



Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Instituto de Física- Disciplina Física III-C
Professor Claudir Barbieri

Motores à combustão de quatro tempos

Stefani Gabriele Benevegnú de Souza

Introdução

Um motor de combustão é uma máquina térmica que transforma a energia proveniente de uma reação química em energia mecânica. Existem motores de combustão interna e externa.

O [motor a vapor](#) de trens antigos e navios a vapor é o melhor exemplo de motor de combustão externa. O combustível (carvão, madeira, óleo ou outro) é queimado fora do motor para produzir vapor, e este gera movimento dentro do motor.

A combustão interna é muito mais eficiente do que a combustão externa, ou seja, gasta menos combustível para gerar um determinado trabalho.

Neste texto será dado enfoque aos motores de combustão interna de 4 tempos.

Histórico:

Desde os primórdios, o homem utiliza fontes motoras para obter trabalho. Por muitos séculos a tração animal foi a única fonte de força utilizada para realizar trabalho. A própria força humana foi utilizada para gerar trabalho pelas primeiras máquinas simples criadas pelo homem, tais como alavancas, esteiras, cordas e polias. A partir destes dispositivos surgiram os primeiros guindastes e moinhos.

Com o avanço da sociedade e a necessidade de novas fontes motoras o homem desenvolveu novas tecnologias; Foram inventadas as turbinas, as máquinas à vapor e os motores à combustão.

Em 1824 *Nicolas Diogo Léonard Sadi Carnot* estabeleceu a teoria fundamental de um motor de dois tempos e em 1926, Samuel Morey patenteou o primeiro motor à combustão interna.

Em 1867, *Nicolaus Otto* desenvolveu o primeiro "motor de gás atmosférico". Logo após, junto de *Gottlieb Daimler* e *Wilhelm Maybach*, desenvolveu o primeiro motor de quatro tempos.

Em 1896, *Karl Benz* patenteou o primeiro motor boxer, com cilindros opostos horizontalmente.

Motor à combustão interna

São considerados motores de combustão interna os motores que utilizam os próprios gases de combustão como fluido de trabalho.

Nos motores de combustão interna, a transformação de energia calorífica resultante da queima ou da explosão de uma mistura de ar com combustível é feita no interior de um dos órgãos da máquina, a câmara de explosão. Podem ser a gás, a gasolina, o álcool, o diesel, o metanol, entre outras substâncias inflamáveis. Desses todos, os mais usados são a gasolina, o álcool e o diesel.

A gasolina tem como característica principal o baixo peso por potência, a capacidade de fornecer acelerações rápidas e trabalhar com altas velocidades. O diesel é usado na propulsão de navios, locomotivas, tratores, grandes caminhões, automóveis, ônibus, lanchas e outros tipos de embarcações; geralmente na propulsão de veículos pesados.

Os motores de combustão interna são baseados no princípio de que os gases se expandem quando aquecidos. Controlando-se essa expansão dos gases, pode-se obter pressão, a qual será utilizada para movimentar algum órgão da máquina, tendo-se assim a transformação da energia calorífica do combustível em energia mecânica no órgão motor da máquina.

O funcionamento desses motores é baseado em modelos termodinâmicos ideais. Exemplos desses modelos são o ciclo de Otto e o ciclo Diesel, que fazem menção aos processos pelos quais os gases passam no interior do motor.

Máquinas inspiradas no ciclo de Otto são chamadas motores de ignição por faísca, as inspiradas em ciclo Diesel são motores de ignição por compressão. Ambos os tipos podem ser construídos para operar em dois ou quatro tempos, o que significa que cada

ciclo de funcionamento pode ocorrer em uma ou duas voltas do eixo de manivelas.

Os mecanismos dos motores ditam os processos pelos quais passaram os fluidos e determinam as características dos ciclos.

Motor à combustão interna de quatro tempos

O motor baseado no ciclo ideal de Otto caracteriza-se por ter sua [ignição](#) por [faísca](#). Este tipo é o mais utilizado em [automóveis](#) de passeio e [motocicletas](#).

