



# Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

PME 3480 MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA

Prof. Dr. Maurício A. Trielli e Prof. Dr. Guenther Krieger

- 1. HEYWOOD, J. B. Internal Combustion Engine Fundamentals. McGraw-Hill, 1988.
- 2. BRUNETTI, F. - Motores de Combustão Interna – Vol 1, São Paulo, Blucher, 2012
- 3. PULKRABEK, W. W. Engineering fundamentals of the internal combustion engine. Prentice Hall – 2<sup>nd</sup> ed., 2003.
- 4. FERGUSON, C.R. Internal combustion engines. New York. John Wiley & Sons, 1986.

## Aula 1

Definição, classificação  
e aplicações típicas de MCI.

Entes geométricos e cinemáticos de  
motores alternativos

# Motores de Combustão Interna



## ■ Definição

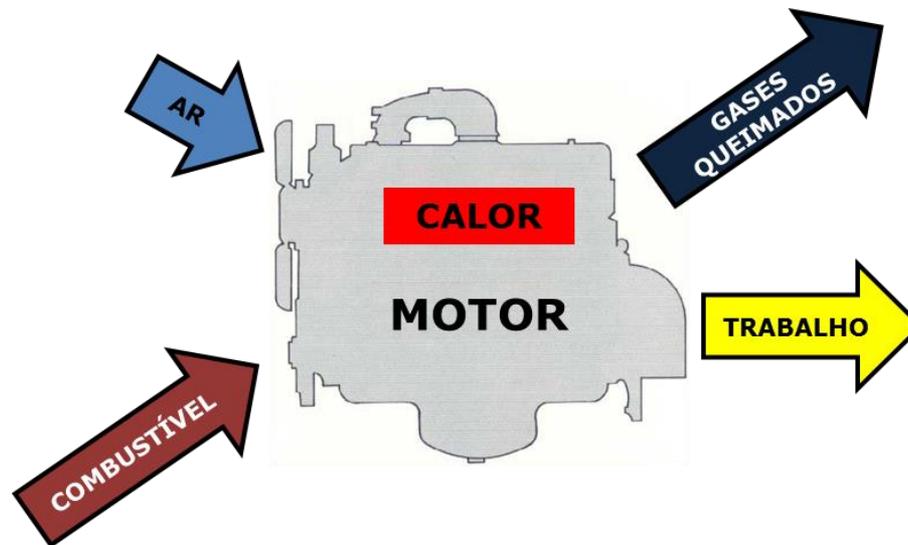
Motores de Combustão Interna (MCI) são máquinas térmicas que aproveitam a energia química liberada numa reação de combustão em trabalho mecânico associado a um movimento rotativo de um eixo.

Diferenciam-se dos motores de combustão externa (ciclos de Rankine e Stirling, p.e.) pois nestes o fluido ativo não é resultante de reações de combustão.

Nos motores de combustão interna, o ar e o combustível admitidos se transformam em gases de combustão que, então passam a ser responsáveis pela realização do trabalho mecânico.

# Motores de Combustão Interna

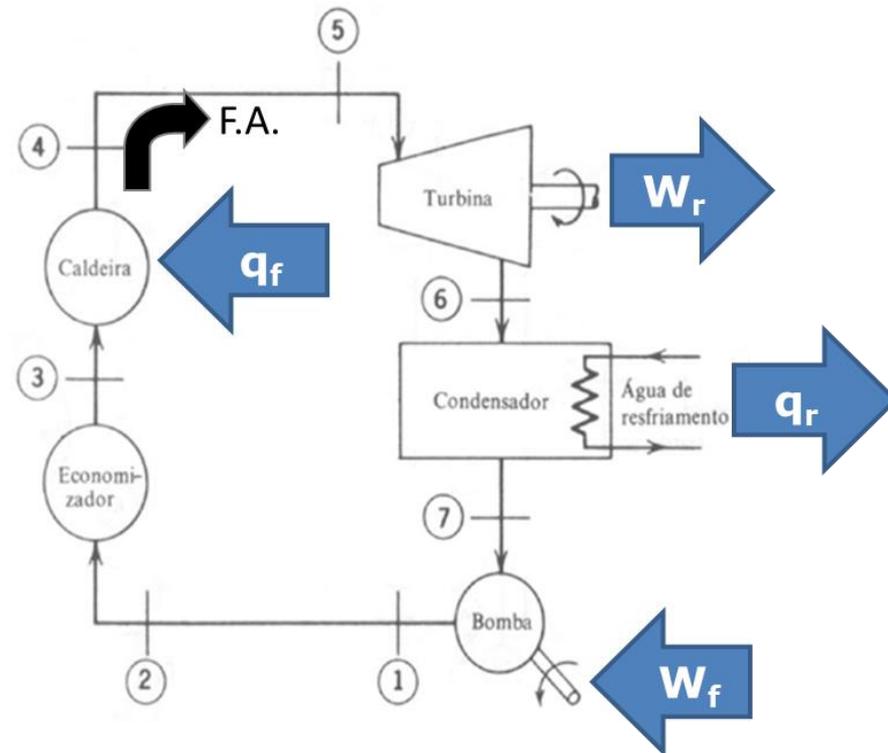
MCI



# Motores de Combustão Interna

## MCE

F.A.: fluido ativo  
 $q_f$ : calor fornecido  
 $q_r$ : calor retirado  
 $W_f$ : trabalho fornecido  
 $W_r$ : trabalho retirado

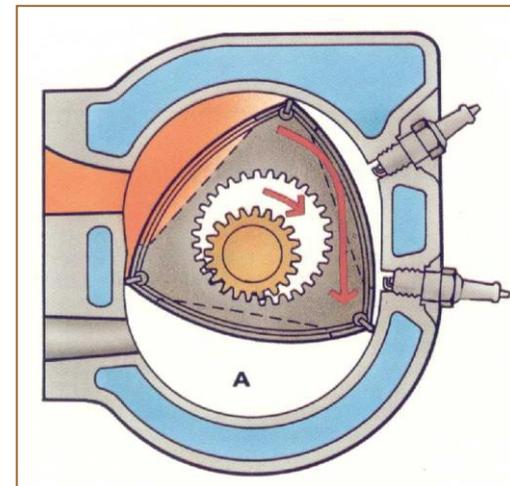
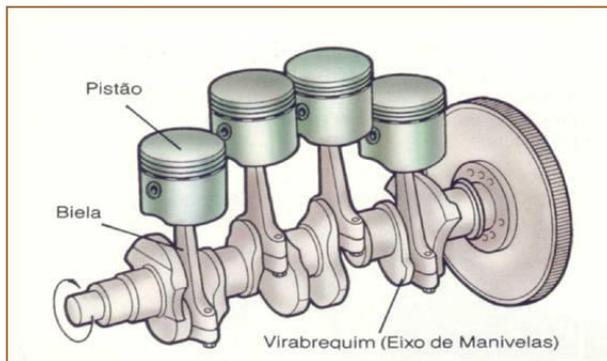


