

Motores a combustão interna

Sumário

	Página
1. Histórico.....	3
2. Definição de motores.....	3
3. Tipos de motores.....	4
3.1 – Motores a combustão externa.....	4
3.2 – Motores a combustão interna.....	4
4. Motores a combustão interna.....	5
4.1 – Conceitos preliminares.....	5
4.2 – Partes componentes.....	6
4.3 – Motor a combustão interna de pistão.....	9
4.3.1 – Ciclo Diesel 4 tempos.....	9
4.3.2 – Ciclo Diesel 2 tempos.....	11
4.4 – Coordenação de cilindros.....	12
4.5 – Tipos de injeção.....	12
4.6 – Cilindrada.....	13
4.7 – Relação de compressão.....	14
4.8 – Torque.....	16
4.9 – Potência.....	17
5. Unidades de potência.....	17
5.1 – Definições.....	18
5.2 – Conversões de unidades de potência.....	18
6. Motores superalimentados.....	19
6.1 – Sopradores.....	19
6.2 – Turbina.....	19

1. Histórico

Os primeiros motores a combustão externa apareceram no século XVIII e o combustível utilizado era a lenha, naquela época abundante e de baixo custo. Estes motores a vapor eram geralmente utilizados em máquinas estacionárias.

No século XIX apareceram os primeiros motores a combustão interna. Nestes, o combustível é queimado dentro do próprio motor e seu aparecimento provocou um rápido desenvolvimento mecânico. Estes motores levaram vantagem sobre as máquinas a vapor pela sua versatilidade, eficiência, menor peso por cavalo vapor, funcionamento inicial rápido e possibilidade de adaptação a diversos tipos de máquinas.

O primeiro motor a combustão interna foi construído pelo mecânico alemão Lenoir, em 1860, e tinha a potência de 1 cv, trabalhando com gás de iluminação.

Em 1861, Otto e Langen, baseando-se na máquina de Lenoir, construíram um motor que comprimia a mistura de ar e gás de iluminação, com ignição feita por uma centelha elétrica.

Em 1862, o engenheiro francês Beau de Rochas publicou estudos teóricos e estabeleceu alguns princípios termodinâmicos baseado no motor de Otto. Este, por sua vez, baseado no estudo de Rochas, desenvolveu um motor: o motor de ciclo Otto apresentado em 1872. Estes motores usavam como combustível o gás de carvão ou o gasogênio, com ignição feita por centelha elétrica.

Em 1889, fez-se a primeira aplicação do motor de ciclo Otto em veículos, utilizando-se como combustível a gasolina.

Em 1893, o engenheiro alemão Rudolf Diesel descreveu um novo motor, no qual a ignição da mistura ar mais combustível era feita por compressão. Este motor, que Diesel denominou “motor térmico racional”, acabou ficando conhecido como motor Diesel.

Os motores modernos são derivados dos construídos por Otto e Diesel e as características básicas dos mesmos são as seguintes:

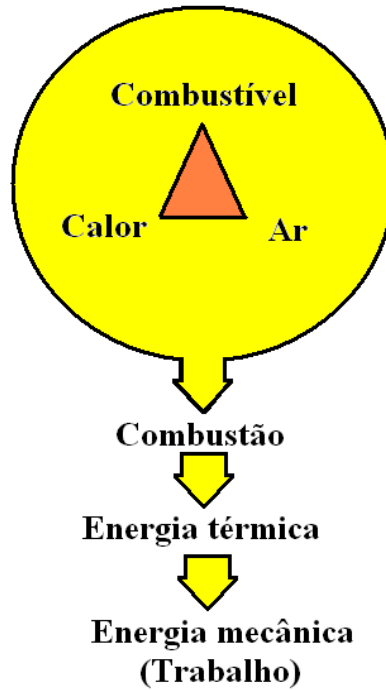
- a) Motores de ciclo Otto: utilizam combustível de baixa volatilidade, como a gasolina e o álcool. Para ignição necessitam de centelha produzida pelo sistema elétrico.
- b) Motores de ciclo Diesel: utilizam como combustível o óleo diesel. A inflamação do combustível injetado sob pressão na câmara de combustão ocorre pela compressão de ar e conseqüente elevação da temperatura.

2. Definição de motores

Motor é uma máquina que converte qualquer forma de energia em trabalho mecânico.

O motor de combustão transforma energia térmica (calorífica) em trabalho mecânico (energia mecânica).

