

# 10 Struttura e funzionamento del motore a quattro tempi

## Classificazione dei motori a combustione

I motori a combustione possono essere suddivisi in varie modalità. A seconda della formazione della miscela e del tipo di accensione, in:

- **motori a ciclo Otto**, funzionano a benzina oppure a gas, con formazione della miscela esterna o interna. La combustione è comandata tramite fonte esterna (candela di accensione);
- **motori Diesel**, hanno una preparazione interna della miscela e funzionano a gasolio. La combustione nel cilindro è prodotta tramite autoaccensione.

A seconda del modo di funzionamento, in:

- **motori a 4 tempi**, dispongono di un ricambio dei gas a circuito chiuso; per un ciclo di lavoro necessitano di 4 corse del pistone, equivalenti a 2 giri di albero motore;
- **motori a 2 tempi**, dispongono di un ricambio dei gas a circuito aperto e per un ciclo di lavoro necessitano di 2 corse del pistone, equivalenti a un giro di albero motore.

A seconda della disposizione dei cilindri (fig. 1), in:

- motori in linea; ● motori Boxer;
- motori a V; ● motori di tipo VR.

A seconda del movimento dei pistoni, in:

- motori a ciclo alternato;
- motori a ciclo rotante.

A seconda del raffreddamento, in:

- motori raffreddati a liquido;
- motori raffreddati ad aria.

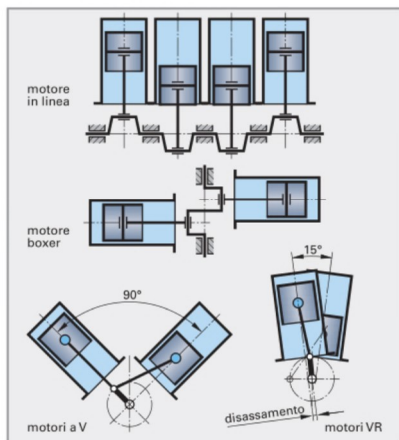


Figura 1: Classificazione a seconda del tipo di disposizione dei cilindri

## 10.1 Il motore a ciclo Otto

Il motore a ciclo Otto è una macchina di potenza a combustione, la quale, mediante la combustione di carburante, trasforma un'energia chimica in energia calorica, la quale, a sua volta, per mezzo del moto di uno o più pistoni, la trasforma in energia meccanica.

### Struttura

Il motore (fig. 2) è composto essenzialmente da 4 gruppi costruttivi con dei dispositivi ausiliari aggiuntivi:

- **corpo motore (monoblocco)**, coperchio valvole, testata cilindri, cilindro (blocco cilindri), basamento, coppa dell'olio;
- **manovellismo**, pistone, biella, albero a manovelle (albero motore);
- **sistema di distribuzione**, valvole, molle valvola, bilanciari, albero (asse) bilanciari, albero a camme, ingranaggi di comando, catena o cinghia di comando;
- **sistema di miscelazione**, impianto di iniezione, collettore di aspirazione;
- **dispositivi ausiliari**, sistema di accensione, impianto di lubrificazione, impianto di raffreddamento, impianto di scarico e impianto di sovralimentazione.

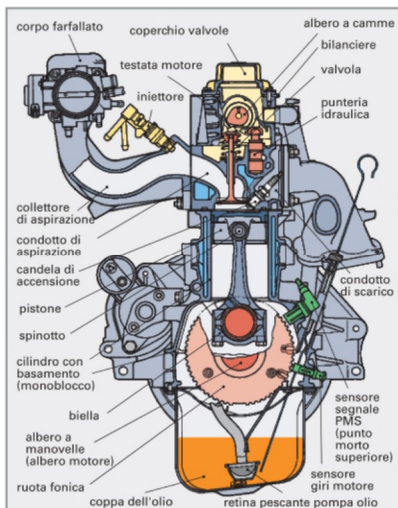


Figura 2: Struttura di un motore a ciclo Otto a 4 tempi

## 10.1.1 Funzionamento del motore a ciclo Otto

Le 4 fasi del ciclo sono: aspirazione, compressione, espansione e scarico (fig. 1). Un ciclo di lavoro si svolge in 2 giri di albero motore che corrispondono a 720° di angolo di manovella/angolo motore (°AM).

