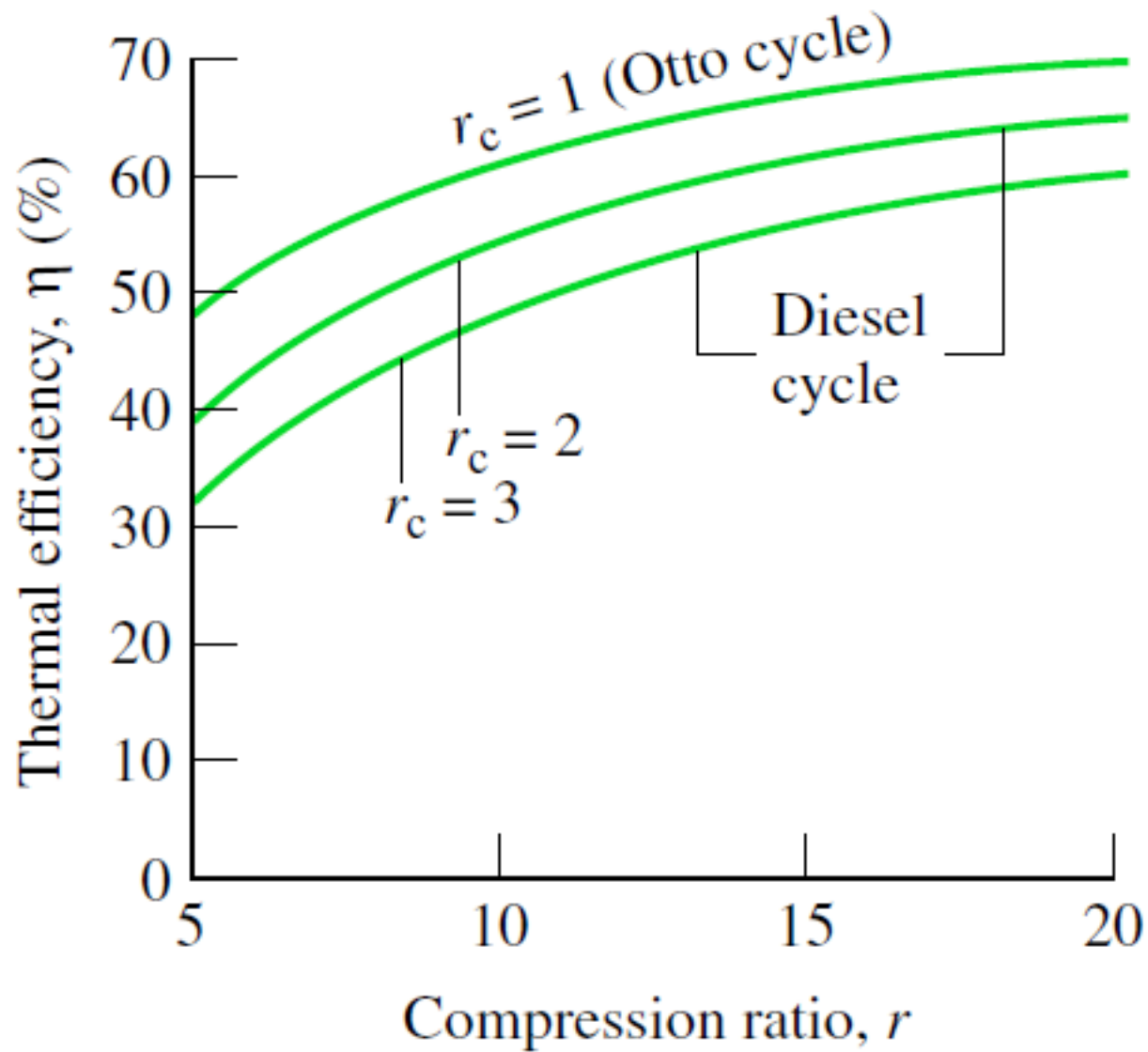
# Ciclo Diesel

- Logo:

$$\eta = 1 - \frac{1}{r^{\gamma-1}} \left[ \frac{r_c^\gamma - 1}{\gamma(r_c - 1)} \right]$$

- O aumento da taxa de compressão aumenta a efic. Térmica
- Para  $r_c \rightarrow 1$ ,  $\eta_{\text{Diesel}} \rightarrow \eta_{\text{Otto}}$