Figura 1 – Esquema dos requisitos de um motor para produção de trabalho

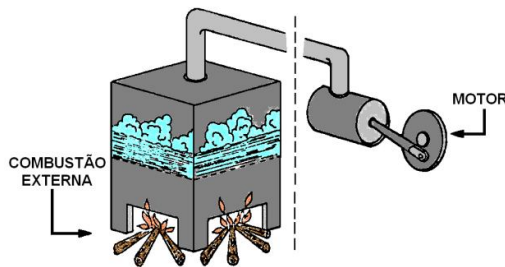


3. Tipos de motores

Quanto ao tipo de combustão, os motores podem ser:

3.1 – Combustão externa: máquinas a vapor

Figura 2 – Esquema de motor a combustão externa



- 3.2 – Combustão interna: **de pistão:** – ciclo Otto – a gasolina
– ciclo Diesel – a óleo diesel
de êmbolo rotativo: Wankel

Figura 3 – Esquema de motor a combustão interna de pistão

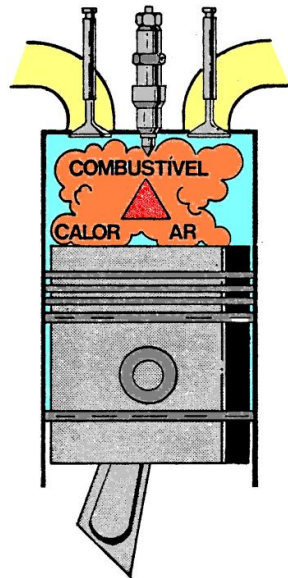
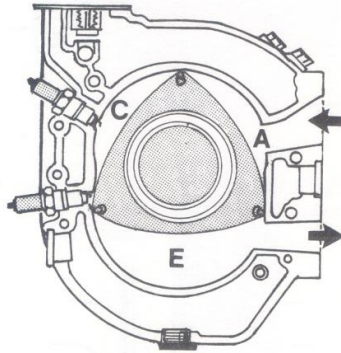


Figura 4 – Esquema de motor rotativo - Wankel



Os motores a combustão interna de pistão podem ser de 2 ou 4 tempos. OS motores a combustão interna de pistão (ciclo Diesel) podem ser de injeção direta ou indireta.

4. Motores a combustão interna

4.1 – Conceitos preliminares

Os motores a combustão interna são aqueles em que o combustível é queimado internamente.

Um mecanismo constituído por pistão, biela e virabrequim é que transforma a energia térmica (calorífica) em energia mecânica.

O movimento alternativo (vai e vem) do pistão dentro do cilindro é transformado em movimento rotativo através da biela e do virabrequim. OS motores de tratores possuem um ou mais cilindros e um correspondente número de pistões e bielas.

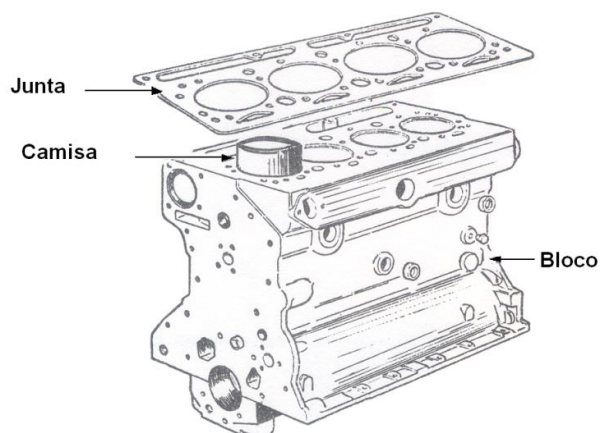
4.2 – Partes componentes

a) Bloco

É a maior parte do motor e sustenta todas as outras partes. Nele estão contidos os cilindros, geralmente em linha nos motores de tratores de rodas. São normalmente construídos de ferro fundido, mas a este podem ser adicionados outros elementos para melhorar suas propriedades.

Alguns blocos possuem tubos removíveis que formam as paredes dos cilindros, chamadas de “camisas”. Estas camisas podem ser “úmidas” ou “secas”, conforme entrem ou não em contato com a água de refrigeração do motor.

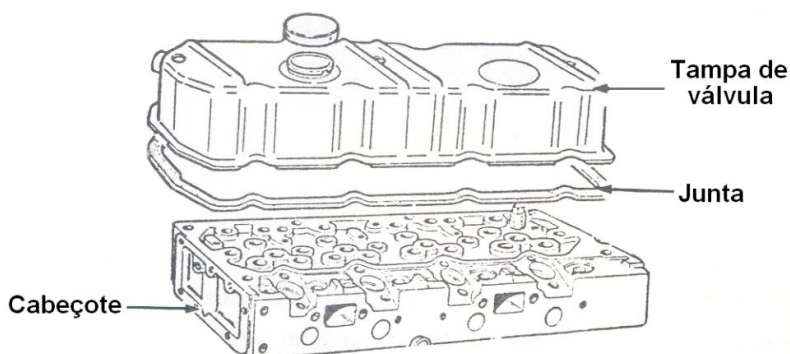
Figura 5 – Bloco do motor



b) Cabeçote

Este componente fecha o bloco na sua parte superior, sendo que a união é feita por parafusos. Normalmente, é fabricado com o mesmo material do bloco. Entre o bloco e o cabeçote existe uma junta de vedação.

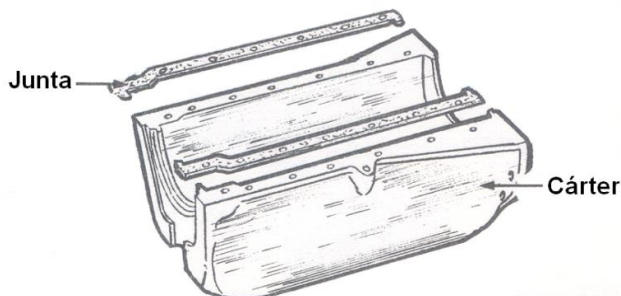
Figura 6 – Cabeçote



c) Cárter

O cárter fecha o bloco na sua parte inferior e serve de depósito para o óleo lubrificante do motor. Normalmente, é fabricado de chapa dura, por prensagem.