Nos motores de quatro tempos, os gases completam um ciclo termodinâmico a cada duas voltas do eixo. Neste caso, para um pistão, ocorre admissão e compressão numa volta e [transferência de calor](#) na consecutiva.

Esta alternância requer necessariamente o emprego de um (ou mais) [comando de válvulas](#), engrenado à [árvore de manivelas](#) de tal forma que tenha metade da velocidade de rotação da mesma, permitindo que o ciclo de abertura de válvulas dure os quatro tempos.

- **Ciclo de Otto**

Este ciclo termodinâmico foi idealizado pelo engenheiro francês *Alphonse Beau de Rochas* em 1862. De forma independente, o engenheiro alemão *Nikolaus Otto* concebeu coisa similar em 1876, além de construir um motor que operava com o mesmo, embora não exatamente igual aos atuais motores.

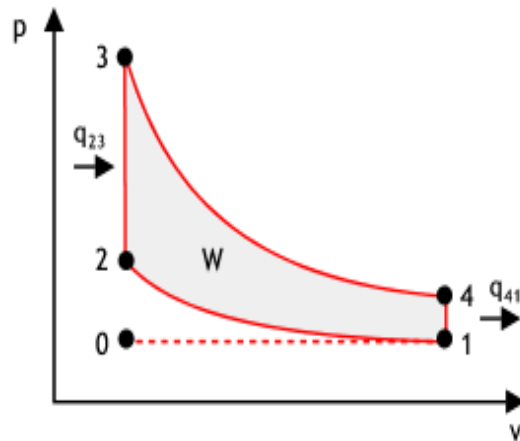


Gráfico de pressão X Volume para o ciclo de Otto:

Os processos 1-2 e 3-4 são adiabáticos. A troca de calor se dá em 2-3 (calor fornecido) e 4-1 (calor cedido ao ambiente) que são transformações isocóricas e valem as relações:

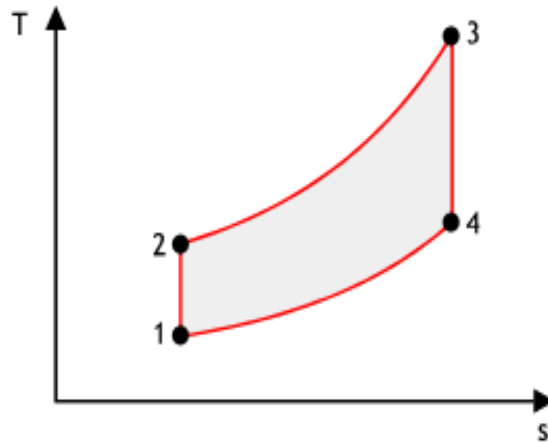
$$Q_{23} = c_v (T_3 - T_2)$$

$$Q_{41} = c_v (T_1 - T_4)$$

Quanto ao trabalho executado, ele é nulo em 2-3 e 4-1 porque são processos sob volume constante. E o trabalho das transformações adiabáticas 3-4 e 1-2 é:

$$w = w_{34} + w_{12} = c_v (T_3 - T_4) + c_v (T_1 - T_2)$$

$$\text{ou seja, } w = c_v (T_3 - T_2) + c_v (T_1 - T_4) = Q_{23} + Q_{41}$$

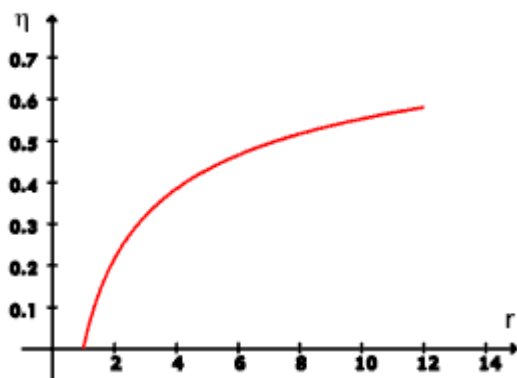


O calor da transformação 4-1 deve ter sinal negativo, pois o calor é cedido pelo ciclo.