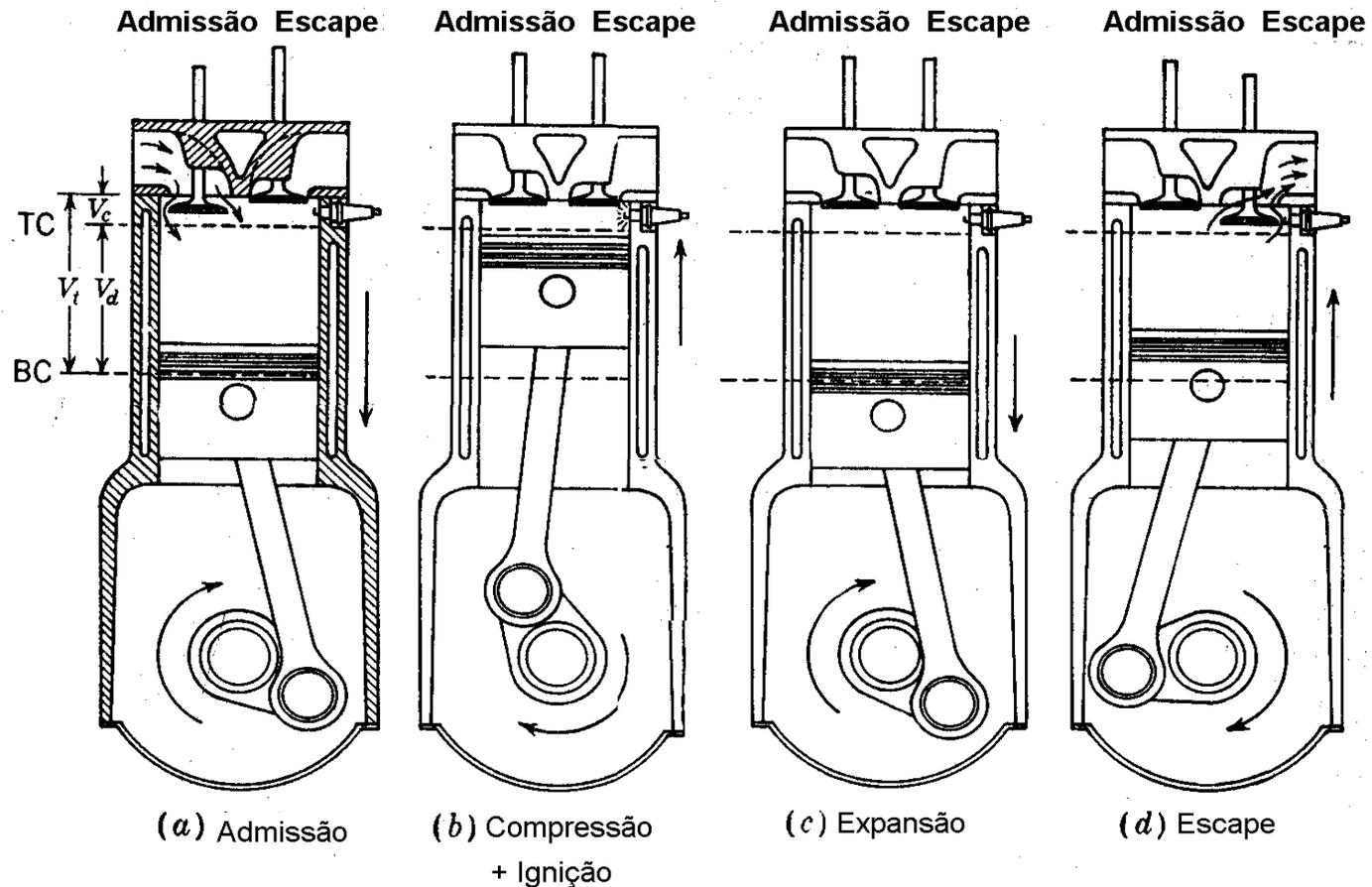
# Motores de Combustão Interna

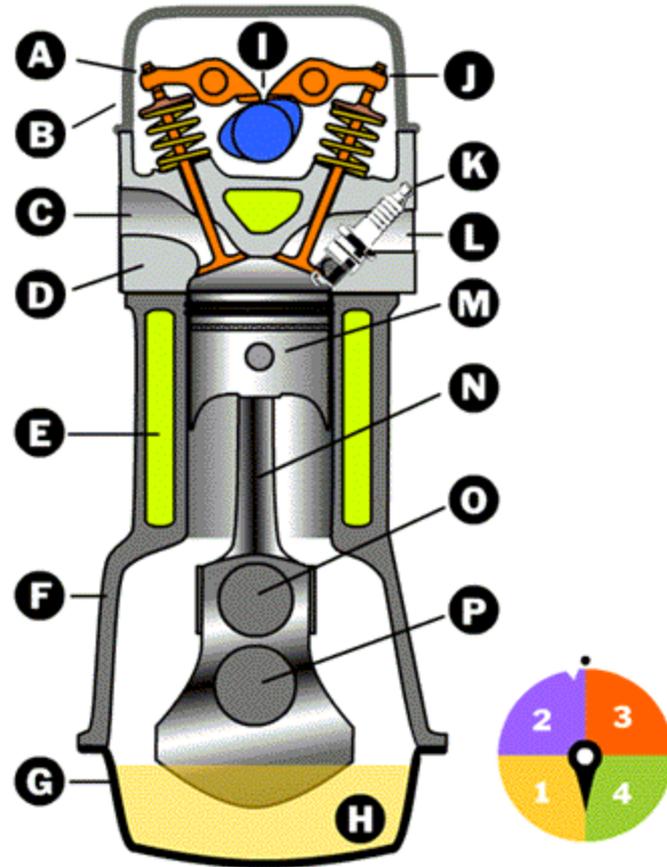
## ■ Classificação

■ Quanto à forma construtiva:

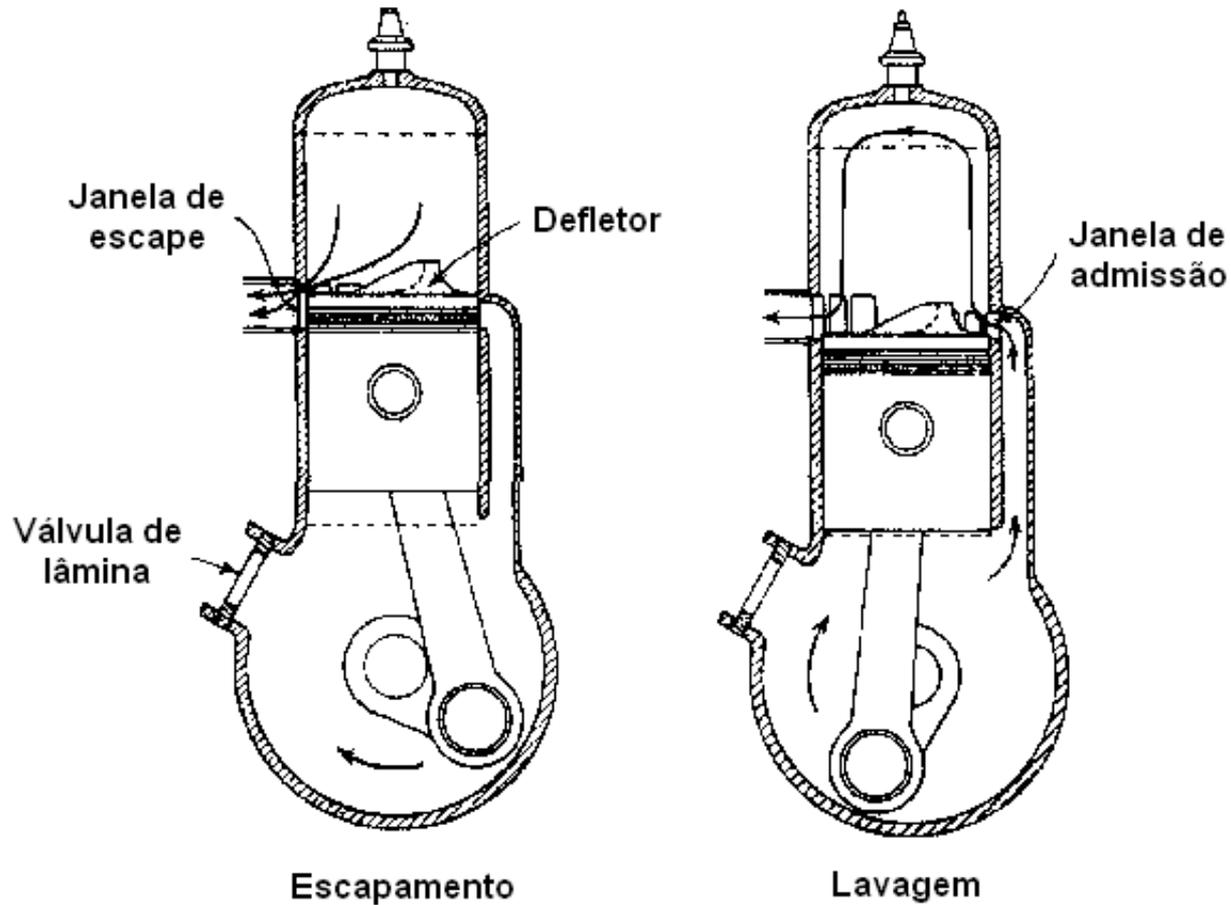
- ❑ alternativos (4T e 2T)
- ❑ rotativos (turbinas a gás, Wankel,...)

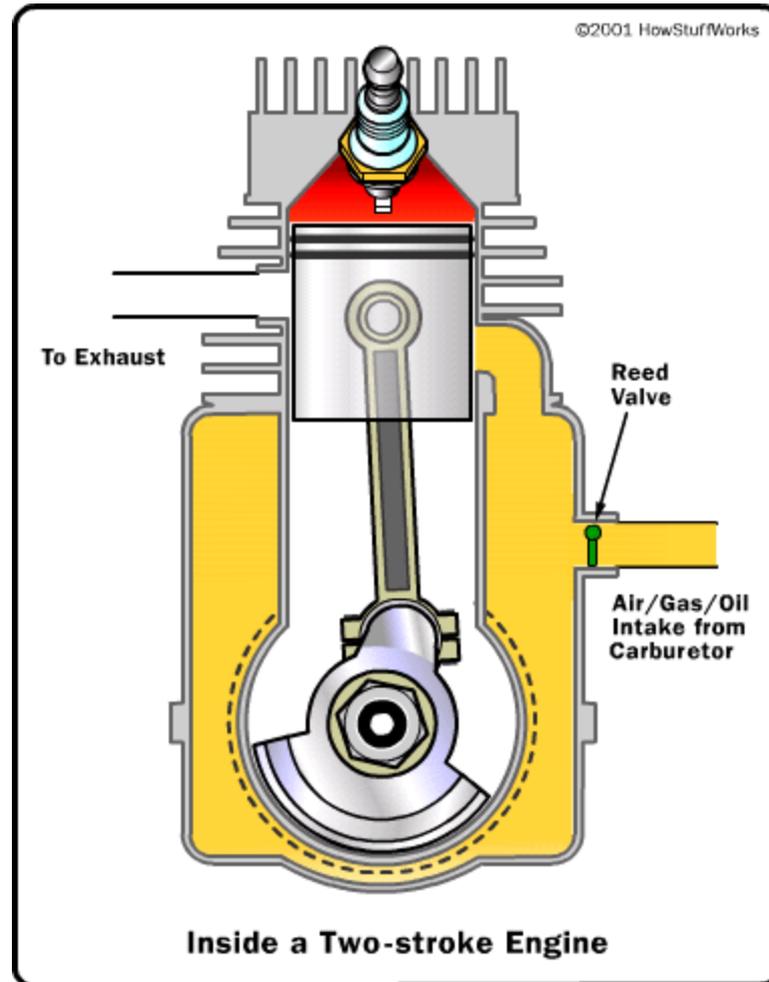


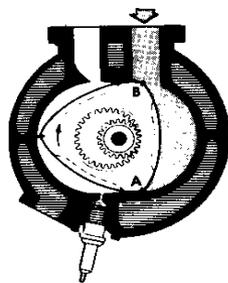
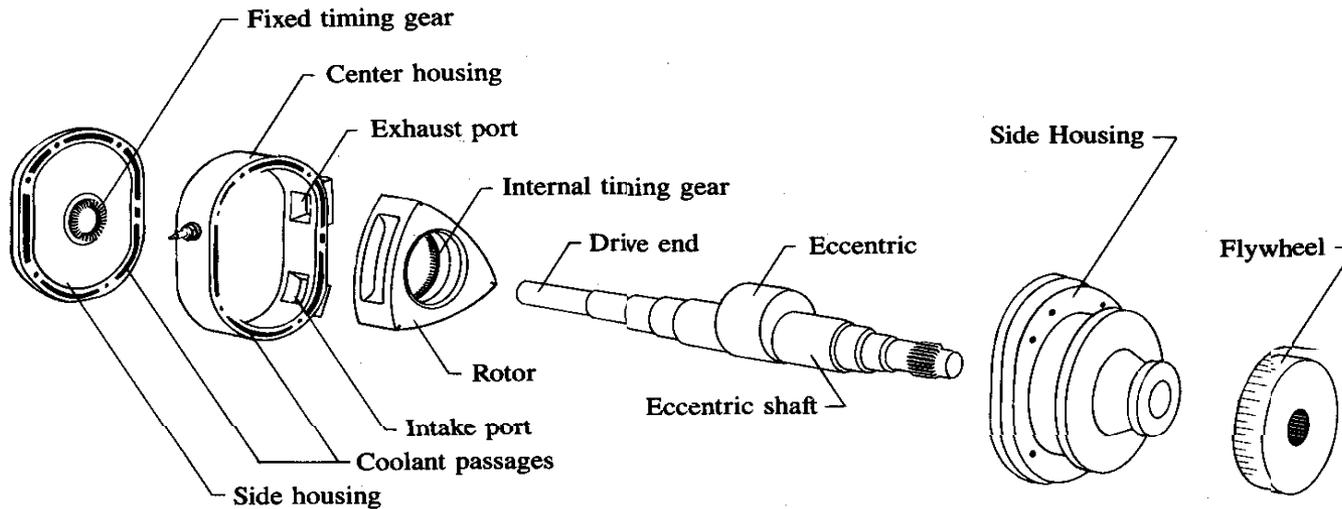




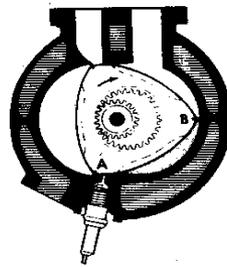
©2000 How Stuff Works, Inc.