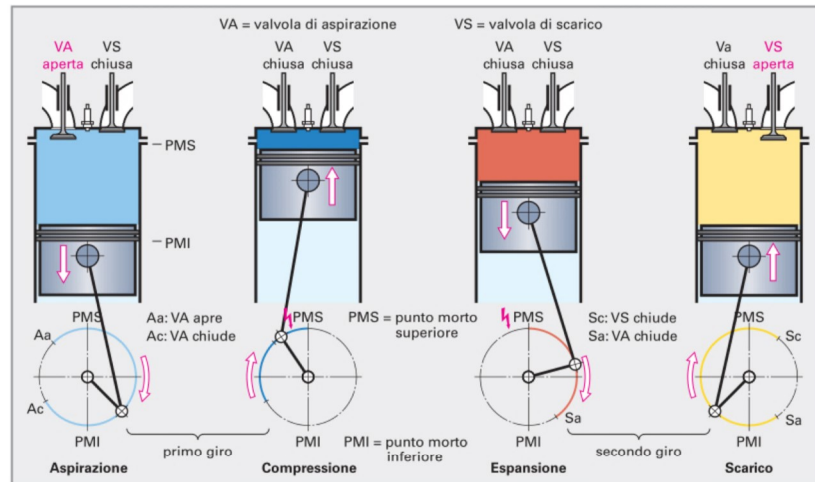


Figura 1: Le 4 fasi di un ciclo di lavoro

1ª fase - aspirazione	2ª fase - compressione	3ª fase - espansione	4ª fase - scarico
<p>Durante la corsa discendente del pistone nel cilindro, si crea un differenziale di pressione rispetto alla pressione esterna di -0,1 bar fino a -0,3 bar, dovuto all'aumento di volume originatosi nel cilindro stesso. Dato che la pressione all'esterno del motore è maggiore rispetto a quella esistente nel cilindro, nel sistema di aspirazione è immessa dell'aria. La miscela infiammabile aria-carburante si forma nel condotto di aspirazione oppure direttamente nel cilindro mediante iniezione di carburante.</p> <p>Al fine di immettere nel cilindro la maggior quantità possibile di aria di aspirazione o di miscela aria-carburante, la valvola di aspirazione (VA) si apre già a 10-45 °AM prima del PMS e si chiude soltanto a 35-90 °AM dopo il PMI.</p>	<p>Durante la fase ascendente del pistone nel cilindro, la miscela aria-carburante è compressa da 7 fino a 12 volte il volume del cilindro. In caso di iniezione diretta, a bassi regimi di rotazione (fino a circa 3000 giri/min) e a bassi valori di coppia motrice, è compressa unicamente aria. Il carburante viene iniettato pochi istanti prima del punto di accensione. Il gas si riscalda a 400-500 °C. Dal momento che lo stesso non può espandersi per l'alta temperatura, la pressione di compressione aumenta fino a 18 bar. Questa alta pressione favorisce un'ulteriore gasificazione del carburante, nonché la miscelazione interna con l'aria. In questo modo, la combustione può terminare rapidamente e in modo completo nella 3ª fase. Nella fase di compressione, le valvole di aspirazione e di scarico rimangono chiuse.</p>	<p>La combustione ha inizio quando scocca la scintilla dall'accensione. Il lasso di tempo che intercorre dallo scoccare della scintilla fino allo sviluppo completo del fronte di fiamma è di circa 1/1000 di secondo, con una velocità di combustione di 20 ms. Per tale motivo, la scintilla di accensione deve scoccare, a seconda del regime del motore, da 0° fino a 40° prima del PMS, affinché sia disponibile la pressione massima di combustione necessaria di 30-60 bar subito dopo il PMS (4-10 °AM).</p> <p>L'espansione dei gas caldi favorisce un'ulteriore gasificazione del carburante, nonché la miscelazione interna con l'aria. In questo modo, la combustione può terminare rapidamente e in modo completo nella 3ª fase. Nella fase di espansione, le valvole di aspirazione e di scarico rimangono chiuse.</p>	<p>La valvola di scarico si apre da 40° a 90° prima del PMI, per favorire il flusso di scarico e alleggerire il manovellismo. La presenza alla fine della fase di espansione di una pressione di 3-5 bar provoca un'espulsione dei gas di scarico alla velocità del suono e con temperature fino a 900 °C. Quanto rimasto degli stessi gas di scarico è poi espulso dalla seguente corsa ascendente del pistone in presenza di una pressione rimanente di circa 0,2 bar. Per facilitare l'espulsione dei gas di scarico rimasti, la valvola di scarico (VS) chiude soltanto dopo il PMS quando la valvola di aspirazione (VA) inizia la propria apertura. Questo incrocio dei tempi angolari delle valvole facilita lo svuotamento e il raffreddamento della camera di scoppio, migliorando di conseguenza il riempimento del cilindro.</p>