Figura 7 – Cárter



d) Pistão (êmbolo)

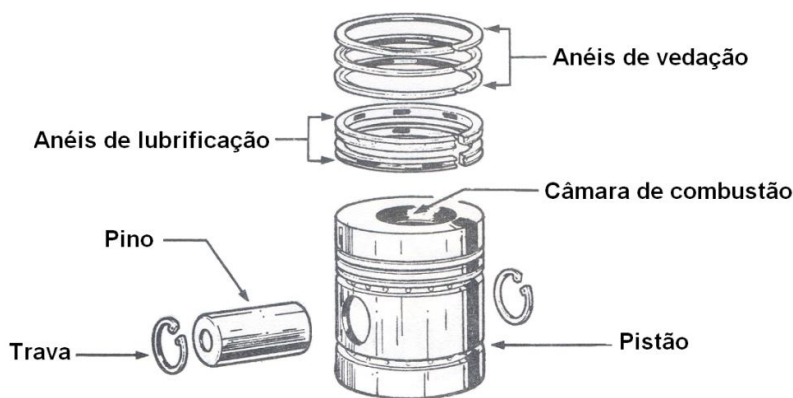
É a parte do motor que recebe o movimento de expansão dos gases. Normalmente, é feito de ligas de alumínio e tem um formato aproximadamente cilíndrico. No pistão encontram-se dois tipos de anéis:

d.1) anéis de vedação – estão mais próximos da parte superior (cabeça) do pistão;

d.2) anéis de lubrificação – estão localizados na parte inferior do pistão e têm a finalidade de lubrificar as paredes do cilindro.

O pistão liga-se à biela através de um pino. O pino é normalmente fabricado de aço cementado.

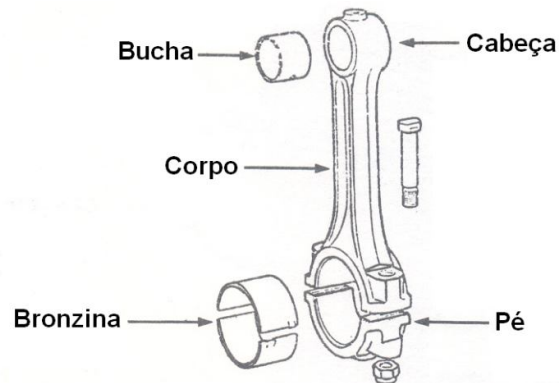
Figura 8 – Partes do pistão



e) Biela

É a parte do motor que liga o pistão ao virabrequim. É fabricado de aço forjado e divide-se em três partes: cabeça, corpo e pé. A cabeça é presa ao pistão pelo pino e o pé está ligado ao virabrequim através de um material antifricção, chamado casquilho ou bronzina.

Figura 9 – Biela

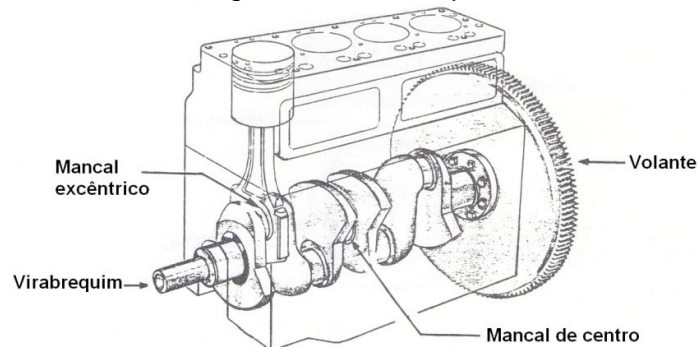


f) Virabrequim

É também chamado de girabrequim ou árvore de manivelas. É fabricado em aço forjado ou fundido. Possui mancais de dois tipos:

- f.1) excêntricos – estão ligados aos pés das bielas;
- f.2) de centro – sustentam o virabrequim ao bloco.

Figura 10 – Virabrequim



g) Volante

É constituído por uma massa de ferro fundido e é fixado no virabrequim. Acumula a energia cinética, propiciando uma velocidade angular uniforme no eixo de transmissão do motor. O volante absorve energia durante o tempo útil de cada pistão (expansão devido à explosão do combustível), liberando-a nos outros tempos do ciclo (quando cada pistão não está no tempo de potência), concorrendo com isso para reduzir os efeitos de variação do tempo do motor.

h) Válvulas

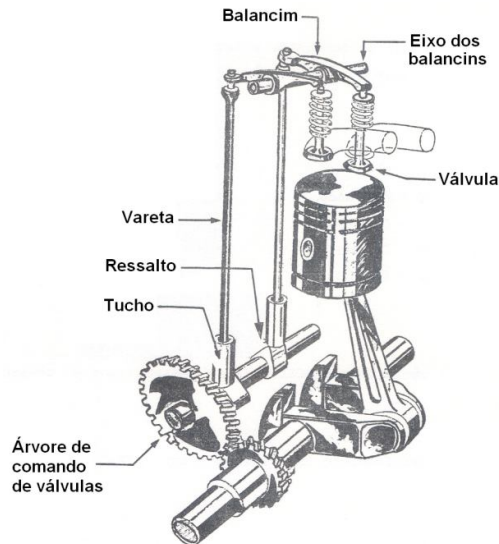
Existem dois tipos de válvulas: de admissão e de escape. Elas são acionadas por um sistema de comando de válvulas.