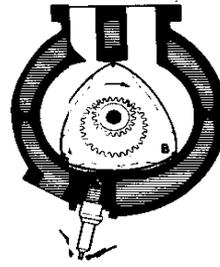




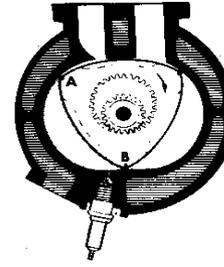
Induction



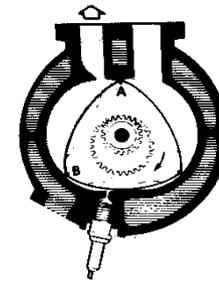
Compression



Ignition



Power



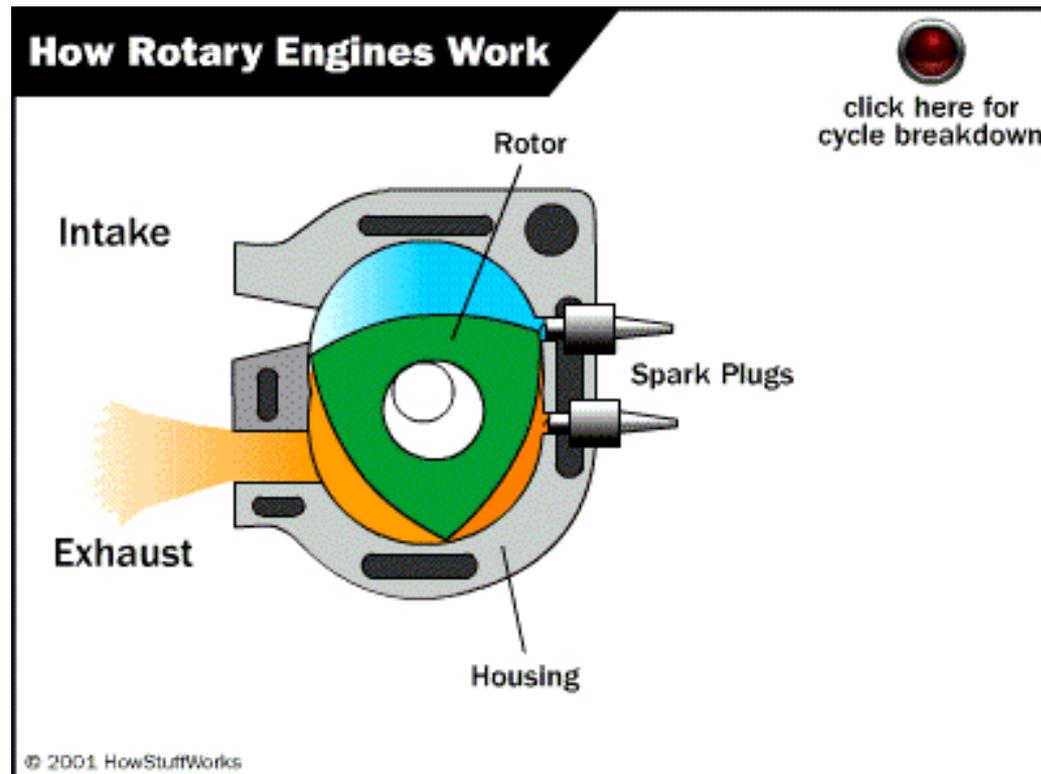
Exhaust

# Motores de Combustão Interna

# Rotativos - Wankel

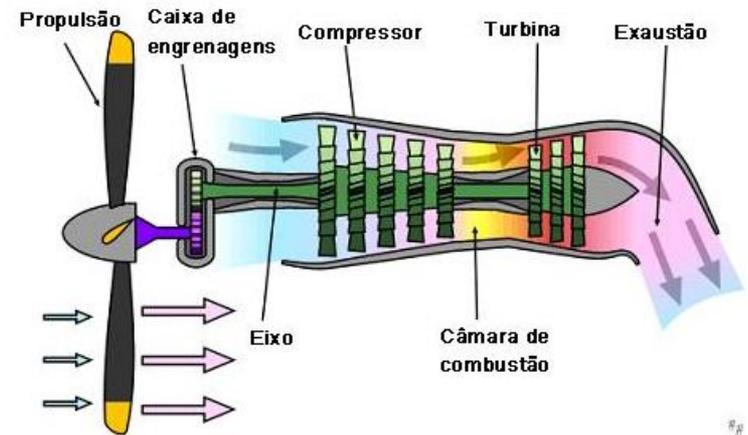
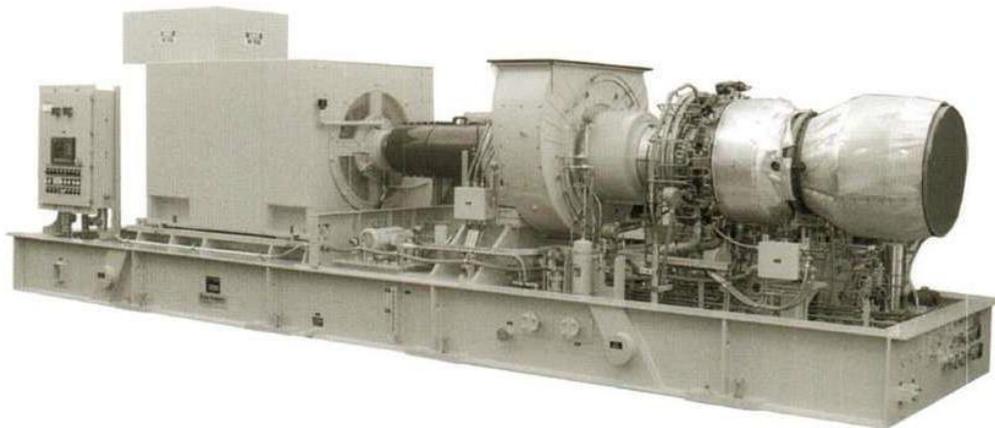
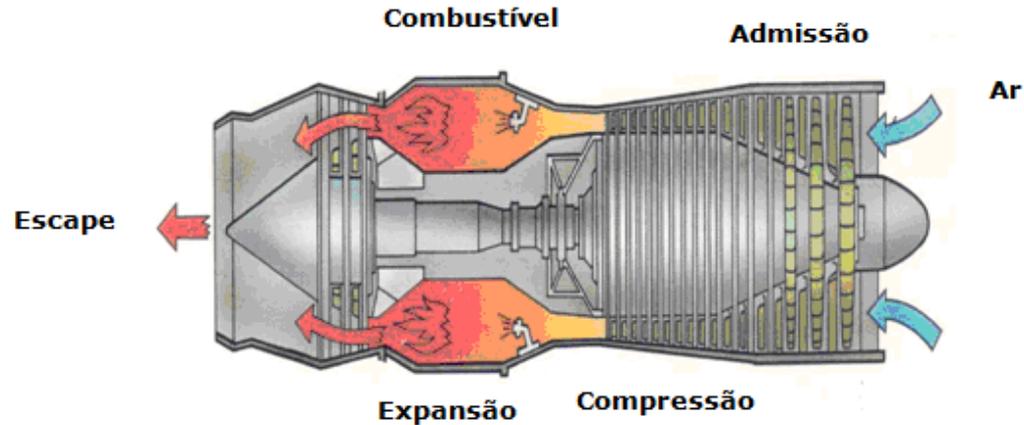






