

PNV3416  
INSTALAÇÕES PROPULSORAS

**ANÁLISE TERMODINÂMICA DE CICLOS  
MOTORES**

AULA 10

27/04/23

# ANÁLISE TERMODINÂMICA DE CICLOS MOTORES

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO
  2. QUESTÃO ILUSTRATIVA
  3. CICLOS PADRÃO A AR
  4. EXERCÍCIO
- 

# ANÁLISE TERMODINÂMICA DE CICLOS MOTORES

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO
  2. QUESTÃO ILUSTRATIVA
  3. CICLOS PADRÃO A AR
  4. EXERCÍCIO
- 

# INSTALAÇÕES PROPULSORAS DIESEL

## ANÁLISE TERMODINÂMICA DE CICLOS MOTORES

### CAPÍTULO 2:

- Descrição física do motor de combustão interna e de seus princípios de operação

### CAPÍTULO 3

- Análise termodinâmica dos processos que ocorrem em um motor de combustão interna
- Compreensão das variáveis que influem sobre o desempenho do motor.
- Estudo dos motores Diesel e de ciclos que se aplicam a outros tipos de motores.
- A análise precisa dos processos de um motor de combustão interna constitui um problema bastante complexo
- Formulação de modelos para representação dos fenômenos reais
- Modelos devem ser mais simples para permitir um tratamento analítico adequado.

# INSTALAÇÕES PROPULSORAS DIESEL

## ANÁLISE TERMODINÂMICA DE CICLOS MOTORES

- Para a análise dos processos de um motor de combustão interna são utilizados dois modelos
  - Ciclo padrão a ar
  - Conhecimentos elementares de termodinâmica
  - Gases perfeitos
- Ciclos ideais combustível – ar
  - Conhecimentos adicionais sobre combustão
  - Gases reais
- Conclusões importantes aplicadas a comparações de motores reais

# ANÁLISE TERMODINÂMICA DE CICLOS MOTORES

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO
  2. QUESTÃO ILUSTRATIVA
  3. CICLOS PADRÃO A AR
  4. EXERCÍCIO
- 

# INSTALAÇÕES PROPULSORAS DIESEL

## QUESTÃO ILUSTRATIVA

Um motor de ignição por compressão (IC) e um motor de ignição por faísca (IF), que apresentam a mesma potência, podem ser usados em uma dada aplicação na qual se necessita regimes de carga variáveis do motor. Sabe-se que em um motor IF a variação de carga se faz pela redução da pressão da admissão (menos quantidade de massa aspirada), enquanto que no motor IC o ajuste se faz por variação da quantidade de combustível injetado.

Para definir a escolha entre os dois motores foi feita uma análise dos ciclos a ar correspondentes. Para o motor IC foi escolhido como modelo o ciclo Diesel e para o motor IF o ciclo Otto.

# INSTALAÇÕES PROPULSORAS DIESEL

- a) Deseja-se saber se os ciclos a ar utilizados para representar os motores têm a mesma razão de compressão.
- b) Admitindo que os ciclos para condição de plena carga tenham as mesmas condições iniciais e a mesma quantidade de calor admitido, representar os 2 ciclos nos diagramas pV e Ts.

A partir dos resultados da análise para o ciclo a ar, deseja-se saber:

- c) Qual dos dois motores apresenta maior eficiência a plena carga;
- d) Qual motor tem maior eficiência em cargas parciais.

# INSTALAÇÕES PROPULSORAS DIESEL

## ANÁLISE TERMODINÂMICA DE CICLOS MOTORES

### ESCOLHA DE MODELOS

a) Por que foi selecionado o ciclo a ar como modelo?

- O ciclo padrão a ar é a forma mais simples de representar o desempenho de um motor de combustão interna - Veja Figura 1

- Mesmo assim obtém-se resultados importantes em sua análise

b) Por que para o motor IF foi escolhido o ciclo Otto e para o motor IC o ciclo Diesel?

- Escolha baseada na semelhança entre o diagrama pV levantado em ensaio no dinamômetro e o diagrama pV do ciclo teórico correspondente

- Processo de combustão em um motor de ignição por faísca (IF) se aproxima da curva do processo de adição de calor no ciclo a ar Otto – Veja Figura 2

- Processo de combustão em um motor de ignição por compressão se aproxima do processo de adição de calor em um ciclo Diesel – Veja Figura 3