O movimento do virabrequim é transmitido para o eixo de comando de válvulas por meio de engrenagens. O eixo de comando de válvulas liga-se por uma vareta ao eixo dos balancins. Este, por sua vez, é que acionará as válvulas.

A abertura e o fechamento das válvulas estão relacionadas com o movimento do pistão e com o ponto de injeção, de modo a possibilitar o perfeito funcionamento do motor.

As engrenagens da distribuição podem ter uma relação de 1:2, o que significa que cada rotação da árvore de manivelas corresponde a meia rotação da árvore de comando de válvulas.

Figura 11 – Válvulas



i) Partes complementares

São os sistemas auxiliares indispensáveis ao funcionamento do motor: sistema de alimentação de combustível, sistema de alimentação de ar, sistema de arrefecimento, sistema de lubrificação e sistema elétrico.

4.3 – Motor a combustão interna de pistão

4.3.1 – Ciclo Diesel – 4 tempos

O motor a combustão interna de pistão que funciona segundo o ciclo Diesel apresenta, durante o funcionamento, quatro fases:

- 1^a – Admissão
- 2^a – Compressão
- 3^a – Combustão
- 4^a – Escape

A série dessas quatro fases consecutivas é chamada de ciclo do motor.

O detalhamento das fases é o seguinte.

1^a – Admissão

Nesta fase, o pistão desce, estando a válvula de admissão aberta e a de escape fechada.

Ao descer, o pistão cria uma depressão no cilindro. O ar é então forçado pela pressão atmosférica a entrar no cilindro, passando pelo filtro de ar e pela tubulação de admissão. A quantidade de ar admitida é sempre a mesma, qualquer que seja a potência que estiver sendo utilizada ou a posição do acelerador.

2ª – Compressão

Então, o pistão sobe, as válvulas de admissão e de escape estão fechadas.

O ar admitido na fase de admissão é comprimido até ocupar o volume da câmara de combustão. Devido à compressão, o ar se aquece.

No final da compressão, o bico injetor injeta, finamente pulverizado, o óleo diesel no interior da câmara de combustão.

O óleo diesel, em contato com o ar aquecido, se inflama, iniciando assim a combustão.

3ª – Combustão

O pistão desce, acionado pela força de expansão dos gases queimados. As válvulas de admissão e de escape estão fechadas.

A força de expansão dos gases queimados é transmitida pelo pistão à biela e desta ao virabrequim, provocando assim o movimento de rotação do motor.

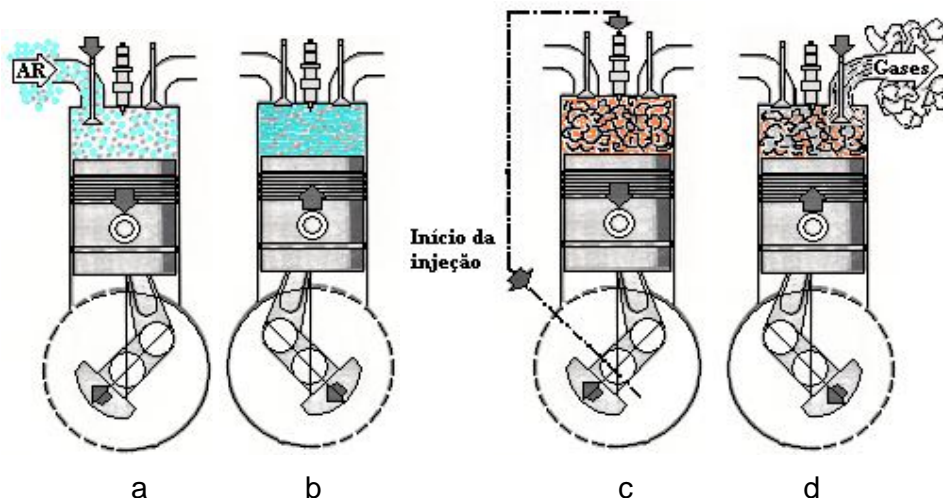
A expansão é o único tempo que produz energia, sendo que os outros três tempos consomem uma parte dessa energia. A energia produzida é acumulada pelas massas do virabrequim e do volante.

4ª – Escape

O pistão sobe, estando a válvula de escape aberta e a de admissão fechada.

Os gases queimados são expulsos através da passagem dada pela válvula de escape.

Figura 12 – Funcionamento do motor Diesel 4 tempos: a) admissão; b) compressão; c) combustão; d) escape.