# Motores de Combustão Interna

# Rotativos - Turbinas a Gás



# Motores de Combustão Interna



## ■ Classificação

- Quanto à forma como a combustão se desenvolve:
  - ❑ de ignição por faísca ou centelha – MIF (SI: *spark igniton engines*)
  - ❑ de ignição por compressão ou espontânea – MIC (CI :*compression ignition engines*)

## Desenvolvimento da combustão:

A mistura combustível-ar previamente preparada, em geral a partir do tempo de admissão, é comprimida durante o tempo de compressão e entra em combustão nas proximidades do PMS com o recebimento de energia de ativação fornecida por uma fonte externa (faísca).

Essa energia permite que a mistura combustível-ar atinja as condições de pressão e temperatura necessárias ao desenvolvimento da combustão.

### I Desenvolvimento da combustão:

Durante todo o tempo de admissão e durante parte significativa do tempo de compressão somente ar estará disponível no cilindro do motor. A mistura combustível-ar é preparada somente nas proximidades do PMS quando o combustível é injetado.

Nesse caso, a combustão se inicia quando a mistura combustível-ar atingir espontaneamente as condições de pressão e temperatura necessárias à sua auto-ignição.

## ■ Número de Octano

Avalia a capacidade do combustível, em contato com o comburente, de formar mistura combustível-ar com pequena capacidade de auto-ignição quando submetida à compressão.

Exemplos de combustíveis de número de octano elevado: gasolina, gás natural, álcool hidratado carburante.

## ■ Número de Cetano

Avalia a capacidade do combustível, em contato com o comburente, de formar mistura combustível-ar capaz de entrar em ignição espontânea e rapidamente.

Exemplos de combustíveis de número de cetano elevado: óleo diesel e ésteres de gorduras vegetais e animais (biodiesel).

## ■ Motor CFR para determinação de Número Octano





## ■ Motor CFR para determinação de Número Cetano



# Motores de Combustão Interna



Qualidade de ignição de combustíveis utilizados em motores de ignição por compressão

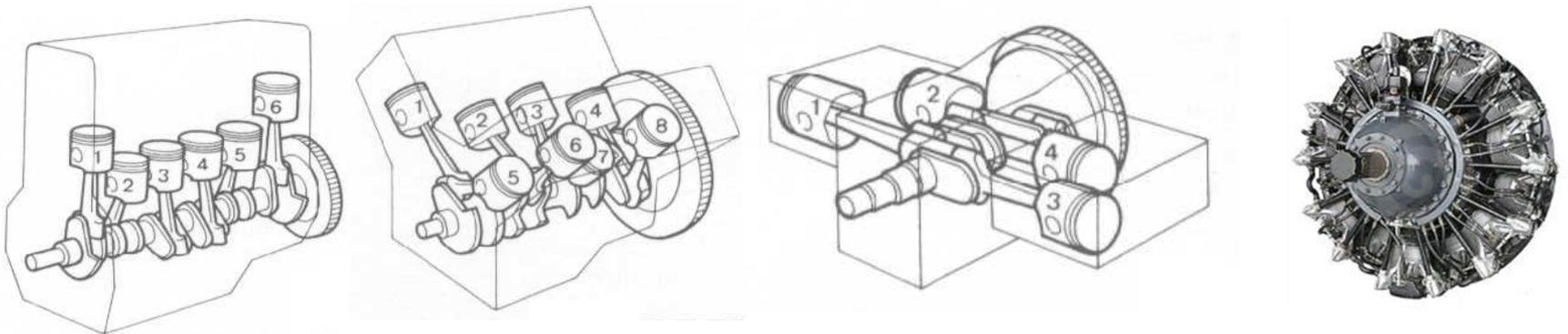
Combustíveis de referência: n- hexadecano (cetano) (N.C.= 100)  
alfa-metil- naftaleno (N.C.= 0)  
hepta-metil-nonano (N.C. = 15)

# Motores de Combustão Interna

## ■ Classificação

■ Quanto à disposição dos cilindros:

- em linha
- em V
- opostos
- radial

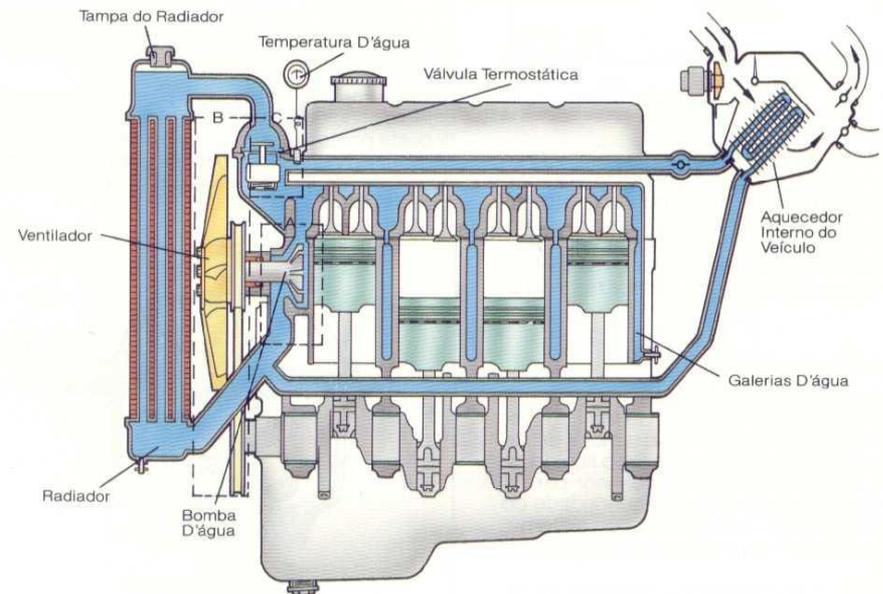
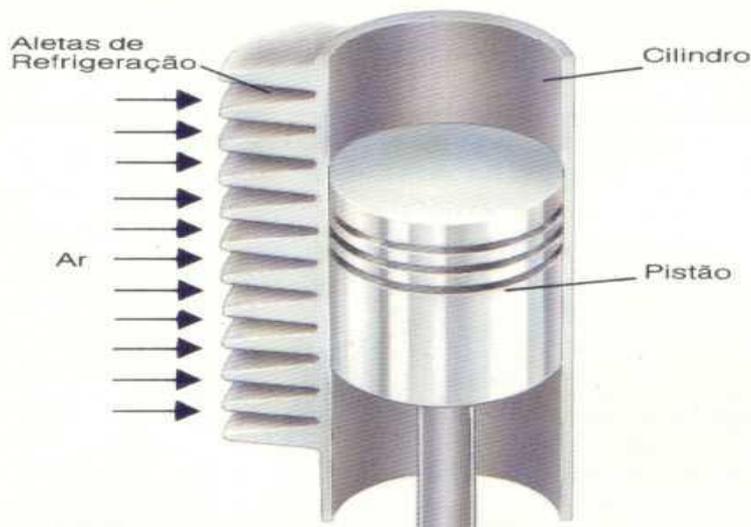