# INSTALAÇÕES PROPULSORAS DIESEL

FIGURA 1  
Questão Ilustrativa  
Procedimento usado  
na comparação de  
motores

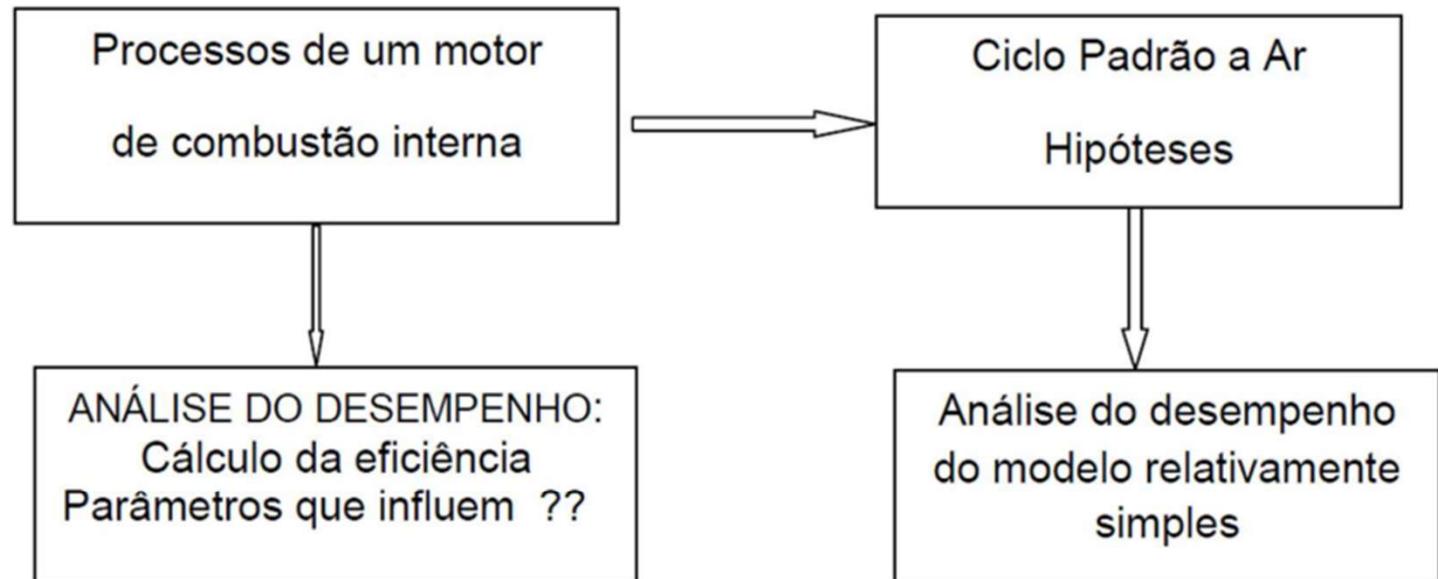


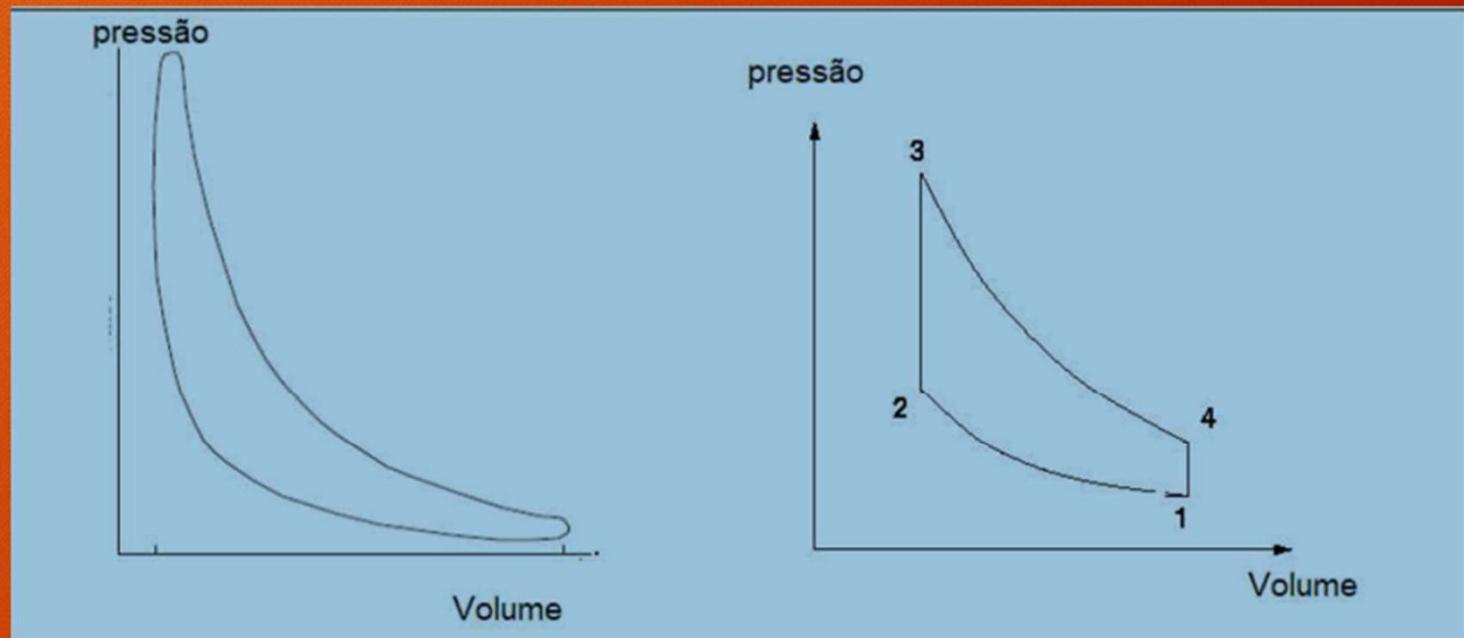
Figura 3.1 Seleção de um modelo para representação do desempenho de um motor de combustão interna

# INSTALAÇÕES PROPULSORAS DIESEL

## ANÁLISE TERMODINÂMICA DE CICLOS MOTORES

FIGURA 2

Representação no diagrama pV do ciclo de um motor IF



(a) Diagrama Pressão Volume de um motor IF levantado no ensaio

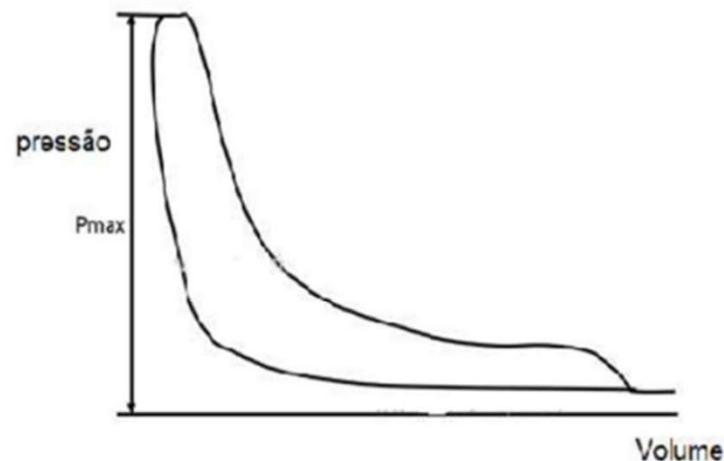
(b) Diagrama pV de um ciclo Otto a ar

# INSTALAÇÕES PROPULSORAS DIESEL

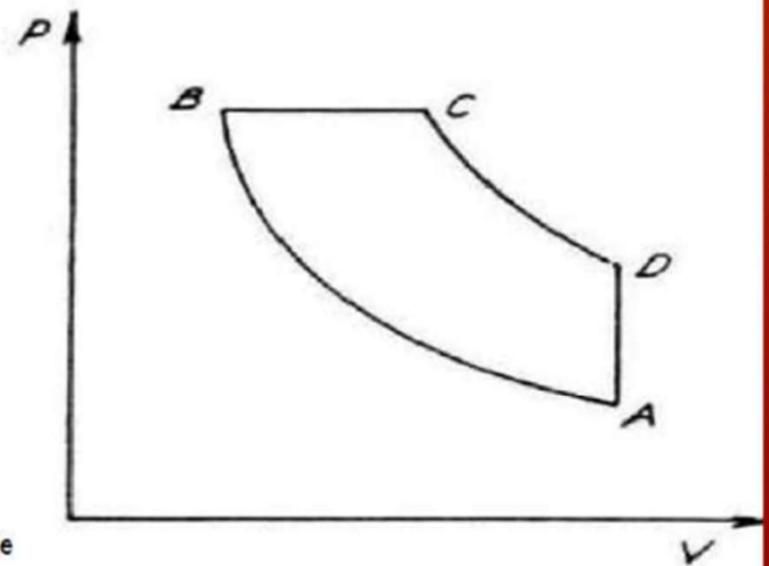
## ANÁLISE TERMODINÂMICA DE CICLOS MOTORES

FIGURA 3

Representação no diagrama pV do ciclo de um motor IC de baixa rotação



(a) Diagrama Pressão Volume de um motor IC levantado no ensaio



(b) Diagrama pV de um ciclo Diesel a ar

# ANÁLISE TERMODINÂMICA DE CICLOS MOTORES

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO
  2. QUESTÃO ILUSTRATIVA
  3. CICLOS PADRÃO A AR
  4. EXERCÍCIO
- 
- A decorative graphic consisting of several parallel white lines of varying lengths, slanted upwards from left to right, located in the bottom right corner of the red background.

# INSTALAÇÕES PROPULSORAS DIESEL

## ANÁLISE TERMODINÂMICA DE CICLOS MOTORES CICLO PADRÃO A AR

O primeiro modelo empregado para representação de um motor de combustão interna é o ciclo padrão a ar

### 3.3.1 Hipóteses.

a) O fluido de trabalho no cilindro (ar) é um gás perfeito. Obedece, portanto, a lei  $pV = NRT$

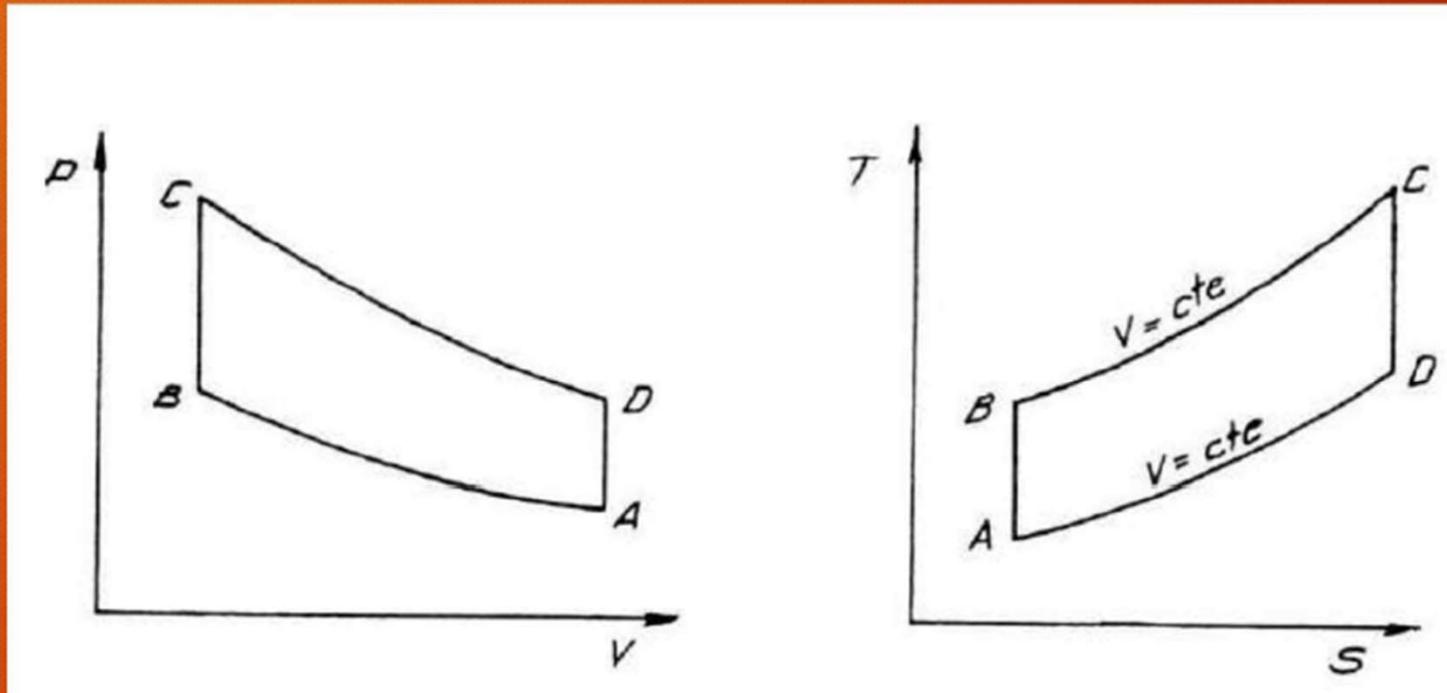
Além disto, admite-se que o fluido tem calores específicos constantes.