A eficiência do ciclo é dada pela relação entre o trabalho realizado e o calor fornecido:

$$\eta = w / q_{23} = (q_{23} + q_{41}) / q_{23} = 1 + q_{41}/q_{23}$$

$$\eta = 1 + c_v (T_1 - T_4) / c_v (T_3 - T_2) = 1 + T_1 [1 - (T_4/T_1)] / T_2 [(T_3/T_2) - 1]$$



$$T_2/T_1 = T_3/T_4 = (v_1/v_2)^{(x-1)} \text{ onde } x \text{ é a relação } c_p/c_v.$$

Disso resulta que $T_4/T_1 = T_3/T_2$ e a igualdade anterior da eficiência pode ser simplificada:

$$\eta = 1 - T_1/T_2 = 1 - 1 / [(v_1/v_2)^{(x-1)}]$$

O termo (v_1/v_2) equivale á relação entre os volumes máximo e o mínimo do interior do cilindro. É comumente denominado **relação de compressão** ou **taxa de compressão** do motor, que se simboliza com r :

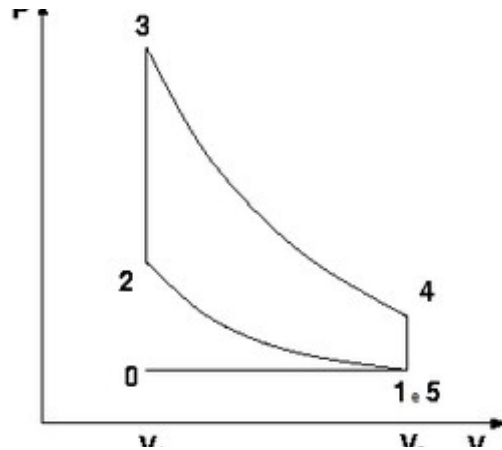
$$r = (v_1/v_2)$$

Portanto, a eficiência é dada por:

$$\eta = 1 - 1 / r^{(x-1)}$$

O gráfico da figura anterior mostra a variação da eficiência com r , para $x = 1,35$ (valor típico para uma mistura ar e combustível comum). Entretanto, na prática, a taxa de compressão é limitada pela ocorrência de auto-ignição da mistura. Valores reais estão na faixa de 9 a 11. Mesmo com essa limitação, a eficiência real do ciclo é significativamente inferior à calculada por essa fórmula.

O ciclo de Otto constitui-se dos seguintes processos:



- Admissão [isobárica](#) (0-1)
- Compressão [adiabática](#) (1-2)
- Combustão [isocórica](#) (2-3)
- Expansão [adiabática](#) (3-4)
- Abertura de válvula (4-5)
- Exaustão [isobárica](#) (5-0)

- Funcionamento de um motor

Um motor pode ser dividido em partes fixas e móveis. Partes fixas são as partes que não entram em movimento, quando o motor entra em funcionamento, por exemplo: bloco, cárter e cabeçote. Partes móveis são caracterizadas pelas partes que se movimentam quando o motor entra em funcionamento, tais como, [árvore de manivelas](#), [pistão](#), [biela](#) e [comando de válvulas](#).

Considerando o uso de apenas duas [válvulas](#) que são comandadas pelos ressaltos de árvore de cames, uma designada por válvula de admissão, que permite a introdução no cilindro de uma mistura gasosa composta por ar e combustível e outra designada como válvula de escape, que

permite a expulsão para a atmosfera dos gases queimados, o ciclo de funcionamento de um motor de combustão a 4 tempos é o seguinte:

1º Tempo: ADMISSÃO - À medida que o pistão move-se do PMS (Ponto Motor Superior), ou seja, a posição mais elevada de seu curso, para o PMI (Ponto Morto Inferior), ou posição mais baixa de seu curso, a válvula de admissão se abre e a mistura de ar e combustível é vaporizada para dentro da câmara de combustão por aspiração, produzida pela descida do pistão. O Virabrequim efetua meia volta durante este tempo.