# Motores de Combustão Interna

## ■ Classificação

■ Quanto ao sistema de arrefecimento:

- ❑ arrefecimento a ar
- ❑ arrefecimento a água

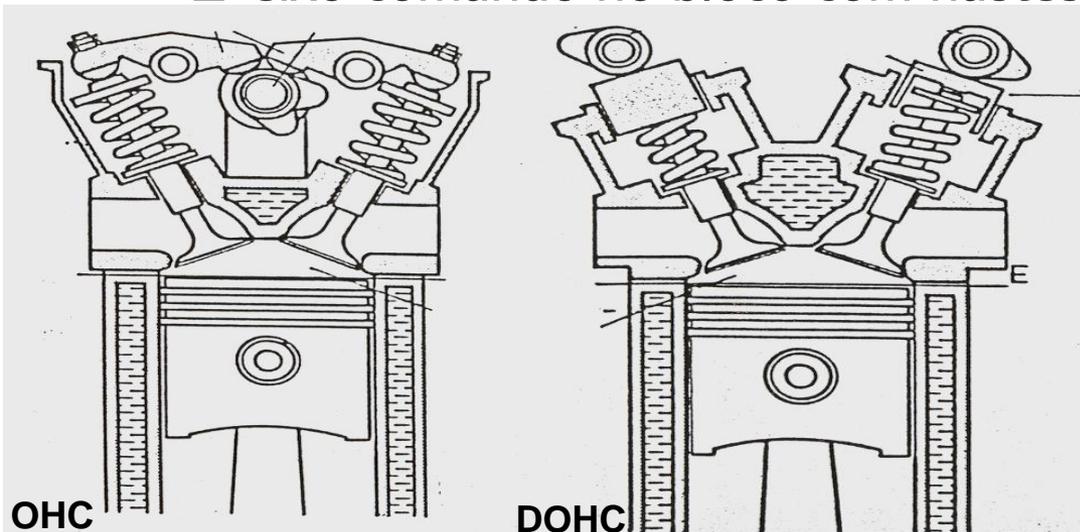


# Motores de Combustão Interna

## ■ Classificação

■ Quanto ao sistema de acionamento de válvulas:

- ❑ eixo comando único no cabeçote
- ❑ 2 eixos comandos no cabeçote
- ❑ eixo comando no bloco com hastes (varetas) e balancins

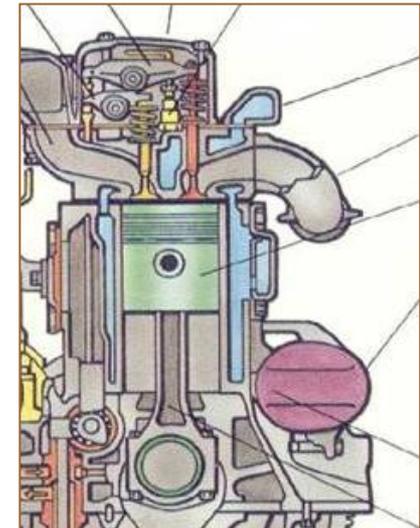


OHC

OverHead Camshaft

DOHC

Double OverHead Camshaft

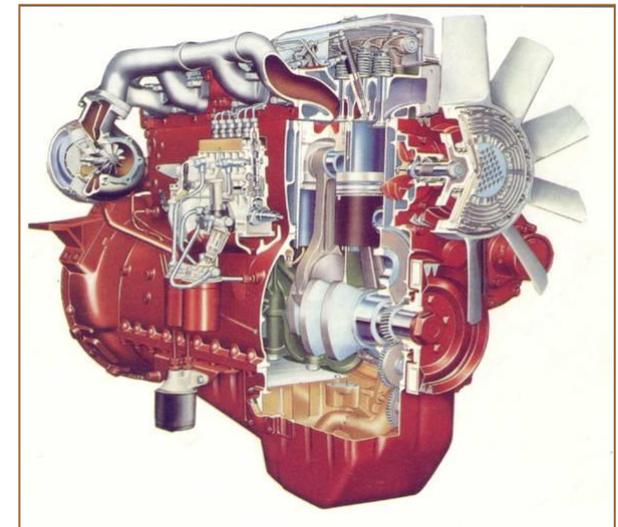
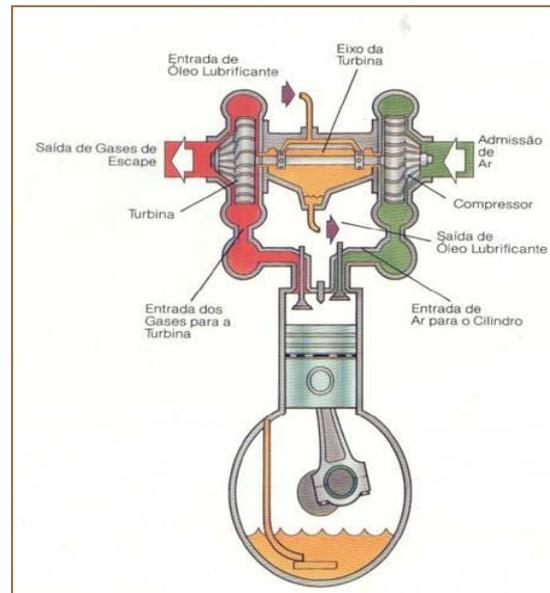


# Motores de Combustão Interna

## ■ Classificação

■ Quanto ao sistema de suprimento de ar:

- ❑ naturalmente aspirados
- ❑ sobrealimentados



# Motores de Combustão Interna

# Nomenclatura usual

Tampa de válvulas  
(cyl. head cover/Zylinderkopfhaube)