b) Para o cálculo do estado do fluido, as constantes físicas do gás no cilindro são as do ar a temperatura moderada.

c) Eliminam-se os processos de admissão e descarga. Assim, o fluido de trabalho, no final do processo, permanece inalterado e se encontra no mesmo estado inicial.

# INSTALAÇÕES PROPULSORAS DIESEL

ANÁLISE TERMODINÂMICA DE CICLOS MOTORES  
REPRESENTAÇÃO DO CICLO OTTO NOS DIAGRAMAS Pv e Ts



# INSTALAÇÕES PROPULSORAS DIESEL

## EFICIÊNCIA DO CICLO OTTO

Eficiência térmica de um ciclo ( $\eta_t$ ) pode ser expressa genericamente por:

$$\eta_t = W_{liq} / Q_{ad}$$

ou

$$\eta_t = (Q_{ad} - Q_{rj}) / Q_{ad} = 1 - Q_{rj} / Q_{ad}$$

em que

$$Q_{ad} = UC - UB$$

$$Q_{rj} = UD - UA$$

Processos a volume constante para um gás perfeito

$$Q_{ad} = m c_v (TC - TB)$$

$$Q_{rj} = m c_v (TD - TA)$$

# INSTALAÇÕES PROPULSORAS DIESEL

## EFICIÊNCIA DO CICLO OTTO

$$\eta_t = 1 - (T_D - T_A) / (T_C - T_B) = T_A(T_D/T_A - 1) / [T_B(T_C/T_B - 1)]$$

Considerando que os processos de compressão e expansão são adiabáticos

$$T_B/T_A = (V_A / V_B)^{k-1}$$

e

$$T_D/T_C = (V_C / V_D)^{k-1}$$

Considerando que as razões de compressão e expansão são iguais

$$V_C / V_D = V_A / V_B$$

Em consequência

$$T_A/T_B = T_D/T_C$$

$$T_A/T_D = T_C/T_B$$

Assim:

$$\eta_t = 1 - T_A/T_B = 1 - (V_B / V_A)^{(k-1)}$$

$$\eta_t = 1 - (1/r)^{(k-1)}$$

# INSTALAÇÕES PROPULSORAS DIESEL

## EFICIÊNCIA DO CICLO OTTO

Assim:

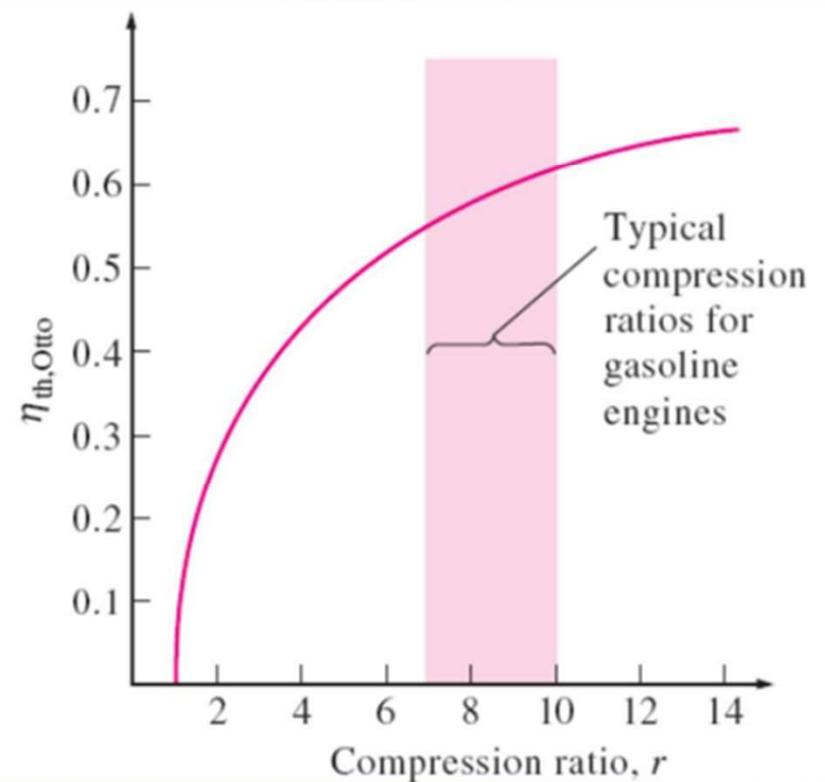
$$\eta_t = 1 - T_A/T_B = 1 - (V_B / V_A)^{(k-1)}$$

$$\eta_t = 1 - (1/r)^{(k-1)}$$

Exemplo numérico da Apostila

$$r = 5$$

$$\eta_t = 0,475$$



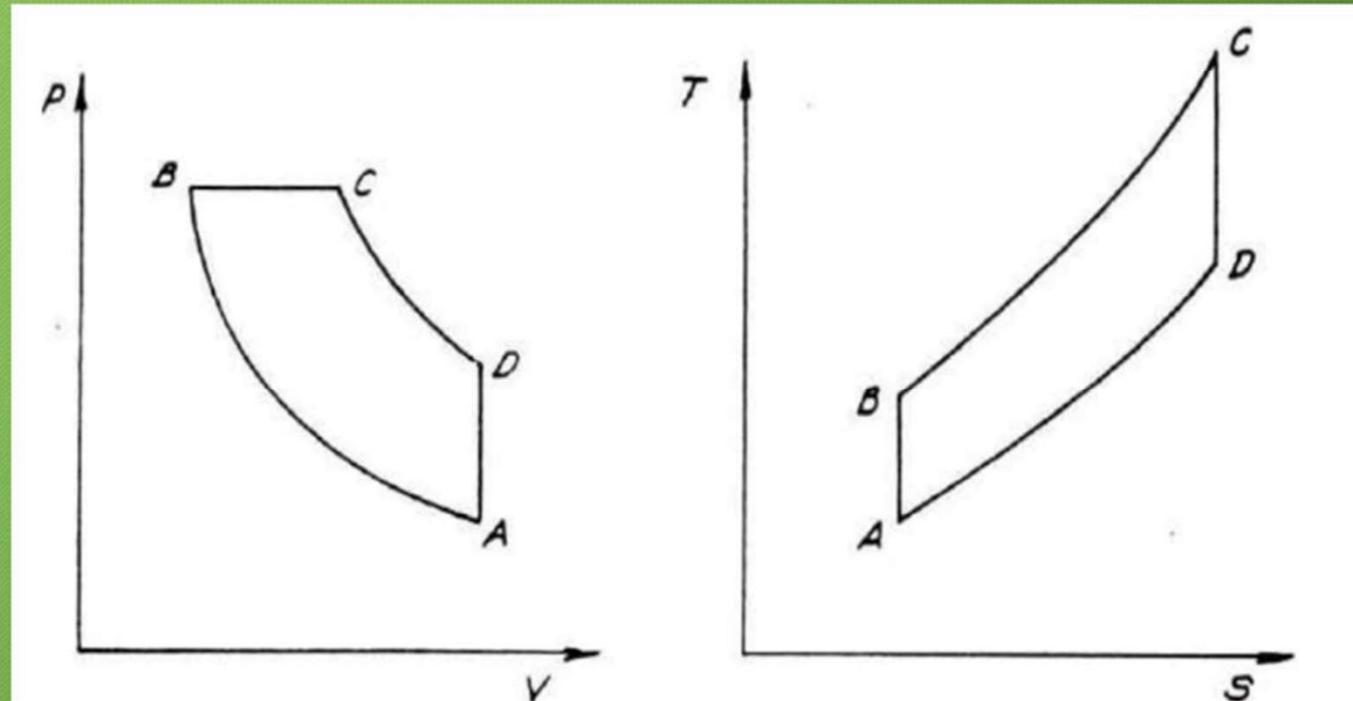
# INSTALAÇÕES PROPULSORAS DIESEL

## ANÁLISE TERMODINÂMICA DE CICLOS MOTORES CICLO DIESEL

Diagramas  $pV$  e  
 $Ts$  para ciclo a ar  
Diesel

A única diferença em relação ao ciclo Otto é o processo de adição de calor que ocorre a pressão constante