## 10.1.2 Caratteristiche del motore

- **Funzionamento** a benzina oppure a gas.
- **Miscelazione:** modalità esterna o modalità interna.
  - Modalità esterna.** La miscela aria-carburante si forma nel collettore di aspirazione, ossia esternamente al cilindro.
  - Modalità interna.** Nella fase di aspirazione nel cilindro, in un primo tempo è immessa unicamente aria. La miscela aria-carburante è composta mediante iniezione di carburante nella fase di aspirazione oppure di compressione.
- **Accensione comandata da fonte esterna.**
- **Combustione a volume costante.** Mediante la combustione esplosiva della miscela aria-carburante, la stessa combustione avviene a volume pressoché costante.
- **Regolazione della quantità.** La quantità della miscela aria-carburante varia a seconda della posizione della valvola a farfalla (stato di carico).

## 10.1.3 Processo di combustione nel motore a ciclo Otto

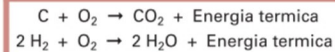
Dato che per la combustione della miscela aria-carburante è disponibile solamente un lasso di tempo brevissimo (la combustione viene conclusa subito dopo il PMS), nella miscela compressa, le molecole di aria e quelle di carburante devono rimanere vicine. L'ossigeno necessario alla combustione è ricavato dall'aria aspirata.

Dato che nell'aria è presente circa il 20% di ossigeno, in proporzione al carburante si dovrà miscelare una grande quantità di aria.

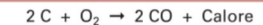
La quantità minima di aria per una combustione completa, denominata **fabbisogno teorico di aria**, per un kg di benzina, è quantificata in circa 14,7 kg di aria (12 m³ per una densità di  $\rho = 1,29 \text{ kg/m}^3$ ). Il carbonio contenuto nel carburante brucia con l'ossigeno trasformandosi in anidride carbonica (CO<sub>2</sub>) mentre l'idrogeno contenuto nell'aria si combina con l'ossigeno, trasformandosi in vapore acqueo. L'azoto contenuto nell'aria non partecipa alla combustione. A causa delle elevate pressioni e temperature della combustione, però, sono prodotti ossidi di azoto nocivi.

**Combustione completa**

L'energia chimica del carburante è trasformata in energia termica.



Se per 1 kg di benzina sono disponibili solo 13 kg di aria, la miscela aria-carburante risulta eccessivamente grassa (1:13). A causa del poco ossigeno, una parte di carbonio brucia in modo incompleto, trasformandosi in monossido di carbonio (CO) che è velenoso.

**Combustione incompleta**

Se per 1 kg di benzina sono disponibili 16 kg di aria, la miscela aria-carburante risulta eccessivamente magra (1:16). È anche possibile che si produca una combustione completa; però, a causa della presenza di una quantità inferiore di carburante, che può evaporare, il volume interno del cilindro non viene sufficientemente raffreddato e, di conseguenza, è possibile un surriscaldamento del motore.