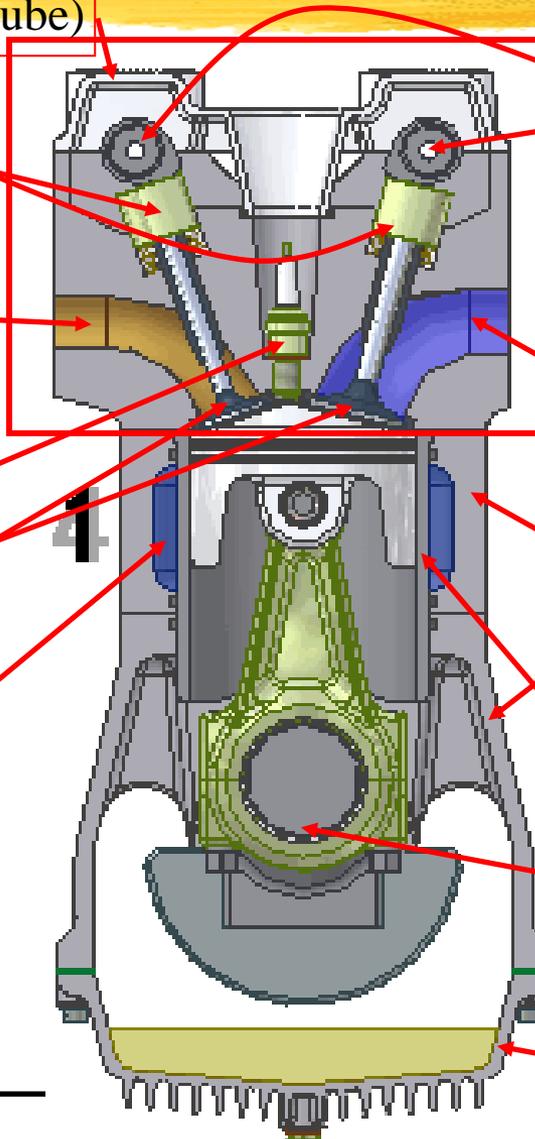
Seguidores  
(tappets/Stoessel)

Pórtico de escapeamento  
(exhaust port/Auslass-Kanal)

Vela de ignição  
(spark plug/Zuendkerze)

Válvulas  
(valve/Ventil)

Galeria de arrefecimento  
(water jacket/Wassermantel)



Eixos comando de válvulas  
(camshaft/Nockenwellen)

Cabeçote  
(cylinder head/Zylinderkopf)

Pórtico de admissão  
(intake port/Einlass-Kanal)

Bloco do motor  
(engine block/Zylinderblock)

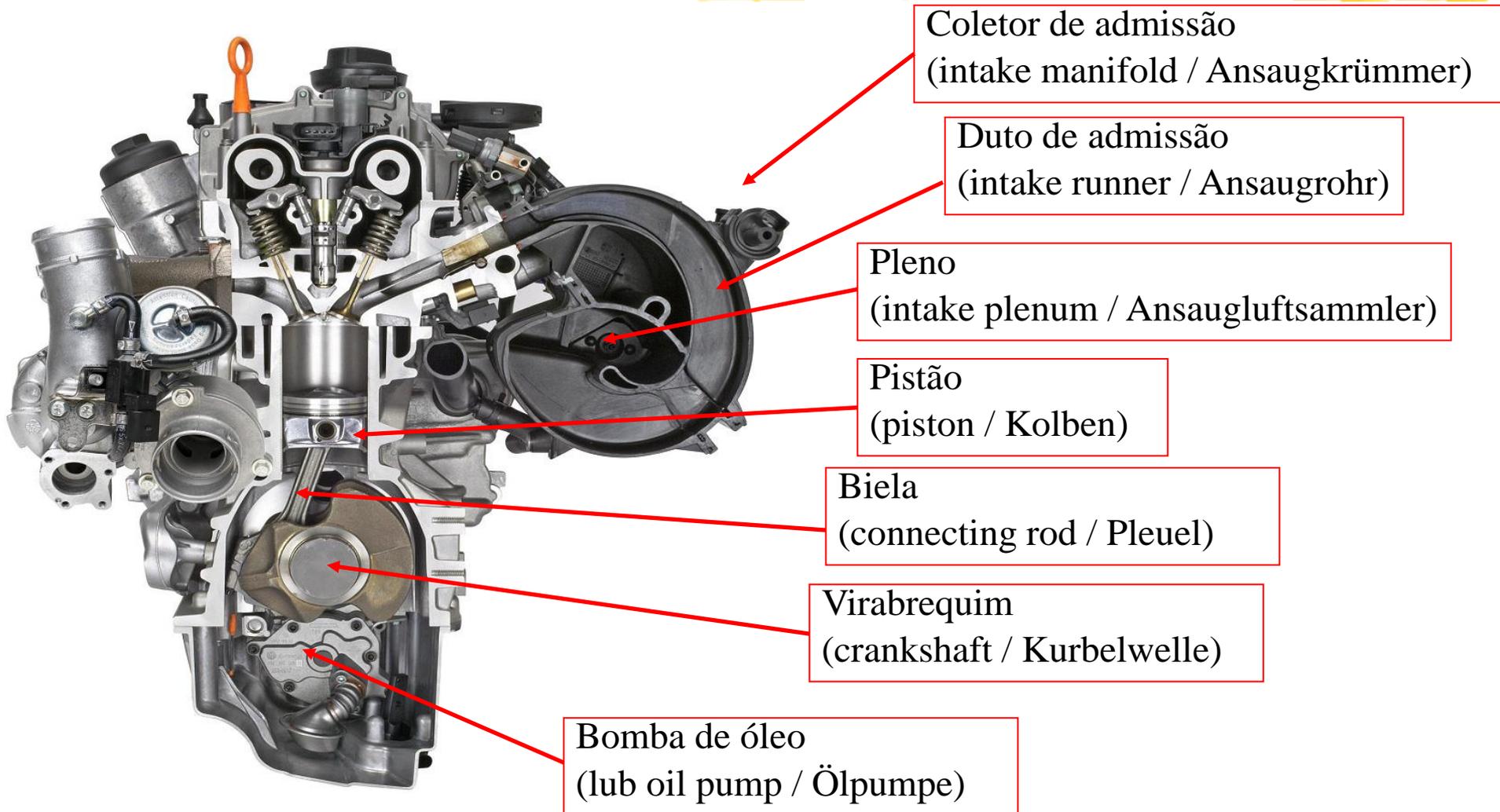
Cilindro  
(cylinder liner/Zylinderlaufbuechse)

Virabrequim ou eixo de manivelas  
(crankshaft/Kurbelwelle)

Cárter  
(oil sump or pan/oelwanne)

# Motores de Combustão Interna

# Nomenclatura usual



### ■ MIF de 2T

Em motores de pequenas potências ( $< 3$  kW), onde as desvantagens comuns de maior consumo, maior quantidade gerada de poluentes e maior nível de ruído relativamente aos MCI similares de 4T, são superadas pelo menor custo de fabricação, facilidades de manutenção e menor peso.

Exemplos: ciclomotores, moto-serras, pequenos grupos de geração de energia elétrica e de bombeamento, motores de popa, etc..

## ■ MIF de 4T

Em motores de potências pequenas e médias (5 a 200 kW), consumindo combustíveis líquidos e/ou gasosos de alta octanagem. Equipam, principalmente, veículos de passeio e de transporte de cargas leves. Nas versões a gás, podem também ser utilizados como substitutos dos MIC equivalentes em aplicações estacionárias.