A válvula de admissão se abre enquanto o pistão se move para baixo, levando o cilindro a aspirar e se encher de ar e combustível. Essa fase é a admissão. Somente uma pequena gota de gasolina precisa ser misturada ao ar para que funcione.

A maioria dos carros tem motores **de aspiração natural**, o que significa que o ar flui por si só para os cilindros pela depressão criada pelos pistões no curso de admissão, depois de passar pelo filtro de ar.

Motores de alto desempenho são ou **turbocomprimidos**, ou **comprimidos**, o que significa que o ar que se dirige aos cilindros é pressurizado antes (de modo que mais mistura ar-combustível possa ser introduzida nos cilindros) para melhorar o desempenho. A quantidade de pressurização é chamada de sobrepressão. O turbocompressor possui uma pequena turbina acoplada ao coletor de escapamento faz girar a turbina de compressão que recebe o ar de admissão. Os compressores (há vários tipos) são acionados diretamente pelo motor. O sistema de alimentação bombeia combustível do tanque e o mistura com o ar, de modo que a mistura ar-combustível correta seja admitida nos cilindros.

Existem três maneiras comuns de enviar o combustível: carburação, injeção de combustível no coletor de admissão e injeção direta de combustível na câmara de combustão.

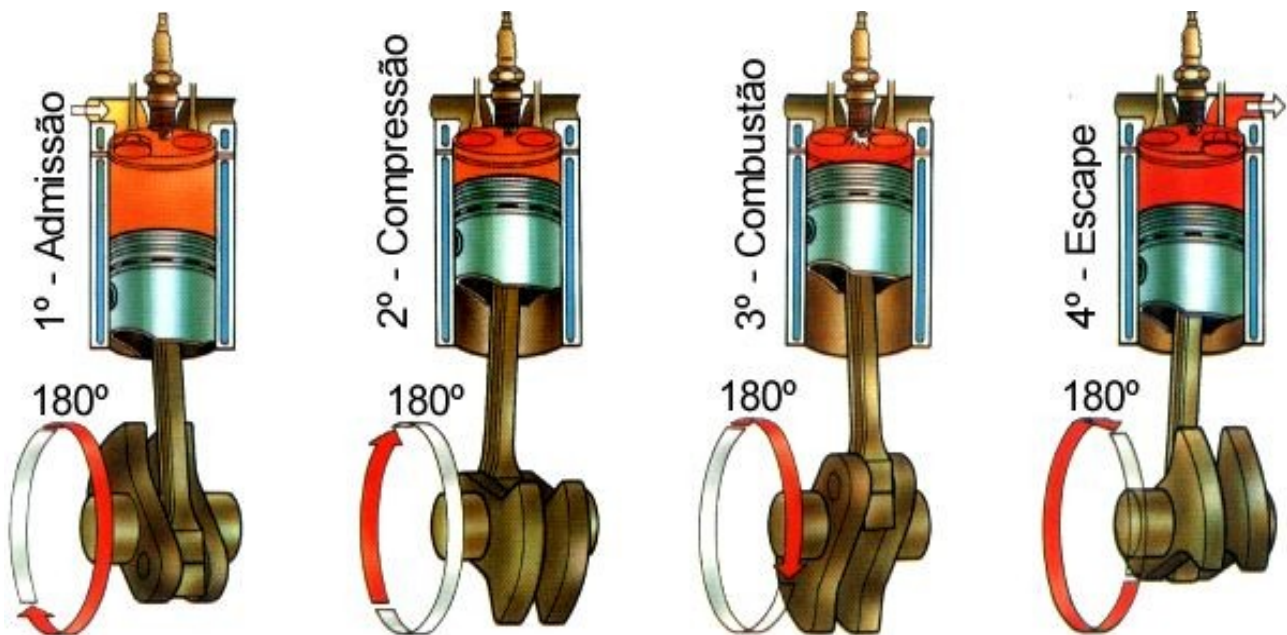
- Na carburação, um dispositivo chamado carburador mistura o combustível com o ar conforme este flui para dentro do motor.
- Em um motor com injeção a quantidade correta de combustível é injetada individualmente em cada cilindro - antes da válvula de admissão (injeção de combustível multiponto) ou diretamente dentro do cilindro (injeção direta de combustível).