**Combustione con battito in testa**

Un motore Otto batte in testa quando, assieme alla scintilla della candela, si produce contemporaneamente anche un'accensione spontanea (fig. 1).

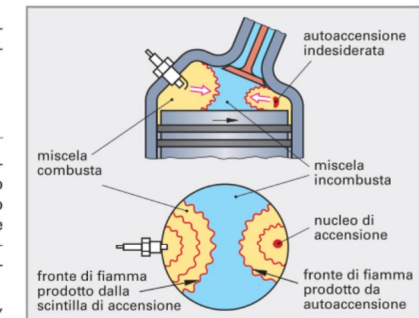


Figura 1: Combustione con battito in testa

Questo fenomeno di autoaccensione scatena un fronte di fiamma, composto da più particelle sferiche che collidono una con l'altra, e conduce a una combustione oltremodo accelerata e violenta. In questa situazione sorgono velocità di combustione che vanno da 300 fino a 500 ms e che conducono a pressioni oltremodo elevate (fig. 2).

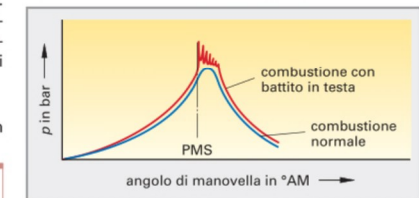


Figura 2: Andamento della pressione durante la combustione

La rumorosità anomala prodotta dal motore sotto forma di battiti (una sorta di "picchietto") è causata dalle onde d'urto, prodotte dai diversi nuclei di accensione, che inducono oscillazioni in singoli organi del motore. Conseguenze del battito sono i carichi



meccanici e termici oltremodo elevati sul manovellismo e una sensibile riduzione di potenza.

#### Cause del battito in testa

Oltre all'utilizzo di carburanti non idonei, il battito può essere causato da:

- accensione troppo anticipata;
- ripartizione irregolare della miscela nel cilindro;
- cattiva cessione di calore in presenza di depositi carboniosi oppure di difetti di raffreddamento;
- rapporto di compressione eccessivamente elevato (per l'impiego di una guarnizione della testata di spessore minore rispetto a quella originale).

#### Battito in fase di accelerazione

Si produce principalmente in caso di accelerazione a pieno carico a basso regime di rotazione (accelerazione sotto regime di coppia). La causa è l'utilizzo di carburante con insufficiente indice di ottani (RON) e una scorretta impostazione del punto di accensione.

#### Battito alla velocità massima

Si tratta di un battito che si presenta spesso ai regimi di rotazione elevati e a pieno carico. La causa è dovuta il più delle volte all'impiego di carburante con un insufficiente RON, oppure di carburante in cui il differenziale tra RON e MON (numero di ottani) è elevato (Sensitivity). In questi casi, si può verificare un surriscaldamento del motore, causa di danni quali bruciature delle valvole e delle guarnizioni della testata, del cielo del pistone e, spesso, anche di grippaggi del pistone.

#### Accensioni spontanee

Sono originate da particelle in stato di fusione presenti nella camera di scoppio prima ancora della normale accensione della miscela aria-carburante da parte della scintilla della candela (accensione anticipata incontrollata).

## 10.2 Il motore Diesel

Così come il motore a ciclo Otto, anche il motore Diesel è una macchina di potenza a combustione.

#### Struttura

Il motore Diesel (fig. 1) è costituito come il motore a ciclo Otto essenzialmente da 4 gruppi costruttivi, con l'aggiunta di diversi dispositivi ausiliari:

- blocco motore;
- manovellismo;
- sistema di distribuzione;
- sistema di alimentazione con impianto di iniezione, pompa di alimentazione, filtro carburante, impianto di iniezione ad alta pressione, per esempio, sistema Common Rail e sistema iniettore pompa;
- dispositivi ausiliari, circuito di lubrificazione, circuito di raffreddamento, ossia sistema di scarico, sistema di sovralimentazione (turbocompressore a gas di scarico con raffreddamento del flusso di immissione aria tramite intercooler), sistema di avviamento a freddo (candeletta ad incandescenza).