### Vantagens comuns

Menos poluentes, menos ruidosos, com menor consumo e menor frequência de manutenção que os equivalentes de 2T.

### Desvantagens comuns

Preço inicial maior e manutenção mais complexa que os equivalentes de 2T.

## ■ MIC de 4T

Em motores de potências médias (entre 50 e 500 kW) que equipam veículos de transporte de cargas leves e meio-pesadas.

Também utilizados em aplicações estacionárias de geração de energia elétrica

### Vantagens comuns:

Potencialmente, apresentam rendimentos térmicos mais elevados que os equivalentes de ignição por faísca e menor frequência de manutenção, apesar de mais onerosa.

### Desvantagens comuns:

São, em geral, mais robustos (maior peso), mais ruidosos\* e de maiores custos de fabricação. Produzem mais óxidos de nitrogênio e material particulado.

## ■ MIC de 2T

Em motores de potências elevadas (acima de 500 kW) que equipam veículos de transporte de cargas pesadas (locomotivas, caminhões *off-road*, embarcações de grande porte) e grupos geradores de grande porte.

Têm, em geral, menor custo de fabricação, são mais leves e de mais fácil manutenção que os similares de 4T.

Potencialmente, considerando a exigência de menores rotações de funcionamento pelo porte avantajado, facilitam o uso de combustíveis de menor qualidade de ignição.

# Motores de Combustão Interna

Exemplo de motor alternativo de 2 tempos de ignição por compressão



## Entes geométricos:

PMS - ponto morto superior (TDC - *top dead center*)

PMI - ponto morto inferior (BDC - *bottom dead center*)

$D_p$  (bore) : diâmetro do cilindro

$s$  (stroke): curso do pistão

$V_u$ : Cilindrada unitária

$$V_u = (\pi D_p^2 \cdot s) / 4$$

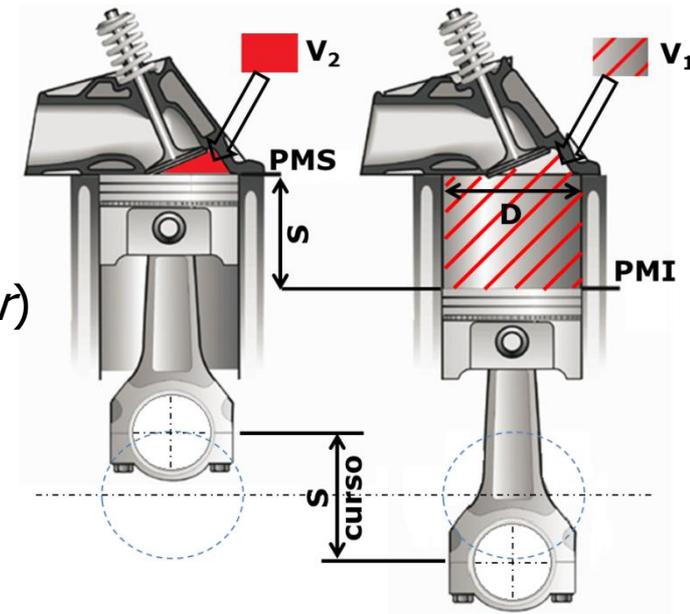
$V_o$  ( $V_2$ ): Volume da câmara de combustão

$V$  ( $V_1$ ): volume máximo no cilindro

$r_v$ : razão volumétrica ou taxa de compressão

$Z_c$  : número de cilindros do motor

$V_t$ : cilindrada total do motor



$$V = V_u + V_o$$

$$r_v = V / V_o$$

$$V_t = Z_c \cdot V_u$$

## Grandezas cinemáticas:

- posição do pistão em relação ao PMS:

$$x = r.(1-\cos \alpha) + L.[1- (1- \lambda^2 \cdot \text{sen}^2\alpha)^{1/2}]$$

$$x \approx r. [ ( 1- \cos \alpha) + 0,25.\lambda.( 1 - \cos 2\alpha)]$$

- velocidade instantânea do pistão:  $v = r.w.(\text{sen } \alpha + 0,5. \lambda. \text{sen } 2\alpha)$

- aceleração instantânea do pistão:  $a = r.w^2.(\cos \alpha + \lambda.\cos 2\alpha)$

onde  $r$  : comprimento da manivela

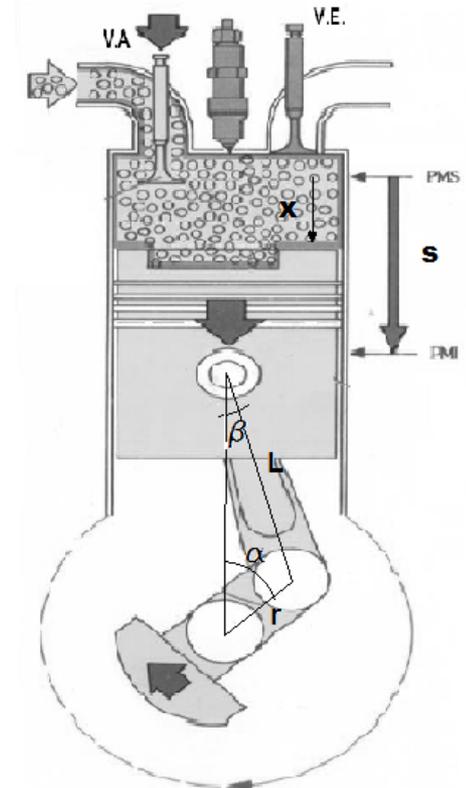
$$r = s/2$$

$L$  : comprimento da biela

$\lambda$  : relação manivela/biela

$$\lambda = r/L$$

$\alpha$  : posição angular do eixo de manivelas  
medido a partir do PMS.



## Exercício:

- a) Determinar a aceleração instantânea do pistão de um motor que possui curso  $s = 100$  mm e comprimento de biela  $L = 200$  mm quando o ângulo de manivela, relativamente ao PMS, for  $\alpha = 30^\circ$  ao funcionar @ 3000 rpm.
- b) Qual a taxa de compressão desse motor, sabendo que o diâmetro do pistão é  $D_p = 100$  mm e que o volume da câmara de combustão é  $V_o = 80$  cm<sup>3</sup>.

Solução:

$$a) \lambda = r/L = (s/2)/L = 50/200 = 0,25 \quad e \quad w = 2\pi n = 6,28 \times 3000/60 = 314,2 \text{ rd/s}$$

Portanto,

$$a = r \cdot w^2 \cdot (\cos \alpha + \lambda \cdot \cos 2\alpha) = 0,050 \times (314,2)^2 \times (0,866 + 0,25 \times 0,5) = 4.892 \text{ m/s}^2$$

$$b) V_u = \pi \cdot (5,0)^2 \times 10 = 785,4 \text{ cm}^3$$

$$r_v = (V_u + V_o)/V_o = (785,4 + 80)/80 = 10,82:1$$