No diagrama  $Ts$  curvas de  $p$  cte têm menor inclinação que as de  $V$  cte



# INSTALAÇÕES PROPULSORAS DIESEL

## EFICIÊNCIA DO CICLO DIESEL

Eficiência térmica de um ciclo ( $\eta_t$ ) pode ser expressa genericamente por:

$$\eta_t = W_{\text{liq}} / Q_{\text{ad}}$$

ou 
$$\eta_t = (Q_{\text{ad}} - Q_{\text{rj}}) / Q_{\text{ad}} = 1 - Q_{\text{rj}} / Q_{\text{ad}}$$

em que 
$$Q_{\text{ad}} = H_C - H_B$$

$$Q_{\text{rj}} = U_D - U_A$$

Processos a pressão constante para um gás perfeito

$$H_C - H_B = m c_p (T_C - T_B)$$

# INSTALAÇÕES PROPULSORAS DIESEL

## EFICIÊNCIA DO CICLO DIESEL

Resulta, então:

$$\eta_t = 1 - Q_{rj} / Q_{ad} = 1 - 1/k [ (T_D - T_A) / (T_C - T_B) ]$$

Para o ciclo diesel:

$$V_C / V_D < V_A / V_B$$

Pode-se expressar

$$r_e = r / r_{cp}$$

em que

$$r_{cp} = V_C / V_B$$

Obtém-se

$$\eta_t = 1 - (1/r)^{(k-1)} [ (r_{cp}^k - 1) / k (r_{cp} - 1) ]$$

# INSTALAÇÕES PROPULSORAS DIESEL

## EFICIÊNCIA DO CICLO DIESEL

Para o ciclo Diesel

$$\eta_t = f(r, r_{cp})$$

ou

$$\eta_t = f(r, Q_{ad})$$

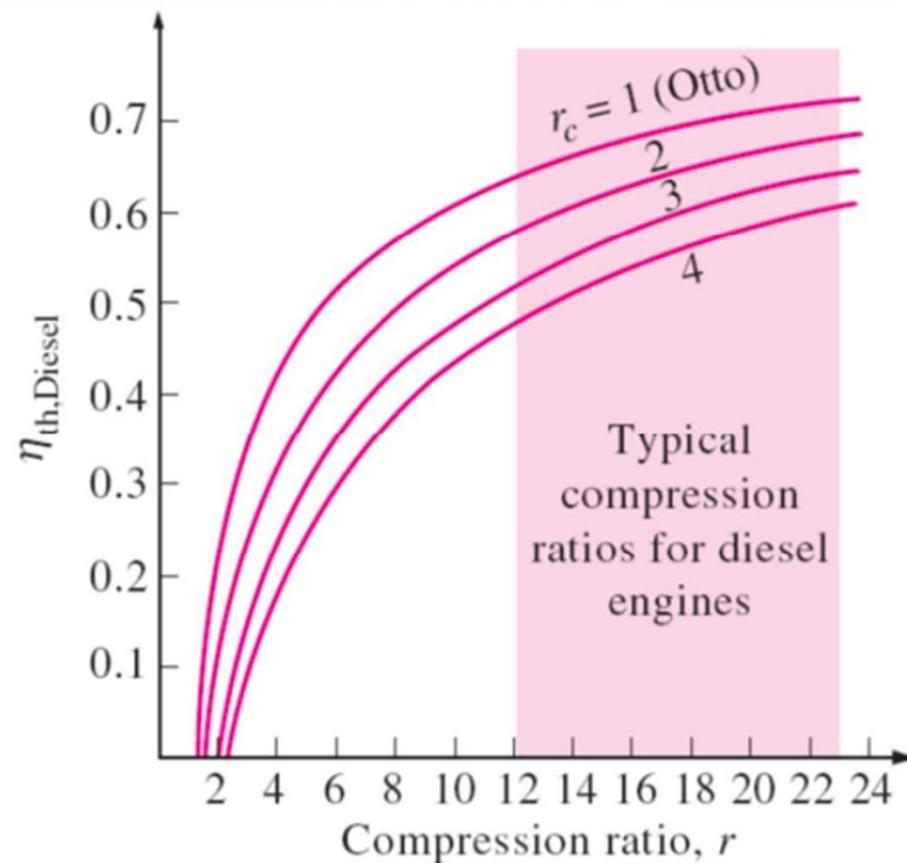
Quanto maior o calor admitido, ou a razão de expansão a pressão constante,  $r_{cp}$ , menor é a eficiência térmica

# INSTALAÇÕES PROPULSORAS DIESEL

## EFICIÊNCIA TÉRMICA DO CICLO DIESEL

Dependência de 2 parâmetros

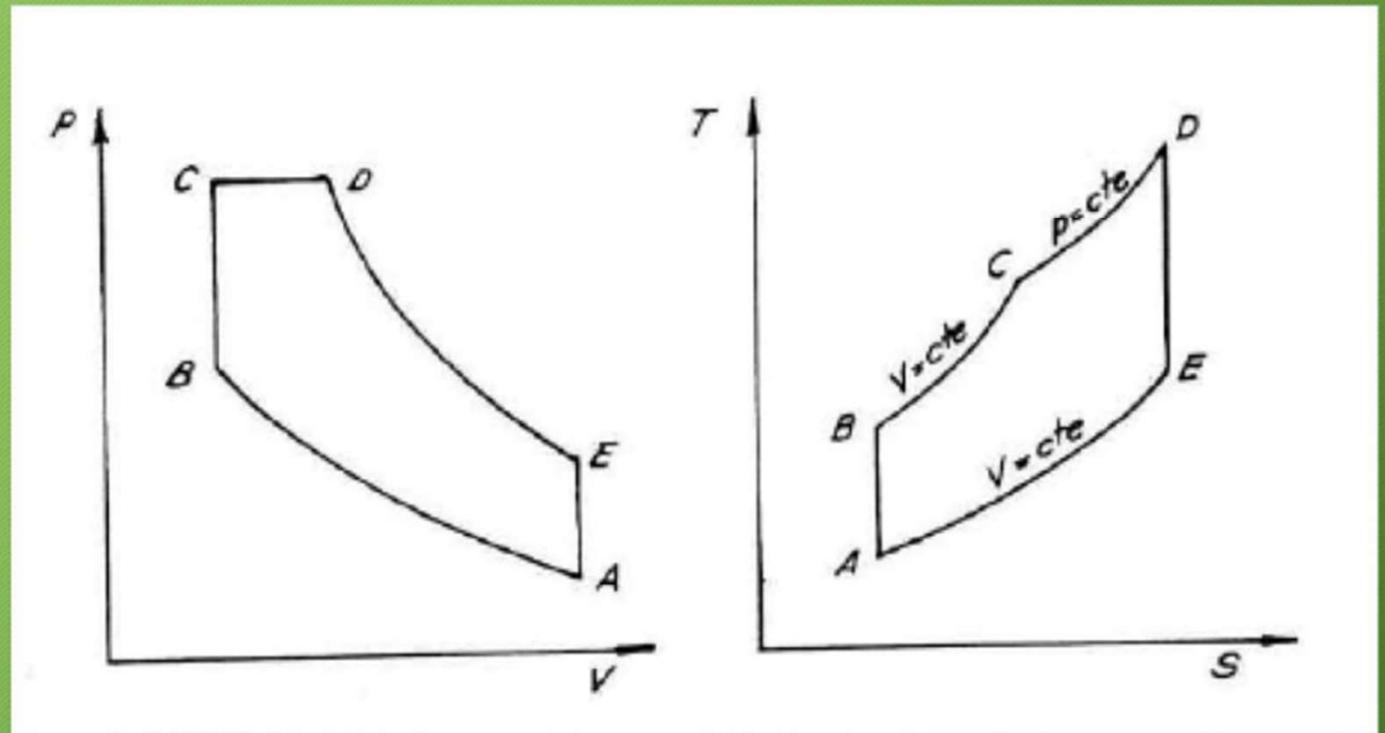
Para uma dada razão de compressão o ciclo Otto é mais eficiente que o Diesel