Il motore Diesel per veicoli è utilizzato in qualità di motore veloce con regime di rotazione fino a 5000 giri/min su autovetture e veicoli utilitari leggeri. I motori Diesel cosiddetti lenti, ossia che hanno un regime di rotazione fino a 2200 giri/min, sono utilizzati su veicoli pesanti.

I motori Diesel hanno un consumo di carburante fino al 30% inferiore rispetto ai motori a ciclo Otto. Il grado di efficienza può raggiungere il 46%.

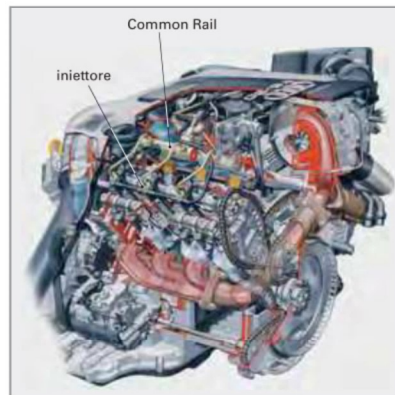


Figura 1: Motore Diesel per autovetture

### 10.2.1 Caratteristiche del motore Diesel

- **Funzionamento** con carburante diesel (gasolio) oppure biodiesel.
- **Miscelazione interna**, nella fase di aspirazione, nel cilindro è immessa unicamente aria. La miscela aria-carburante è formata nella fase di compressione mediante iniezione di carburante ad alta pressione.
- **Accensione spontanea**, il carburante si incendia spontaneamente, subito dopo la sua iniezione nell'aria contenuta nel cilindro divenuta estremamente calda nella fase di compressione.
- **Regolazione (dosaggio) della quantità**, il motore aspirato non dispone di valvola a farfalla a monte del collettore di aspirazione. Per questo motivo, durante tutta la fascia di utilizzo del regime di rotazione, il riempimento è costituito da una massa di aria continua e costante. La regolazione di carico (potenza) avviene mediante la variazione della quantità di carburante iniettato, modificando di fatto la miscela aria-carburante in funzione del carico di utilizzo.

### 10.2.2 Funzionamento del motore Diesel

Come per il motore a ciclo Otto, le 4 fasi di un ciclo di lavoro sono aspirazione, compressione, espansione e scarico (fig. 1). Un ciclo di lavoro avviene in 2 giri di albero motore (720 °AM).