2° Tempo: COMPRESSÃO - A seguir a válvula de admissão fecha-se. À medida que o pistão desloca-se para o PMS, a mistura ar/combustível é comprimida. O Virabrequim executa outra meia-volta, executando a primeira volta completa (360°). O pistão volta para comprimir a mistura ar-combustível. À primeira vista a compressão parece ser um desperdício de trabalho, mas sem a mesma, a combustão produziria pouca potência mecânica e a energia do combustível perder-se-ia sob forma de calor.

3° Tempo: COMBUSTÃO - Pouco antes do pistão atingir o PMS, o sistema de ignição transmite corrente elétrica à vela, produzindo uma faísca entre os eletrodos desta, no exato momento em que o pistão completa seu curso ao PMS. Exatamente pela combinação da compressão da mistura e da faísca produzida, ocorre uma explosão dentro da câmara, que produz energia e gases. A energia produzida pelo processo empurra - na forma de expansão dos gases - o pistão para baixo até o PMI. O Virabrequim efetua outra meia volta (540°).

O motor pode agora funcionar sozinho, pois o impulso dado é suficiente para mantê-lo girando até a próxima combustão.

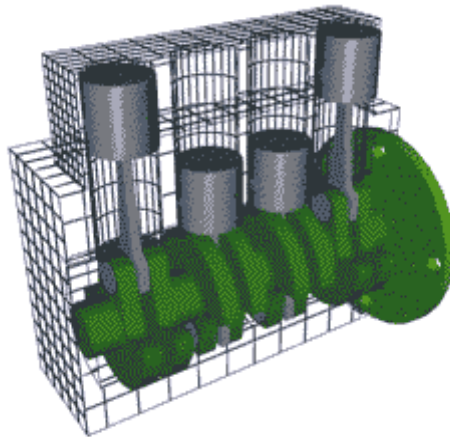
4º Tempo: ESCAPE - Depois da queima da mistura e da expansão dos gases, a válvula de escape se abre. Os gases formados durante o processo são expulsos para fora do cilindro pelo movimento do pistão do PMI para o PMS. O Virabrequim efetua outra meia volta, completando 720º desde o início do processo. Assim que o pistão atinge a parte de baixo do seu curso, a válvula de escapamento se abre e os gases queimados deixam o cilindro através do tubo existente para esse fim.



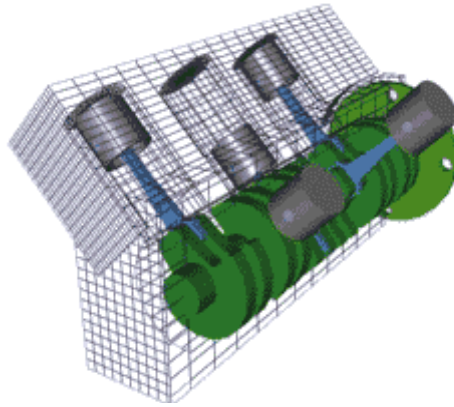
A partir desse momento o motor estará pronto para o próximo ciclo, aspirando novamente ar e combustível.

- Elementos de um motor:

- Cilindro: é o "coração" do motor, dentro do qual um pistão se move para cima e para baixo. O motor descrito acima tem apenas um cilindro, típico de cortadores de grama e de motocicletas de pequeno porte, mas a maioria dos carros tem mais de um cilindro (geralmente quatro, seis ou oito cilindros). Em um motor com vários cilindros, eles são dispostos de diversas maneiras. As principais configurações são **em linha**, em **V** ou **plano** (conhecido também como horizontal oposto ou boxer).