# INSTALAÇÕES PROPULSORAS DIESEL

## CICLO DIESEL DE PRESSÃO LIMITADA OU CICLO DUAL

O processo de adição de calor  
é composto por 2 partes:  
primeira parte a  $V = \text{cte}$   
Segunda parte a  $p = \text{cte}$



# INSTALAÇÕES PROPULSORAS DIESEL

## EFICIÊNCIA DO CICLO DUAL

Eficiência térmica de um ciclo ( $\eta_t$ ) pode ser expressa genericamente por:

$$\eta_t = W_{\text{liq}} / Q_{\text{ad}}$$

ou

$$\eta_t = (Q_{\text{ad}} - Q_{\text{rj}}) / Q_{\text{ad}} = 1 - Q_{\text{rj}} / Q_{\text{ad}}$$

em que

$$Q_{\text{ad}} = (U_C - U_B) + (H_D - H_C) = m c_v (T_C - T_B) + m c_p (T_D - T_C)$$

$$Q_{\text{rj}} = U_D - U_A$$

Fica então

$$\eta_t = 1 - [(T_E - T_A) / (T_C - T_B) + k (T_D - T_C)]$$

ou

$$\eta_t = 1 - (1/r)^{(k-1)} \{ (r_p \times r_{cp}^k - 1) / [k \times r_p (r_{cp} - 1) + r_p - 1] \}$$

# INSTALAÇÕES PROPULSORAS DIESEL

## EFICIÊNCIA DO CICLO DUAL

O ciclo dual é empregado para modelar motores diesel de média ou alta rotação

É um ciclo intermediário entre o Otto e o Diesel

Eficiência térmica do ciclo dual depende 3 parâmetros ( $r$ ,  $r_p$ ,  $r_{cp}$ ) em que

$r_p$  é a razão de elevação de pressão no processo de adição de calor a volume constante

# INSTALAÇÕES PROPULSORAS DIESEL

## EXERCÍCIO DE APLICAÇÃO 1 COMPARAÇÃO ENTRE OS CICLOS

Considerar os ciclos padrão a ar Otto, Diesel e dual para os mesmos valores de razão de compressão e calor admitido. Considerar ainda que as condições iniciais do fluido sejam as mesmas para os 3 ciclos e que o volume do cilindro é o mesmo.

- a) Dizer que tipo de motor representa cada ciclo;
- b) Esquematizar os 3 ciclos em diagramas  $pV$  e  $Ts$ ;
- c) Comparar as eficiências dos ciclos usando a formulação apresentada no capítulo 3;
- d) Comparar as eficiências dos ciclos usando o diagrama  $Ts$  onde podem ser identificadas as quantidades de calor admitido e calor rejeitado pelos ciclos.

# INSTALAÇÕES PROPULSORAS DIESEL

## COMPARAÇÃO ENTRE OS CICLOS

a) Dizer que tipo de motor representa cada ciclo:

Ciclo Otto - motores de ignição por faísca

Ciclo Diesel - motores de ignição por compressão de baixa rotação

Ciclo dual - motores de ignição por compressão de média ou alta rotação

b) Esquematizar os 3 ciclos em diagramas  $pV$  e  $Ts$

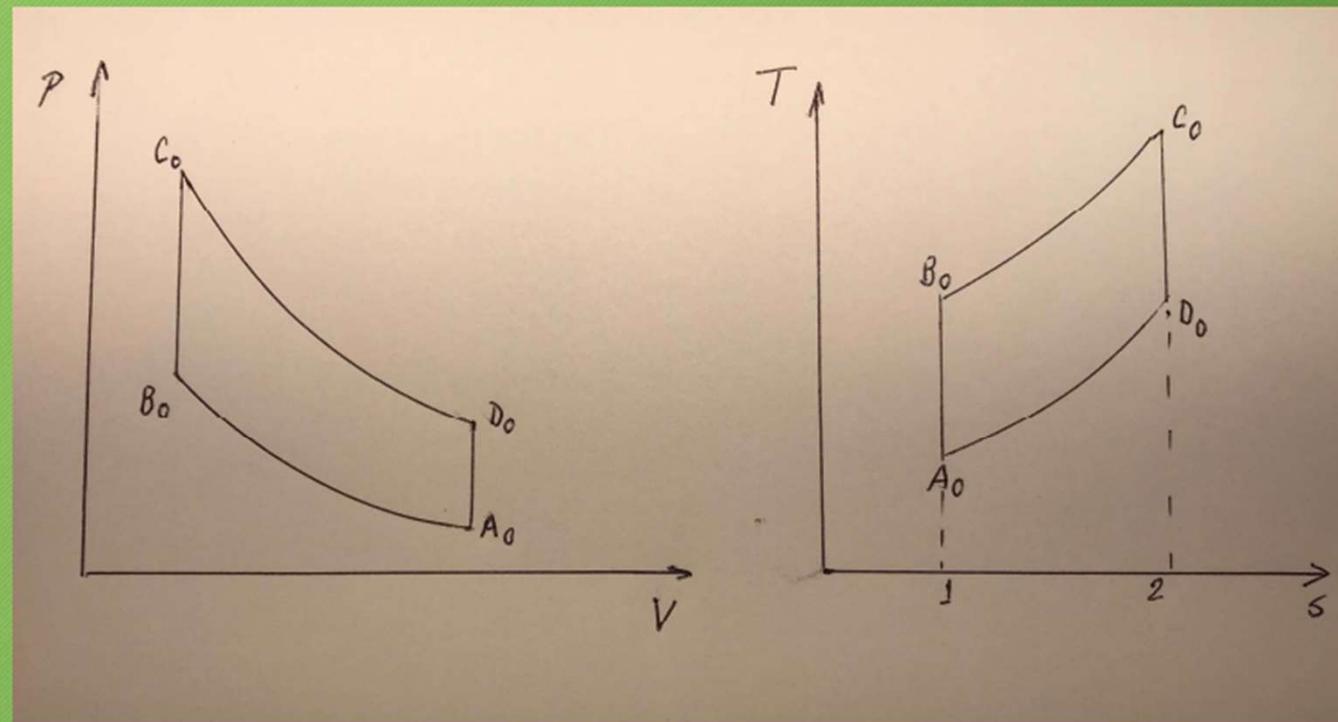
Para representar os 3 ciclos no mesmo diagrama desenha-se um ciclo arbitrariamente e depois constrói-se os outros impondo as restrições

Desenha -se inicialmente o ciclo Otto: veja Figura 1

# INSTALAÇÕES PROPULSORAS DIESEL

## COMPARAÇÃO ENTRE OS CICLOS

Figura 1  
Representação do  
ciclo Otto nos  
diagramas pV e Ts



# INSTALAÇÕES PROPULSORAS DIESEL

## COMPARAÇÃO ENTRE OS CICLOS

Vamos desenhar agora o ciclo Diesel considerando as condições impostas

1. Mesmo volume de cilindro: o ponto A do ciclo Diesel coincide com o do Otto Veja Figura 2
2. Os dois ciclos têm a mesma razão de compressão : o ponto B do ciclo Diesel coincide com o ponto B do Otto
3. Os dois ciclos têm mesmo calor admitido

Neste caso a definição do ponto C exige o emprego do diagrama Ts  
Sabe-se que a área abaixo da curva de adição de calor (BC) representa a quantidade de calor admitido