4.3.2 – Ciclo Diesel – 2 tempos

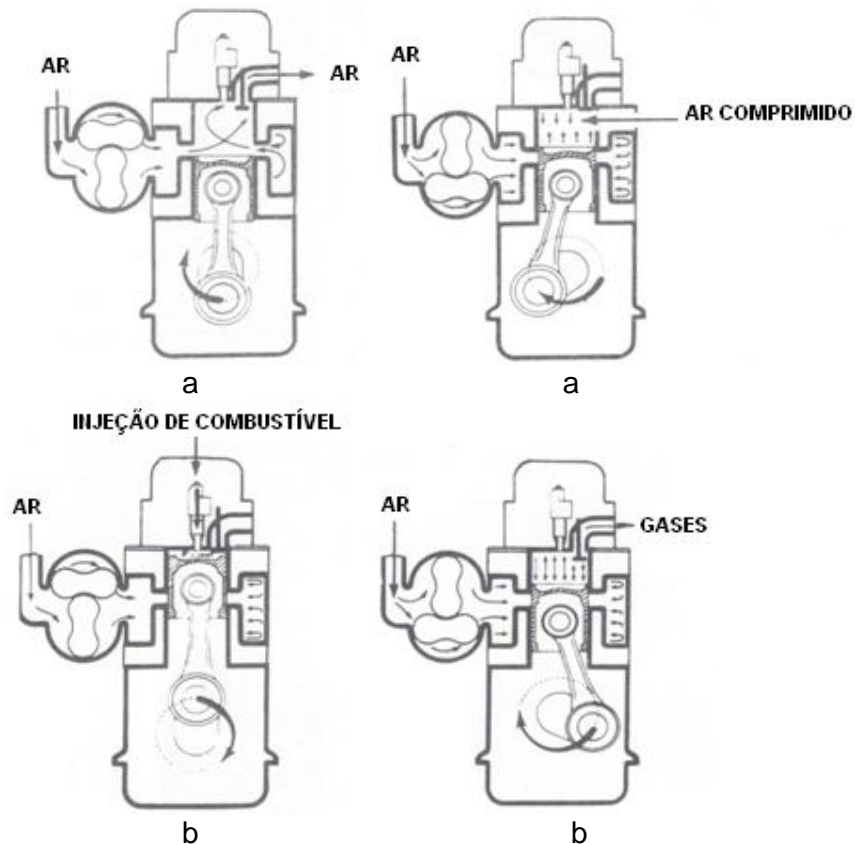
Num motor de 2 tempos a admissão e o escape ocorrem ao mesmo tempo da compressão e expansão. A parede do cilindro de um motor de 2 tempos contém uma fileira de janelas de admissão de ar.

No 1º tempo, o pistão está em seu movimento descendente, e descobre as janelas de admissão, dando entrada ao ar, que está sendo empurrado por um soprador. O ar que entra expulsa os gases queimados, que sairão através da passagem aberta pelas válvulas de escape.

O fluxo de ar em direção às válvulas de escape causa um efeito de limpeza, deixando o cilindro cheio de ar limpo, por isso, é muitas vezes esse processo é chamado de “lavagem”.

No 2º tempo, o pistão está em seu movimento ascendente e cobre as janelas de admissão (fechando-as) ao mesmo tempo em que as válvulas de escape fecham-se. O ar limpo admitido é submetido à compressão.

Figura 13 – Funcionamento do motor Diesel 2 tempos: a) 1º tempo; b) 2º tempo



Um pouco antes de o pistão alcançar sua posição mais alta, uma certa quantidade de óleo diesel é atomizada na câmara de combustível pela unidade injetora de combustível. O intenso calor, causado pela alta compressão do ar, inflama imediatamente o combustível atomizado no cilindro.

A pressão resultante força o pistão para baixo, no curso de expansão. As válvulas de escape vão se abrir quando o pistão estiver na metade do curso

descendente, permitindo que os gases queimados saiam pelo coletor de escapamento.

Quando o pistão, em seu curso descendente, descobre as janelas de admissão, o cilindro é novamente “lavado” pelo ar limpo.