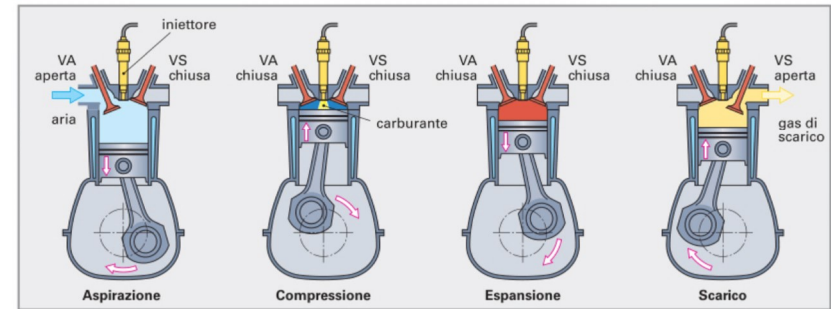


Figura 1: Le 4 fasi di un ciclo di lavoro in un motore a iniezione diretta

1ª fase - aspirazione	2ª fase - compressione	3ª fase - espansione	4ª fase - scarico
Durante la corsa discendente del pistone, nel cilindro si crea una depressione rispetto alla pressione atmosferica esterna che va da -0,1 a -0,3 bar. In conseguenza della maggior pressione dell'aria esterna, la stessa è spinta nel cilindro. L'immissione di aria avviene a sezione di apertura costante nel condotto d'aspirazione, in quanto non è prevista una farfalla di regolazione. Per permettere che nel cilindro venga immesso un maggior volume di aria, la VA apre già a 25 °AM prima del PMS e chiude poi 28 °AM dopo il PMI. Questa situazione favorisce un ulteriore traino di aria aspirata (sfruttamento dell'inerzia della colonna d'aria). Nel cilindro, prima della fase di compressione, l'aria raggiunge la temperatura di 70-100 °C.	Durante la corsa ascendente del pistone nel cilindro, l'aria contenuta nello stesso è compressa da 14 fino alla 24 volte rispetto al volume iniziale, in modo che l'aria raggiunga una temperatura di 600-900 °C. Dato che l'aria non può dilatarsi alle elevate temperature, la pressione di compressione sale a 30-55 bar. I motori con camere di scoppio annesse, come per esempio una camera di turbolenza, devono raggiungere valori di compressione più elevati, a causa delle maggiori perdite di calore dovute alla maggior superficie complessiva della camera di scoppio.	Verso la fine del ciclo di compressione, a circa 15-30 °AM prima del PMS, nella camera di scoppio viene iniettato carburante diesel finemente polverizzato ad alta pressione (fino a 2050 bar). Nell'aria a temperatura elevatissima formatasi nel cilindro, il gasolio evapora e si mescola alla medesima. Dato che la temperatura dell'aria così compressa è superiore alla temperatura di accensione spontanea del carburante, si innesca la combustione. Il tempo che intercorre tra l'inizio dell'iniezione e l'inizio della combustione è definito come ritardo di accensione. Per mezzo dell'alta pressione di combustione, che si situa fino a 160 bar, il pistone discende verso il PMI, così che l'energia calorica è trasformata in energia meccanica.	La VS apre 30 °AM fino a circa 60 °AM prima del PMI, facilitando l'espulsione dei gas di scarico e, nel contempo, sottoponendo il manovellismo a un alleggerimento del carico. Mediante la pressione rimanente alla fine della fase di espansione di 4-6 bar, i gas di scarico sono poi espulsi dal cilindro a temperature di 550-750 °C. Nella seguente corsa ascendente del pistone, la rimanenza dei gas è sospinta fuori dal cilindro con una pressione di 0,2-0,4 bar. Dal momento che le temperature dei gas di scarico sono più basse, le perdite di calore sono inferiori a quelle del motore a ciclo Otto (grado di efficienza superiore).

#### Motori a iniezione indiretta

Il carburante è iniettato in una camera di scoppio annessa (camera di turbolenza o precamera). La presenza di due camere di scoppio genera una superficie di combustione più estesa che porta a perdite di calore maggiori e un conseguente peggioramento del grado di efficienza rispetto ai motori Diesel a iniezione diretta. Inoltre, provoca un aumento del consumo specifico. Per questo motivo, attualmente non sono più prodotti motori Diesel a iniezione indiretta. Il rapporto di compressione  $\epsilon$  per motori Diesel a iniezione indiretta si situa tra 18 e 24.

#### Motori a iniezione diretta

Il carburante è iniettato direttamente nella camera di scoppio. L'aria portata a temperature fino a 900 °C nella fase di compressione cede poco calore alla superficie compatta della camera di scoppio. Per questo motivo, rispetto al motore Diesel a iniezione indiretta, ne risulta un grado di efficienza superiore e, di conseguenza, un minor consumo specifico di carburante. I motori Diesel a iniezione diretta per autovetture hanno un rapporto di compressione  $\epsilon$  che si situa tra 14 e 27, mentre per veicoli pesanti tra 14 e 19.