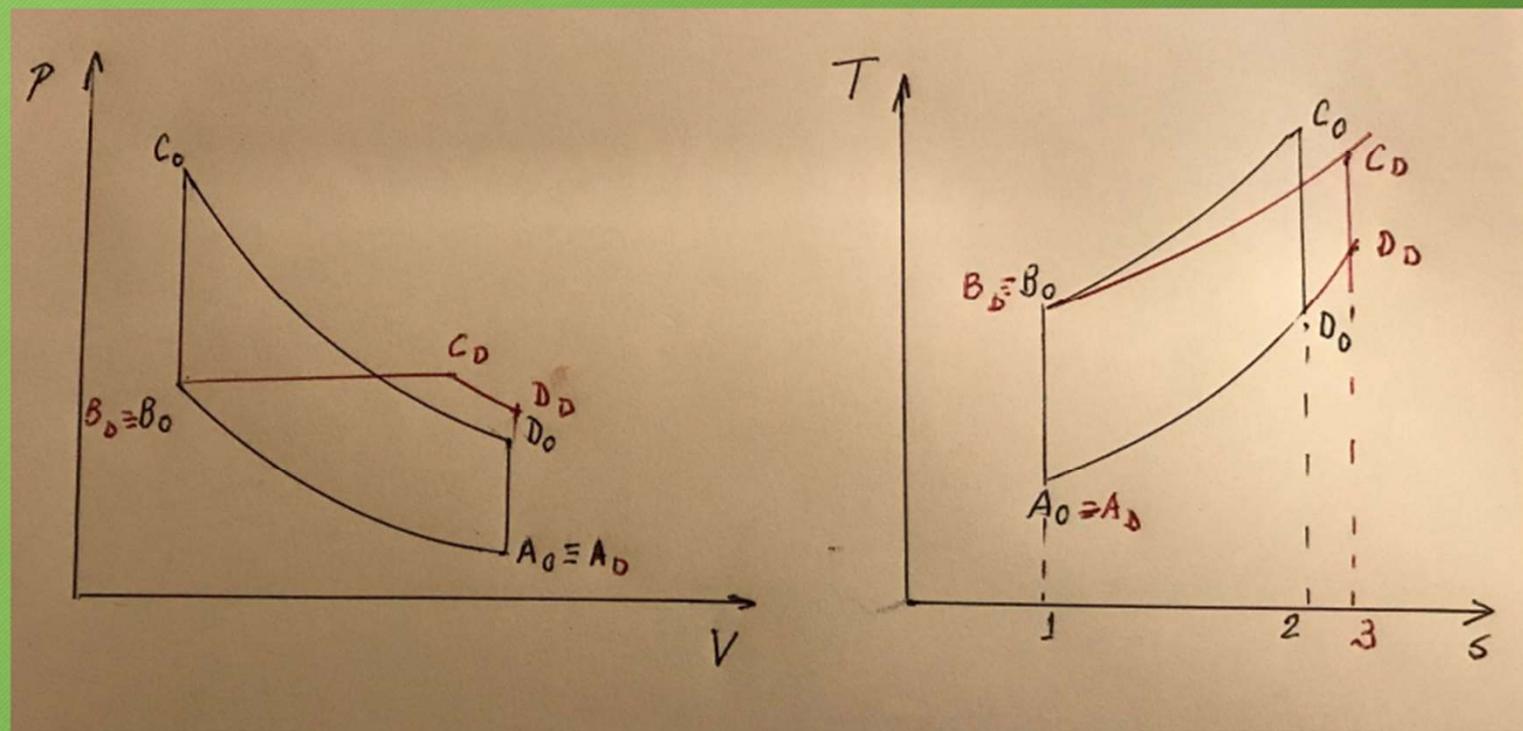
$$\text{Área (1-B}_O\text{-C}_O\text{-2-1)} = (Q_{ad})_{\text{Otto}}$$

Escolhe-se C tal que:  $\text{Área (1-B}_D\text{-C}_D\text{-3-1)} = (Q_{ad})_{\text{Diesel}} = \text{Área (1-B}_O\text{-C}_O\text{-2-1)}$

# INSTALAÇÕES PROPULSORAS DIESEL

## COMPARAÇÃO ENTRE OS CICLOS

Figura 2  
Comparação dos  
ciclos Otto e  
Diesel



# INSTALAÇÕES PROPULSORAS DIESEL

## COMPARAÇÃO ENTRE OS CICLOS

Para construção do ciclo dual repete-se o mesmo procedimento

1. Mesmo volume de cilindro: o ponto A do ciclo dual coincide com o do Otto Veja Figura 3
2. Os dois ciclos têm a mesma razão de compressão : o ponto B do ciclo dual coincide com o ponto B do Otto
3. Os dois ciclos têm mesmo calor admitido

Para o ciclo dual a área abaixo da curva de adição de calor (BCD) representa a quantidade de calor admitido

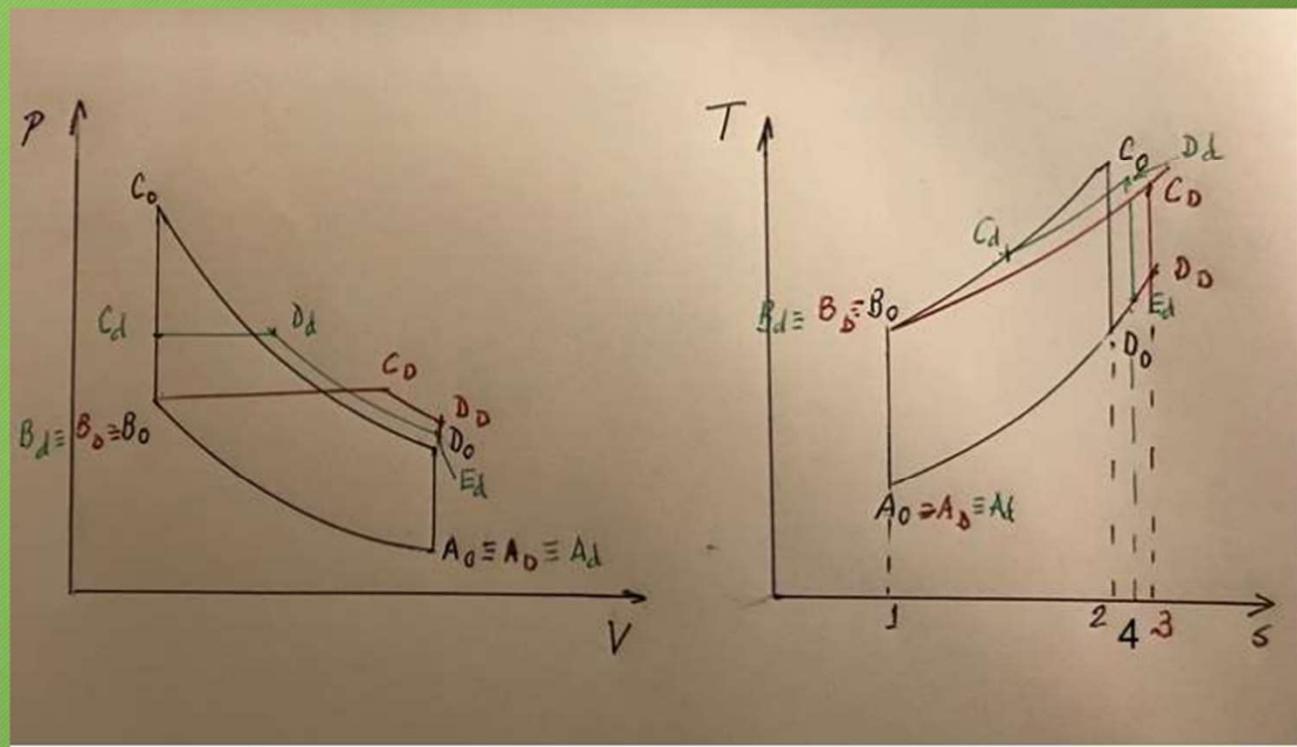
Escolhe-se C e D tal que:

$$\text{Área (1-B}_d\text{-C}_d\text{-D}_d\text{-4-1)} = (Q_{ad})_{dual} = \text{Área (1-B}_O\text{-C}_O\text{-2-1)}$$

# INSTALAÇÕES PROPULSORAS DIESEL

## COMPARAÇÃO ENTRE OS CICLOS

Figura 3  
Comparação dos  
ciclos Otto, Diesel e  
dual



# INSTALAÇÕES PROPULSORAS DIESEL

## COMPARAÇÃO ENTRE OS CICLOS

c) Comparar as eficiências dos ciclos usando a formulação apresentada no capítulo 3