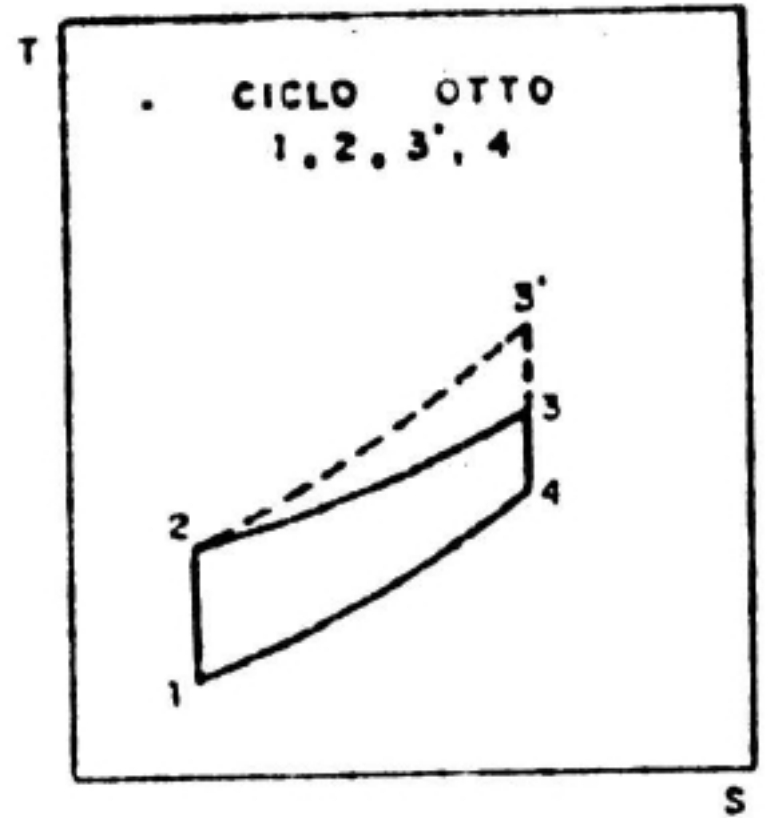
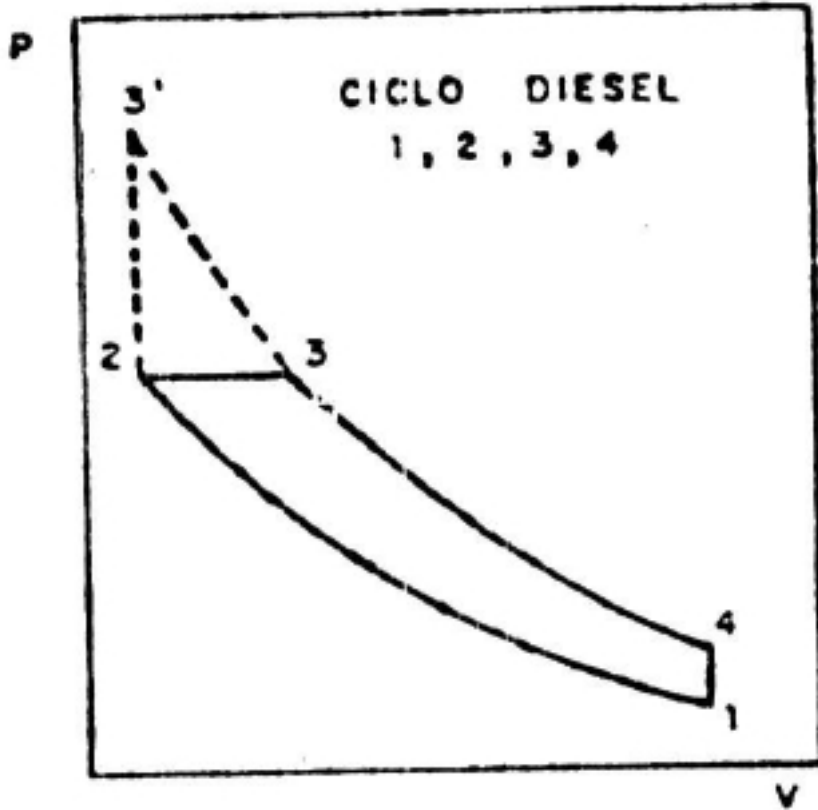