### 10.2.3 Processo di combustione del motore Diesel

Nel motore Diesel, l'iniezione avviene in modo tale che la quantità principale di carburante arrivi nella camera di combustione solo dopo che la prima parte del carburante sia già stata incendiata, al fine di assicurare la continuità della combustione.

#### Svolgimento della miscelazione interna

Dopo l'inizio dell'iniezione, il carburante liquido deve essere ancora trasformato in una miscela incendiabile. La **tab. 1** mostra il tempo intercorso dall'inizio di iniezione fino all'accensione spontanea. Nella miscelazione interna della massa d'aria divenuta caldissima è sottratto calore e la massa d'aria, di conseguenza, diminuisce di temperatura. La temperatura dell'aria deve, però, rimanere sempre al di sopra della temperatura di accensione spontanea.

Tabella 1: Miscelazione interna e innesco combustione

Fabbisogno temporale, ritardo accensione	Il carburante, finemente nebulizzato, ma ancora allo stato liquido, è iniettato nella massa d'aria calda
	Le goccioline di carburante formatesi vengono riscaldate alla temperatura di ebollizione
	Il carburante evapora alla temperatura di ebollizione
	I vapori di carburante si mescolano con la massa di aria calda
	I vapori di carburante si riscaldano fino alla temperatura di accensione
Assorbimento di calore dalla massa di aria calda	La miscela aria-carburante si infiamma
	La combustione è innescata

#### Ritardo di accensione nel motore Diesel

Il lasso di tempo necessario per il completamento della miscelazione interna fino all'innesco della combustione è definito come ritardo di accensione.

Normalmente, il ritardo di accensione nel motore Diesel è di circa 0,001 s (1 ms). Esso dipende essenzialmente:

- dalla struttura molecolare del carburante (accendibilità, numero di cetano);
- dalla temperatura raggiunta dalla massa compressa di aria un istante prima dell'accensione;
- dal grado di nebulizzazione dell'iniezione (grado di pressione, grandezza delle goccioline di carburante).

Più elevati sono i valori di pressione, temperatura e numero di cetano, più il ritardo di accensione risulta breve.

#### Battito in testa nel motore Diesel

Nel caso di basse temperature del motore e dell'aria aspirata, per esempio all'avviamento a freddo, il lasso di tempo necessario per la formazione della miscelazione interna si allunga. Quando il ritardo di accensione diviene troppo ampio (superiore a 2 ms), il carburante accumulato brucia, provocando colpi violenti e rumorosità, avvertibile come un picchiettamento. Questa situazione è innescata da più nuclei di accensione che hanno origine nel carburante accumulatosi nella camera di scoppio. I picchi di pressione che si creano possono portare a danneggiamenti a livello del manovellismo. Questa forma di battito può essere ridotta mediante l'iniezione anticipata di una piccola quantità di carburante.

Un ritardo di accensione insorge in caso di:

- motore freddo/aria aspirata fredda;
- cattiva compressione;
- carburante con numero di cetano troppo basso;
- gocciolamento di iniettore/.

### 10.3 Caratteristiche del motore a quattro tempi

#### Riempimento

Per riempimento si intende la massa di gas (miscela aria-carburante oppure solo aria) che è immessa nel cilindro durante la fase di aspirazione.

**Incremento del riempimento.** Al fine di migliorare il riempimento e aumentare la potenza, i tempi di apertura delle valvole di aspirazione sono prolungati dai 180 °AM, che corrispondono alla corsa del pistone, fino a 315 °AM. Nella fase di scarico, i gas combusti fuoriescono dal cilindro attraverso la valvola di scarico ad alta velocità, producendo in tal modo un effetto traino.

Nel caso che la valvola di aspirazione sia aperta prima che il pistone abbia raggiunto il PMS, la miscela aria-carburante oppure la sola massa d'aria può affluire nel cilindro incontro alla corsa del pistone in quanto sospinta dalla depressione creatasi.

#### L'incrocio delle valvole

Nel lasso di tempo dalla fase di scarico a quella di aspirazione, rimangono aperte sia la valvola di aspirazione sia la valvola di scarico.