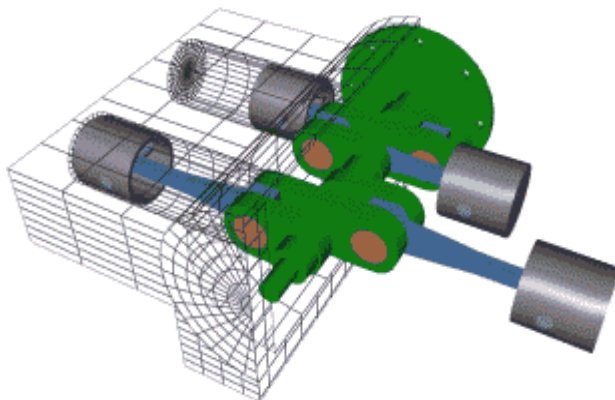


Em linha - Os cilindros são alinhados em uma única bancada.



V - Os cilindros são dispostos em duas bancadas, formando um ângulo entre si.

Plano - Os cilindros são dispostos em duas bancadas, em lados opostos do motor.



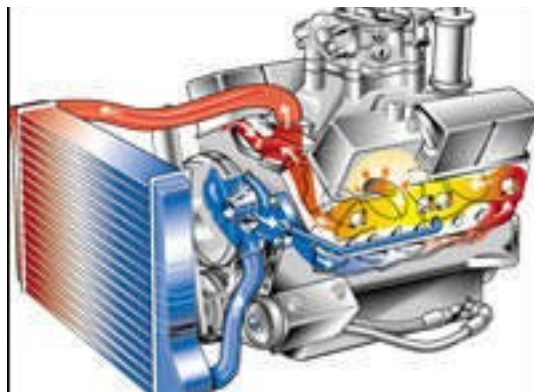
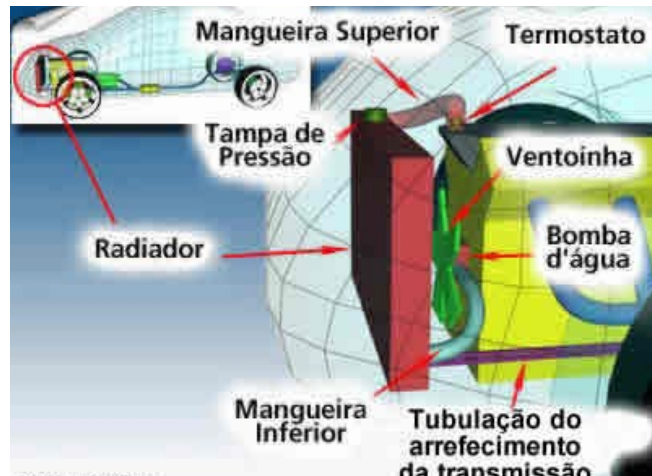
Há vantagens e desvantagens de cada configuração de motor em termos de suavidade, custo de fabricação e características diretamente ligadas à sua forma. Essas vantagens e desvantagens tornam cada um mais apropriado a certos tipos de veículo.

- **Vela de ignição:** A vela de ignição fornece a centelha que provoca a ignição da mistura ar-combustível, para que ocorra a combustão. A centelha precisa ocorrer no momento exato para que as coisas funcionem bem. O sistema de ignição produz uma corrente elétrica de alta tensão e transmite-a para a vela de