As eficiências para os 3 ciclos são dadas por

Otto:  $\eta_t = 1 - (1/r)^{(k-1)}$

Diesel :  $\eta_t = 1 - (1/r)^{(k-1)} [ (r_{cp}^k - 1) / k ( r_{cp} - 1 ) ]$

dual:  $\eta_t = 1 - (1/r)^{(k-1)} \{ (r_p \times r_{cp}^k - 1) / [k \times r_p ( r - 1 ) + r_p - 1] \}$

Pode-se ver que a parcela que multiplica  $(1/r)^{(k-1)}$  é maior que 1,0

Logo, para mesma razão de compressão o ciclo Otto é o mais eficiente

# INSTALAÇÕES PROPULSORAS DIESEL

## COMPARAÇÃO ENTRE OS CICLOS

d) Comparar as eficiências dos ciclos usando o diagrama Ts onde podem ser identificadas as quantidades de calor admitido e calor rejeitado pelos ciclo. Como os 3 ciclos têm o mesmo calor admitido é mais eficiente o ciclo que rejeita menor quantidade de calor.

Verifica-se que :

$$\begin{aligned} \text{Área (1-A}_O\text{-D}_O\text{-2-1)} = (Q_{rj})_{\text{Otto}} &< \text{Área (1-A}_d\text{-E}_d\text{-4-1)} = (Q_{rj})_{\text{dual}} \\ &< \text{Área (1-A}_D\text{-D}_D\text{-3-1)} = (Q_{rj})_{\text{Diesel}} \end{aligned}$$

Ou seja, o ciclo Otto é o mais eficiente e o Diesel o menos eficiente.

# INSTALAÇÕES PROPULSORAS DIESEL

## EXERCÍCIO DE APLICAÇÃO 2 COMPARAÇÃO ENTRE OS CICLOS

Considerar os ciclos padrão a ar Otto, Diesel e dual para os mesmos valores de pressão máxima no ciclo e calor admitido. Considerar ainda que as condições iniciais do fluido sejam as mesmas para os 3 ciclos e que o volume do cilindro é o mesmo.

- a) Esquematizar os 3 ciclos em diagramas  $pV$  e  $Ts$ ;
- b) Comparar as eficiências dos ciclos usando a formulação apresentada no capítulo 3;
- c) Comparar as eficiências dos ciclos usando o diagrama  $Ts$  onde podem ser identificadas as quantidades de calor admitido e calor rejeitado pelos ciclos.

# INSTALAÇÕES PROPULSORAS DIESEL

## COMPARAÇÃO ENTRE OS CICLOS

a) Esquematizar os 3 ciclos em diagramas  $pV$  e  $Ts$

Para representar os 3 ciclos no mesmo diagrama desenha-se um ciclo arbitrariamente e depois constrói-se os outros impondo as restrições

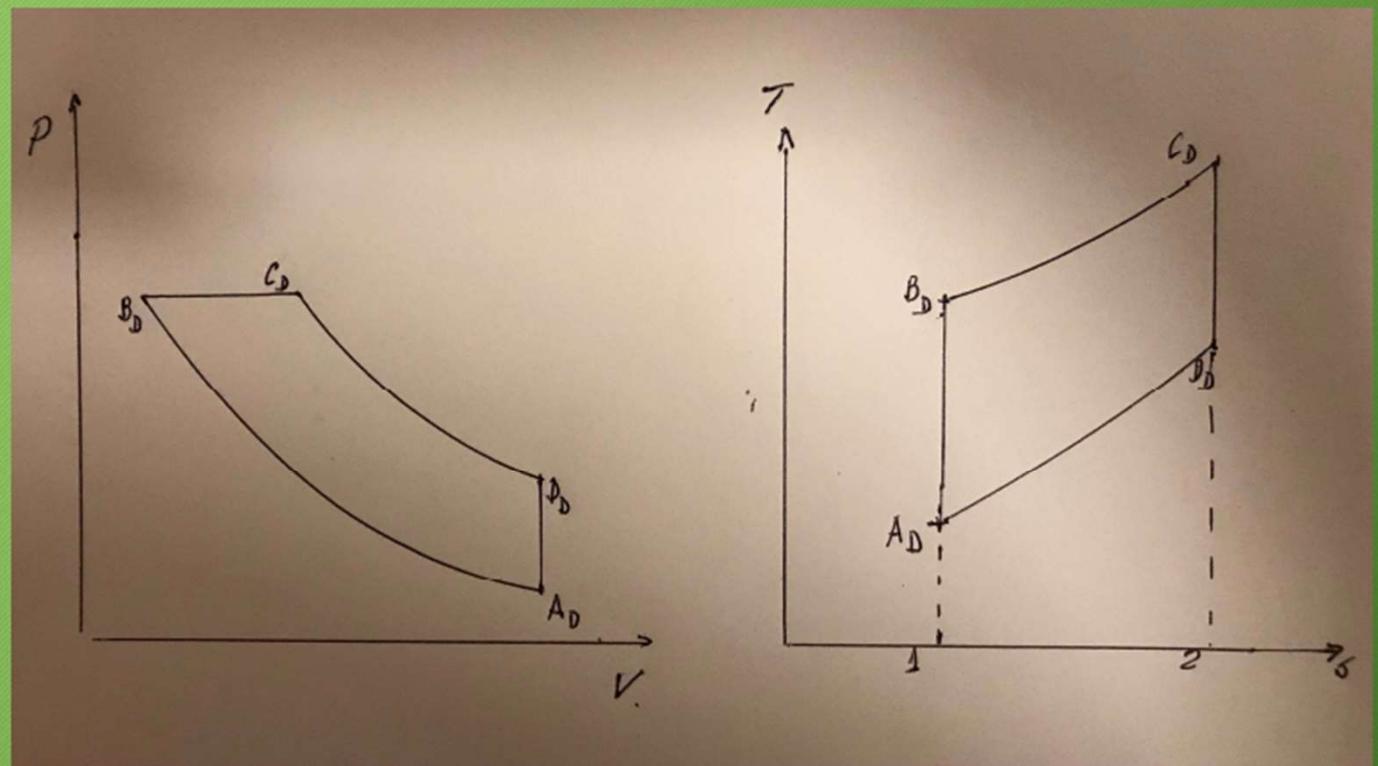
Desenha -se inicialmente, de forma arbitrária, o ciclo Diesel: veja Figura 4

Depois serão construídos na mesma figura os ciclos Diesel e dual

# INSTALAÇÕES PROPULSORAS DIESEL

## COMPARAÇÃO ENTRE OS CICLOS

Figura 4  
Representação  
do ciclo Diesel



# INSTALAÇÕES PROPULSORAS DIESEL

## COMPARAÇÃO ENTRE OS CICLOS

Vamos desenhar agora o ciclo Otto considerando as condições impostas

1. Mesmo volume de cilindro: o ponto A do ciclo Otto coincide com o do Diesel - Veja Figura 5
2. Os dois ciclos têm a mesma pressão máxima: o ponto B do ciclo Otto deve estar à direita do ponto B do Diesel – menor razão de compressão