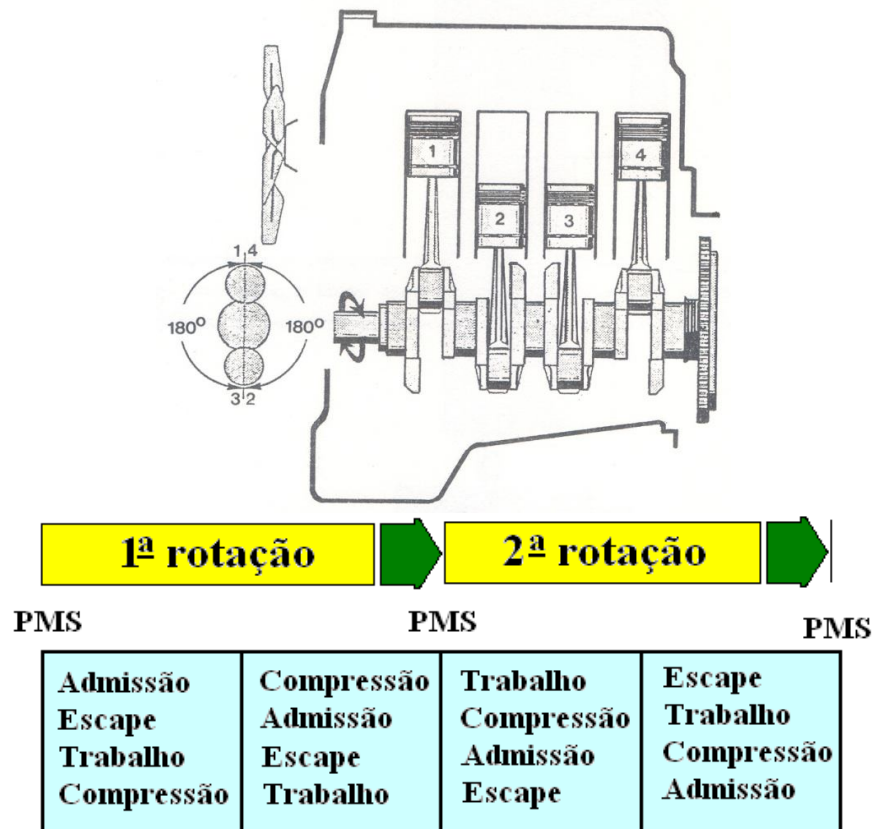
O ciclo completo de combustão é concluído em cada cilindro durante cada volta do virabrequim, ou em outras palavras, em 2 tempos.

4.4– Coordenação dos cilindros

Os motores de tratores têm, em geral, 4 ou 6 cilindros. Para um funcionamento uniforme e equilibrado do motor, os movimentos dos pistões são alternados.

Num motor de 4 cilindros, o virabrequim tem uma forma tal que os pistões 1 e 4 movem-se num sentido e os pistões 2 e 3 movem-se em sentido contrário. Considerando-se um motor de 4 tempos, as diversas fases do ciclo em cada cilindro estão mostradas na Figura 14.

Figura 14 – Coordenação dos cilindros de um motor

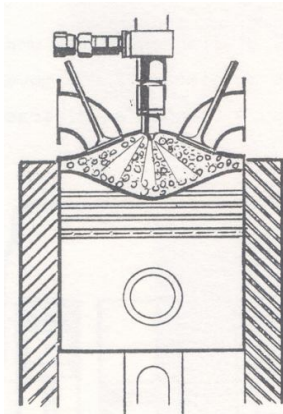


4.5– Tipos de injeção

Em relação à câmara de câmara de combustão, os motores Diesel dividem-se nos seguintes tipos:

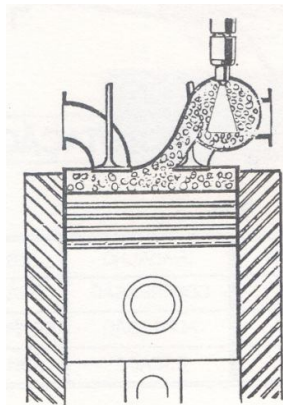
a) injeção direta – o combustível é injetado diretamente na câmara de combustão;

Figura 15 – Esquema da injeção direta de combustível



b) injeção indireta – durante o curso de compressão, o ar penetra em movimentos rotativos na câmara de turbulência, onde se dá a queima na maior parte do combustível, injetado no final do curso de compressão. A pressão dos gases de combustão aumenta aos poucos.

Figura 16 – Esquema da injeção indireta de combustível



4.6– Cilindrada

É o volume deslocado pelo pistão do ponto morto superior (PMS) até o ponto morto inferior (PMI) multiplicado pelo número de cilindros do motor.

$$V = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot h \cdot n}{4}$$

onde:

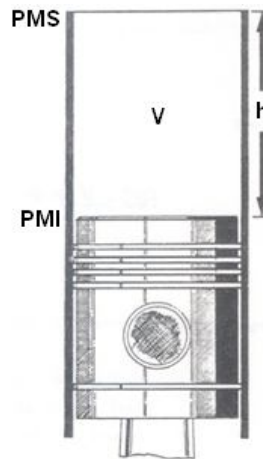
V = cilindrada, expressa em cm³, litros ou pol³

D = diâmetro do pistão, em cm ou pol

h = curso do pistão do PMI ao PMS, em cm ou pol

n = número de cilindros

Figura 17 – Coordenadas para cálculo da cilindrada



4.7 – Relação de compressão

A câmara de combustão é o espaço livre depois da cabeça do pistão quando este atinge o PMS.

A compressão do ar contido no cilindro é feita pelo pistão durante seu curso do PMI ao PMS no tempo de compressão. O volume inicial ocupado pelo ar é somente o da câmara de combustão.