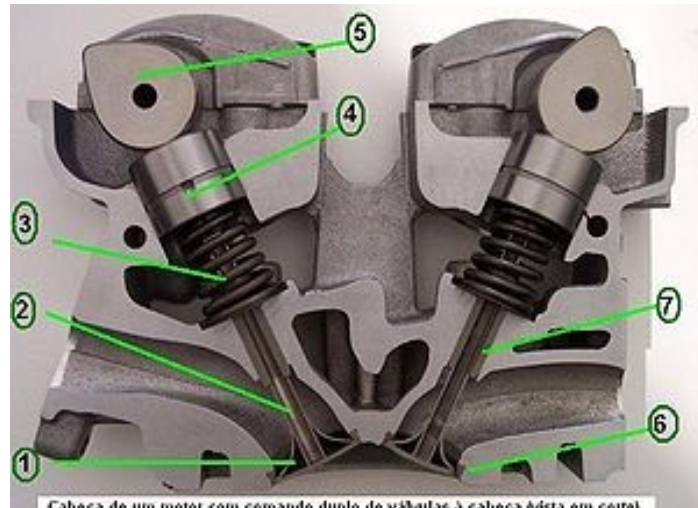
ignição pelos **cabos de vela**. A corrente flui primeiramente para um **distribuidor**, facilmente identificável embaixo do capô da maioria dos carros. Um cabo chega ao centro do distribuidor, e quatro, seis ou oito cabos (dependendo do número de cilindros) saem dele, para cada vela de ignição. O motor é sincronizado de modo que somente um cilindro receba uma corrente do distribuidor de cada vez. Em muitos motores modernos não existe mais o distribuidor físico, substituído por sistema eletrônico.



- **Sistema de arrefecimento:** Na maioria dos carros o sistema de arrefecimento tem um radiador e uma bomba d'água. A água circula por passagens ao redor dos cilindros e das câmaras de combustão e depois por tubos no radiador, para ser resfriada. Em poucos carros (o Fusca, por exemplo), assim como na maioria das motocicletas e cortadores de grama, o motor é refrigerado a ar (uma característica desse tipo de refrigeração é a presença de aletas nos cilindros e cabeçote para ajudar a dissipar o calor). Os motores resfriados a ar são mais leves, mas trabalham em uma temperatura mais elevada, o que diminui sua durabilidade e seu desempenho geral.



- **Válvulas:** As válvulas de admissão e de escapamento abrem no momento certo e deixam respectivamente entrar o ar e o combustível e sair os gases queimados. Ambas as válvulas são fechadas durante a compressão e a combustão, mantendo vedada a câmara de combustão.



• - **Pistão:** O pistão ou êmbolo de um motor é uma peça cilíndrica normalmente feita de alumínio ou liga de alumínio, pois em um motor rodando a 3.000 rotações por minuto, por exemplo, o pistão realiza um movimento completo ao longo do cilindro a cada centésimo de segundo. Este elevado ritmo, e a temperatura de cerca de 300 °C atingida pela cabeça do pistão, levaram à introdução do alumínio e ligas de alumínio, mais leves e com uma maior capacidade de dissipação do calor. O uso do alumínio veio, todavia trazer uma dificuldade: sendo o coeficiente de dilatação deste bastante superior ao do ferro fundido Coeficientes de dilatação linear, a folga do pistão teria que ser excessivamente grande enquanto o motor ainda estivesse a baixa temperatura. Nestas circunstâncias ouvir-se-ia o "bater" do pistão contra as paredes do cilindro,

O êmbolo possui a sua superfície direcionada para a câmara de combustão denominada fundo ou cabeça do pistão. A parte média é normalmente chamada de corpo, onde existem dois orifícios. A parte mais afastada da cabeça é denominada a calça do pistão.

Os dois orifícios circulares que possui na parte média são reforçados e opostos e destinam-se a possibilitar a sua fixação ao pé da biela através de um eixo em aço conhecido como pino do pistão, eixo do êmbolo ou passador. Para que este eixo não se desloque pelos orifícios desgastando e deteriorando o cilindro do motor, é mantido em posição dentro do pistão através de retentores adequados (anéis ou travas) ou revestido de um

material que não danifique a superfície do cilindro durante o movimento do pistão.

Devido à fixação pistão-biela que oscila transversalmente ao motor, o pino do pistão tem uma orientação longitudinal face ao motor, ou seja, paralela à cambota (virabrequim).

Há dois ou três anéis situados mais perto da cabeça do pistão que são chamados segmentos de compressão e têm por finalidade assegurar que não haja fuga da mistura gasosa na altura em que o pistão efetua o seu movimento compressor.