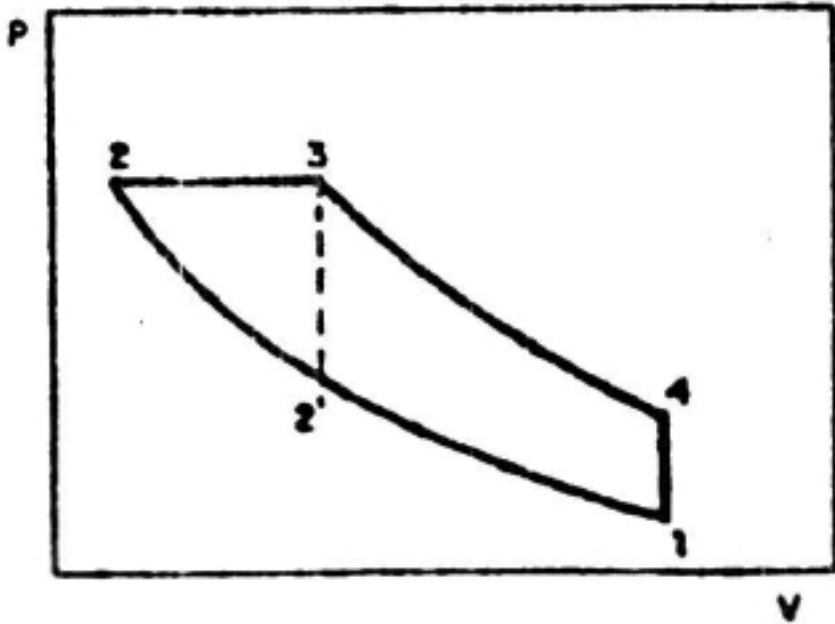
# Comparação ciclos Diesel e Otto

- À mesma taxa de compressão ( $r$ ):
  - Verifica-se que ciclo Otto tem  $\eta$  maior.
  - Entretanto, na prática, ciclo Diesel pode operar com  $r$  maior
    - Logo, esta base de comparação não é útil
- À mesma temp. Máxima ( $T_3$ )
  - Observação dos diagramas Pv e Ts mostra que o ciclo Diesel tem  $\eta$  maior.

# Mesmo r

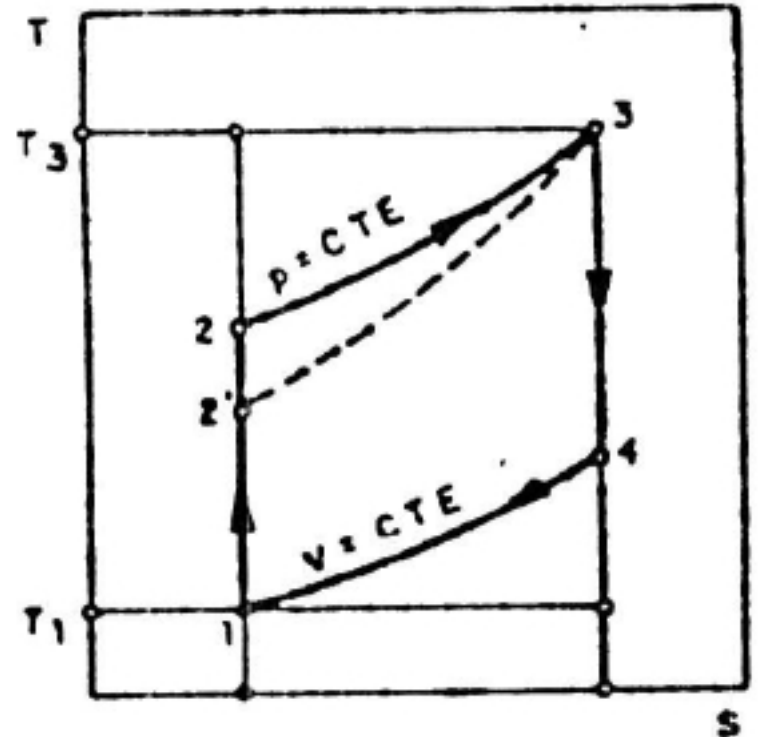


# Mesmo $T_3$



CICLO  
OTTO  
1, 2, 3, 4

CICLO  
DIESEL  
1, 2', 3, 4



# Diferenças em relação a ciclos “reais”

- Ciclos reais:
  - $c_v$  e  $c_p$  variam com T
  - Há combustão
  - $\Delta P$  em válvulas
    - W para vencê-las
  - Q entre fluido e paredes do cilindro
  - Atrito cilindro-pistão