A relação (ou taxa) de compressão é a relação entre o volume inicial e o volume final. A relação de compressão da gasolina é 6:1 a 8:1; do álcool é 12:1 a 14:1 e do óleo diesel é de 16:1 a 18:1.

$$R_C = \frac{V + v}{v}$$

onde:

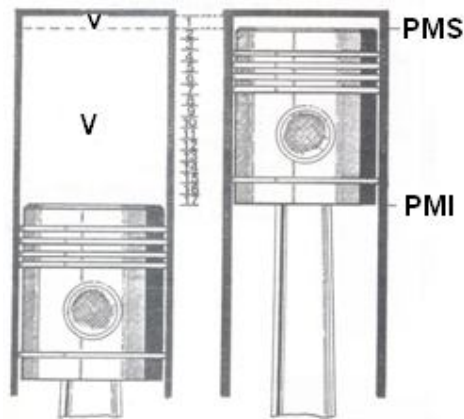
R_C = relação de compressão (adimensional)

V = cilindrada individual (de um pistão), em cm^3 , pol^3 , litros

v = volume da câmara de combustão, em cm^3 , pol^3 , litros

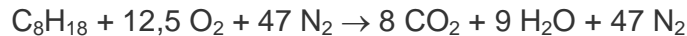
Para que a queima do combustível ocorra dentro dos padrões técnicos do ciclo e a expansão dos gases produza a pressão e o trabalho desejados, é necessário que a massa de combustível injetada no motor seja misturada a uma quantidade de ar. Forma-se assim a mistura combustível-ar, cuja dosagem é feita pela injeção eletrônica ou pelo carburador.

Figura 18 – Coordenadas para cálculo da relação de compressão



A gasolina é uma mistura de vários hidrocarbonetos, que, na média típica, pode ser representada por C_8H_{18} .

Assim, a estequiometria da combustão completa da gasolina é definida na equação:



Seguindo o mesmo princípio, a combustão completa do etanol segue a equação abaixo (desconsiderada a fração de água que o caracteriza como hidratado):



Estas proporções estabelecem a quantidade mínima de ar necessária para fornecer a quantidade de oxigênio requerida pela queima completa dos combustíveis, considerando que o ar atmosférico possui 21% de oxigênio e 79% de nitrogênio.

Multiplicando as quantidades moleculares por seus respectivos números de massa, nota-se que as proporções estequiométricas da mistura combustível-ar para gasolina e álcool são:

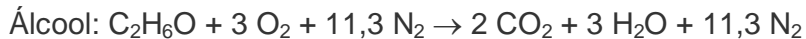


Combustível: $[C] 8 \times 12 + [H] 18 \times 1 = 114$

Ar: $[O] 12,5 \times 32 + [N] 47 \times 28 = 1.716$

Proporção estequiométrica = $\frac{1.716}{114} = 15$

Esse valor significa que são necessárias 15 unidades de massa de ar para cada unidade de massa de gasolina injetada no motor.



Combustível: $[C] 2 \times 12 + [H] 6 \times 1 + [O] 1 \times 16 = 46$

Ar: [O] 3×32 + [N] $11,3 \times 28 = 412,4$

$$\text{Proporção estequiométrica} = \frac{412,4}{46} = 9$$

Esse valor significa que são necessárias nove unidades de massa de ar para cada unidade de massa de álcool injetada no motor.

É importante reiterar que estes cálculos são ideais, ou seja, consideram apenas as estequiometrias das massas de combustível e de ar para uma reação de combustão completa. Normalmente, os veículos trabalham com a chamada *mistura econômica*, que admite um excesso de ar para aumentar a eficiência da combustão. Além disso, a combustão no motor é incompleta. As reações de oxidação, que deveriam combinar oxigênio e carbono, gerando dióxido de carbono (CO₂), não se completam, resultando na formação de monóxido de carbono (CO), um poluente tóxico.

4.8 – Torque

O torque é definido como o produto da força atuante (pressão exercida sobre a área da cabeça do pistão) pela distância perpendicular do eixo à direção dessa mesma força.

É expresso pela fórmula:

$$T = F \cdot d$$

onde:

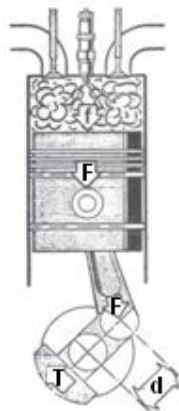
T = torque, expresso em kgfm (Sistema Técnico), kpm (quilopond metro) (DIN), lbf.ft (SAE), J (Sistema Internacional = N.m)

F = intensidade da força atuante, expressa em kgf, lbf, N

d = distância perpendicular entre o eixo e a direção a força, em m, pés

O torque depende exclusivamente do tamanho e da quantidade de pistões, da relação de compressão e do tipo de combustível utilizado, variando muito pouco com a rotação do motor, devido à perda de eficiência nas rotações mais altas e muito baixas. Um motor de mais torque tem possibilidade de fazer o trator puxar maior carga desde que o peso do mesmo propicie aderência suficiente no solo.