O anel que se encontra mais perto da câmara de combustão é chamado anel de fogo, pois é o que contém a explosão que se dá no cilindro vedando a passagem dos gases. Os anéis de fogo são revestidos de cromo o que lhes aumenta a resistência às condições extremas de funcionamento a que são sujeitos, permitindo simultaneamente uma melhor lubrificação, pois retêm o óleo na sua superfície, diminuindo assim o atrito. O uso deste revestimento permitiu duplicar a durabilidade dos segmentos e reduzir em mais de 50% o desgaste dos cilindros.

Na posição mais afastada da cabeça do pistão situa-se o chamado segmento ou anel raspador ou anel do óleo que possui um conjunto de orifícios em contato com o interior do pistão e cujo objetivo é, quando da sua descida durante a fase de explosão no ciclo de quatro tempos retirar o óleo lubrificante que cobre a superfície do cilindro de forma a que este não se misture com o ar que entrará na fase seguinte. Através das aberturas que comunicam com o interior do pistão este óleo vai lubrificar o próprio pé da biela caindo no cárter para ser reaproveitado posteriormente.

- **Biela:** O movimento de vai-vem do pistão é controlado pela biela que por sua vez está articulada com a cambota. Este movimento provoca uma força perpendicular ao comprimento da cambota que exerce esforços laterais sobre os cilindros e tende a provocar, com o funcionamento do motor, alguma ovalização dos respectivos orifícios.

- **Virabrequim:** O virabrequim transforma o movimento retilíneo do pistão em um movimento circular.

- **Cárter:** O cárter envolve o virabrequim e também age como reservatório de óleo, que fica armazenado em seu fundo.

- **Carburador:** Ele é o responsável pela criação da mistura ar-combustível e sua dosagem em motores de combustão interna, seu funcionamento é totalmente mecânico. O ar aspirado pelo pistão passa em alta velocidade pelo difusor (um estreitamento de passagem) arrastando uma porção de gasolina da cuba. A borboleta (instalada na base do carburador) que é ligada diretamente ao pedal do acelerador dosa a quantidade de mistura que o motor precisa aspirar. Por esta dosagem, ele determina o número de rotações por minuto. Componente extinto nos projetos dos carros mais modernos, substituído por uma nova tecnologia que cumpre sua função: a injeção eletrônica.

- Classificação de um motor:

Convencionou-se classificá-los em tamanho por meio da **cilindrada** ou deslocamento volumétrico. Por se tratar de volume, ele é medido em litros ou cm^3 . A maioria dos motores dos carros comuns tem entre 1,5 litro (1.500 cm^3) e 4 litros (4.000 cm^3).

A cilindrada é obtida por simples cálculo. Toma-se a área correspondente ao diâmetro do cilindro $\pi \times \text{diâmetro}^2$ e dividido por 4 e multiplica-se pelo curso do pistão. Uma vez que se tenha a cilindrada de um cilindro, é só multiplicar o resultado pelo número de cilindros para obter a cilindrada do motor.

Geralmente a cilindrada dá idéia da potência que o motor pode produzir. Um cilindro que desloca meio litro pode comportar o dobro da mistura ar-combustível que um cilindro que desloca 1/4 de litro - pode-se esperar o dobro de potência no cilindro maior (caso todos os outros parâmetros sejam iguais). Um motor de 2

litros tem, em termos gerais, a metade da potência de um motor de 4 litros.

Conclusão

Um motor de combustão interna de 4 tempos possui muitas vantagens em relação aos outros. Ele é:

- eficiente (comparado com um motor de combustão externa)
- barato (comparado com uma turbina a gás)
- fácil de abastecer (comparado com um [carro elétrico](#))

Para que esses motores funcionem, suas peças precisam ser fabricadas com o material adequado, pois devem estar alinhadas de forma perfeita para que as transformações ocorram da forma prevista pelos ciclos termodinâmicos.