O ponto C do Otto deve estar na mesma pressão dos pontos B e C do Diesel

3. Os dois ciclos têm mesmo calor admitido

Neste caso a definição dos pontos B e C exige o emprego do diagrama Ts

Sabe-se que a área abaixo da curva de adição de calor (BC) representa a quantidade de calor admitido

$$\text{Área (1-B}_D\text{-C}_D\text{-2-1)} = (Q_{ad})_{\text{Diesel}}$$

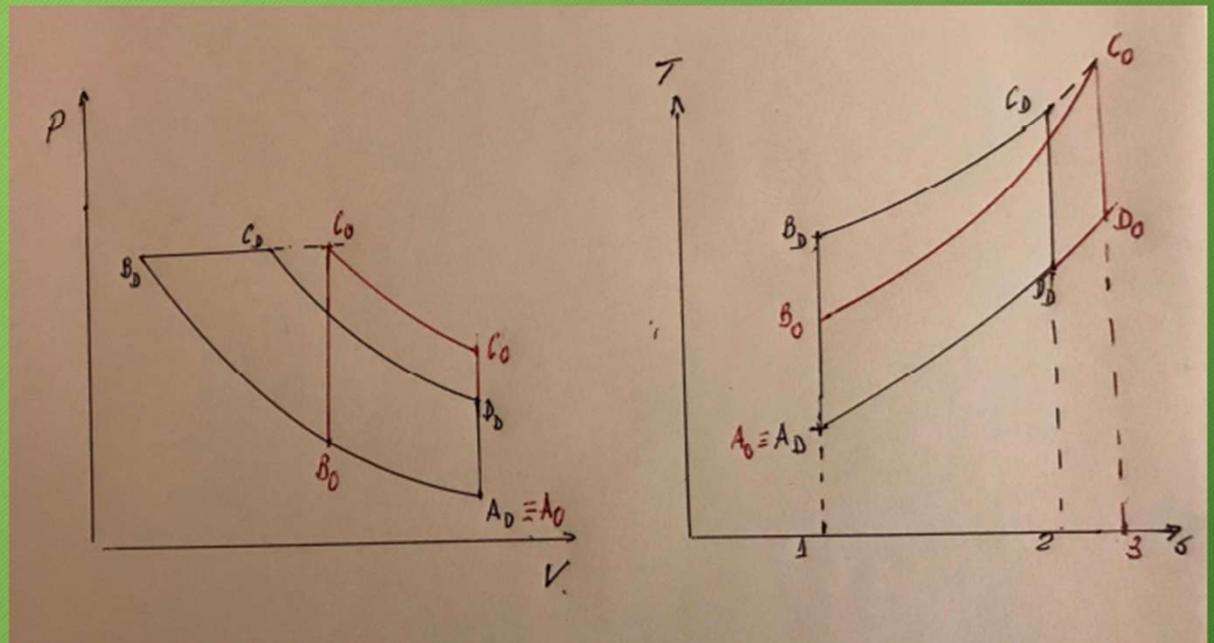
Escolhe-se os pontos B e C do Otto, de tal forma que:

$$\text{Área (1-B}_O\text{-C}_O\text{-3-1)} = (Q_{ad})_{\text{Otto}} = \text{Área (1-B}_D\text{-C}_D\text{-2-1)}$$

# INSTALAÇÕES PROPULSORAS DIESEL

## COMPARAÇÃO ENTRE OS CICLOS

Figura 5  
Comparação entre  
ciclos Diesel e Otto



# INSTALAÇÕES PROPULSORAS DIESEL

## COMPARAÇÃO ENTRE OS CICLOS

Para construção do ciclo dual repete-se o mesmo procedimento

1. Mesmo volume de cilindro: o ponto A do ciclo dual coincide com o do Diesel Veja Figura 6
2. Os dois ciclos têm a mesma pressão máxima, mas o dual tem menor razão de compressão: o ponto B do ciclo dual coincide está à direita do ponto b do Diesel, mas à esquerda do ponto B do Otto
3. Os dois ciclos têm mesmo calor admitido

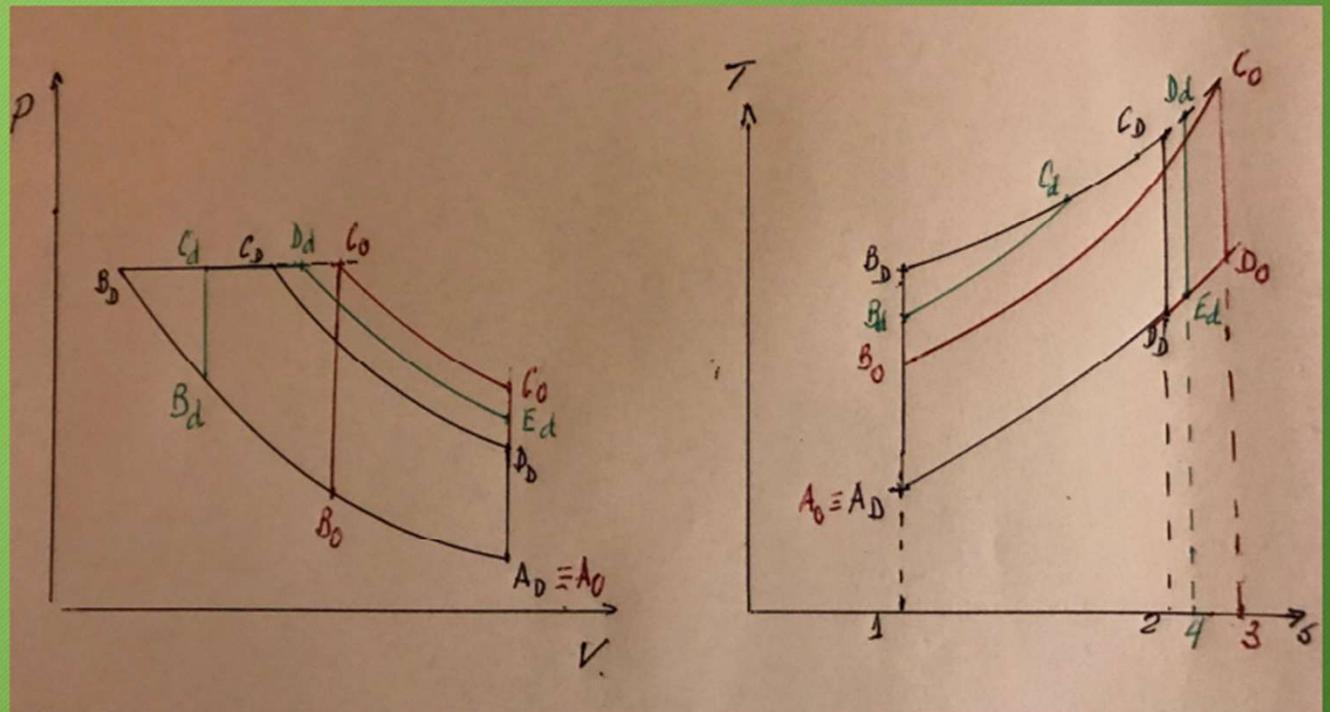
Para o ciclo dual a área abaixo da curva de adição de calor (BCD) representa a quantidade de calor admitido

Escolhe-se B, C e D tal que:

$$\text{Área } (1-B_d-C_d-D_d-4-1) = (Q_{ad})_{dual} = \text{Área } (1-B_D-C_D-2-1)$$

# INSTALAÇÕES PROPULSORAS DIESEL

Figura 6  
Comparação  
entre os 3  
ciclos



# INSTALAÇÕES PROPULSORAS DIESEL

## COMPARAÇÃO ENTRE OS CICLOS

Comparar as eficiências dos ciclos usando a formulação apresentada no capítulo 3

As eficiências para os 3 ciclos são dadas por

Otto:  $\eta_t = 1 - (1/r)^{(k-1)}$

Diesel :  $\eta_t = 1 - (1/r)^{(k-1)} [ (r_{cp}^k - 1) / k ( r_{cp} - 1 ) ]$

dual:  $\eta_t = 1 - (1/r)^{(k-1)} \{ (r_p \times r_{cp}^k - 1) / [k \times r_p ( r - 1 ) + r_p - 1] \}$

Neste caso não é possível efetuar a comparação por meio das fórmulas sem conhecer os valores dos parâmetros de cada ciclo

# INSTALAÇÕES PROPULSORAS DIESEL

## COMPARAÇÃO ENTRE OS CICLOS

Comparar as eficiências dos ciclos usando o diagrama Ts onde podem ser identificadas as quantidades de calor admitido e calor rejeitado pelos ciclo

Como os 3 ciclos têm o mesmo calor admitido deve-se comparar a quantidade de calor rejeitada pelos ciclos

Verifica-se que :

$$\begin{aligned} \text{Área (1-A}_D\text{-D}_D\text{-2-1)} = (Q_{rj})_{\text{Diesel}} &< \text{Área (1-A}_d\text{-E}_d\text{-4-1)} = (Q_{rj})_{\text{dual}} \\ &< \text{Área (1-A}_O\text{-D}_O\text{-3-1)} = (Q_{rj})_{\text{Otto}} \end{aligned}$$

Ou seja, o ciclo Diesel é o mais eficiente e o Otto o menos eficiente