Figura 19 – Coordenadas para o cálculo do torque



4.9 – Potência

A potência de um motor é definida como o trabalho realizado numa unidade de tempo. A potência é calculada pela seguinte fórmula:

$$\overline{W} = \frac{F \cdot d}{t}$$

onde:

\overline{W} = potência, expressa em cv, PS, HP, Watts

F = intensidade da força atuante, expressa em kgf, lbf, J

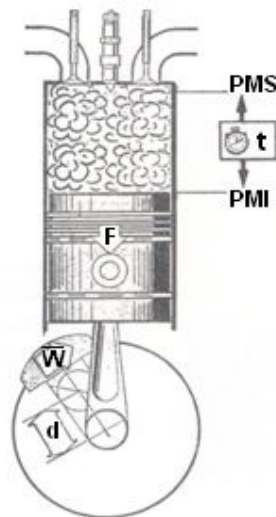
d = distância perpendicular entre o eixo e a direção a força, em m, pés

t = tempo, em h, min, s

Um trator com um motor mais potente, desde que tenha o peso adequado, pode executar mais trabalho que um menos potente, no mesmo tempo.

Ao contrário do torque, a potência depende da rotação do motor, ou seja, nas rotações mais altas alcança-se uma maior potência até um ponto em que, mesmo aumentando-se a rotação, a potência passa a diminuir.

Figura 20 – Coordenadas para o cálculo da potência



5 – Unidades de potência

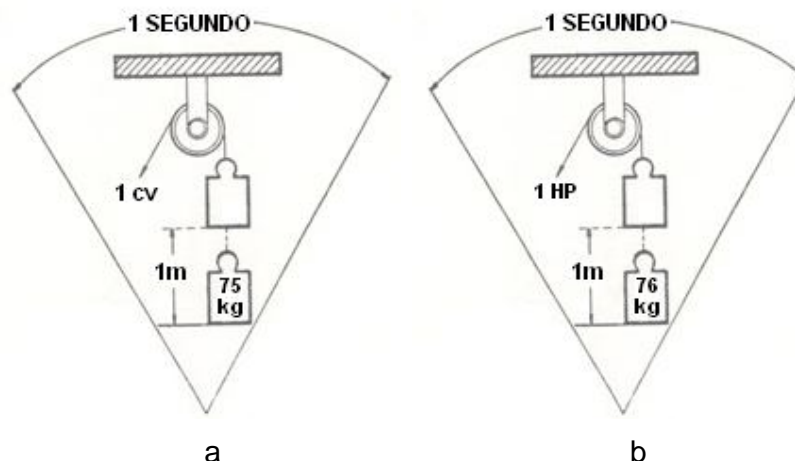
As unidades de potência mais usadas são:

- cv – cavalo vapor (Brasil)
- PS – pferdes tärke (Alemanha)
- HP – horse Power (USA)
- W – watt (adotado pelo Sistema Internacional de Unidades)

5.1– Definições

- cv – em cv ou PS é a força necessária para elevar uma massa de 75 kg à altura de um metro em um segundo.
- HP – um HP é a força necessária para elevar uma massa de 76 kg à altura de um metro em um segundo.
- W – um watt é a potência desenvolvida quando se realiza contínua e uniformemente um trabalho igual a um joule por segundo.

Figura 21 – Esquema para cálculo do: a) cv; b) HP.



5.2 – Conversões de unidades de potência

Tabela 1 – Conversões de unidades de potência

	cv	PS	HP	W	kW
cv	1	1	0,9863	735,5	0,7355
PS	1	1	0,9863	735,5	0,7355
HP	1,014	1,014	1	745,7	0,7457
W	0,00136	0,00136	0,00134	1	0,001
kW	1,36	1,36	1,341	1000	1

A potência de um motor pode ser medida segundo as seguintes normas:

- Norma DIN (Deutsche Industrie Normen – Alemanha) – a potência do motor é medida com o ventilador, bomba d'água, bomba injetora, dínamo, silencioso, filtro de ar acoplados. A potência é expressa em PS.
- Norma CUNA (Itália) – os valores CUNA são de 5 a 10% superiores aos valores DIN, visto que a potência do motor é medida sem o filtro de ar e sem o silencioso.
- Norma SAE (Society of Automotive Engineers – USA) – os valores SAE são de 10 a 25% superiores aos valores DIN, visto que todos os agregados e os consumidores de energia são eliminados durante a medição da potência do motor.

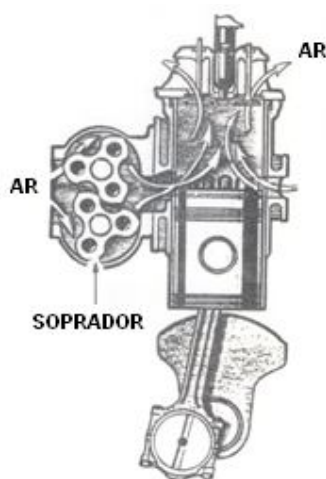
6 – Motores Superalimentados

A potência desenvolvida por motores a combustão interna pode ser aumentada com a elevação da pressão de admissão. Este fenômeno é obtido com aplicação da superalimentação. Este processo consiste em forçar o ar para o interior do cilindro, de modo que o peso da carga aumente. Os superalimentadores são de dois tipos: sopradores e turbinas.

6.1 – Soprador

É um dispositivo que tem por finalidade manter um fluxo de ar contínuo e forçado para o interior do cilindro. É acionado pelo próprio motor.

Figura 22 – Soprador



6.2 – Turbina

É um dispositivo composto de dois rotores, ligados entre si por um eixo. É acionado pela energia cinética dos gases queimados.

Figura 23 – Turbina