Con la valvola di scarico aperta per un prolungato lasso di tempo nella fase di compressione, in conseguenza dell'inerzia della colonna d'aria, la miscela aria-carburante può continuare ad affluire, accelerata nella fase di aspirazione fino a 100 ms (360 km/h). Questo effetto di sovralimentazione cessa nel momento in cui la pressione esercitata dal pistone nella fase ascendente blocca la corrente di gas/aria in entrata. La valvola di aspirazione deve venire richiusa al più tardi in questo istante. Malgrado questo prolungamento del tempo di apertura, il riempimento

del cilindro per motori non sovralimentati può raggiungere al massimo il 90%.

#### Rendimento volumetrico (grado di riempimento)

Il rendimento volumetrico è il rapporto fra la quantità di miscela aria-carburante aspirata, espressa in kg, e il riempimento completo, possibile a livello teorico, del cilindro di miscela aria-carburante espresso in kg.

Nel caso di miscelazione interna, il rendimento volumetrico è il rapporto tra la massa d'aria aspirata e il riempimento teorico possibile di aria nel cilindro espresso in kg. Per i motori aspirati, il rendimento volumetrico si situa a pieno carico tra 0,6 e 0,9 (grado di riempimento 60% fino al 90%), mentre per i motori sovralimentati è realizzabile un rendimento volumetrico di 1,2 fino a 1,6 (grado di riempimento 120% fino a 160%).

$$\lambda_L = \frac{m_z}{m_{th}}$$

$\lambda_L$  = rendimento volumetrico;

$m_z$  = massa aspirata di aria o miscela aria-carburante espressa in kg;

$m_{th}$  = massa teorica possibile di aria o miscela aria-carburante espressa in kg.

Il riempimento può essere migliorato ulteriormente mediante una minore resistenza di flusso della colonna d'aria / miscela aria-carburante, così come con l'abbassamento delle temperature all'interno del cilindro. Queste condizioni si ottengono per mezzo di:

- condotti di aspirazione conformati in modo ottimale;
- forme della camera di scoppio vantaggiose;
- ampie sezioni dei condotti di aspirazione;
- presenza di più valvole di aspirazione (tecnica plurivalvole);
- buon raffreddamento.

Il riempimento peggiora a seguito di:

- resistenza di flusso in presenza della farfalla di regolazione;
- diminuzione dei tempi di apertura delle valvole agli alti regimi di rotazione;
- bassa pressione atmosferica, per 100 m di aumento di quota (altitudine) la potenza espressa dal motore diminuisce dell'1% circa.

#### Rapporto di compressione

**Camera di scoppio.** È costituita dal volume racchiuso tra cilindro, testa del cilindro e cielo del pistone. La misura della camera varia di continuo durante la corsa del pistone. Il volume della camera di scoppio è massimo quando il pistone raggiunge il PMI ed è minimo quando raggiunge il PMS. Il massimo volume si compone della somma del volume del cilindro più il volume della camera di scoppio.

**Volume di compressione  $V_c$ .** È il volume minimo della camera di scoppio.

**Volume del cilindro (cilindrata unitaria)  $V_U$ .** È il volume racchiuso tra i due punti morti della corsa del pistone (PMS e PMI).

**Volume complessivo (cilindrata totale)  $V_H$ .** È il volume dato dalla somma delle cilindrata unitarie dei singoli cilindri di un motore.

Se si compara il volume al di sopra del pistone prima che avvenga la fase di compressione, ossia con il pistone al PMI (cilindrata unitaria  $V_h$  + volume camera di scoppio  $V_c$ ) con il volume al di sopra del pistone alla conclusione della fase di compressione (volume camera di scoppio  $V_c$ ), si ottiene il rapporto di compressione  $\varepsilon$  (fig. 1).

$$\text{Rapporto di compressione} = \frac{\text{Cilindrata unitaria} + \text{Volume camera}}{\text{Volume camera scoppio}}$$

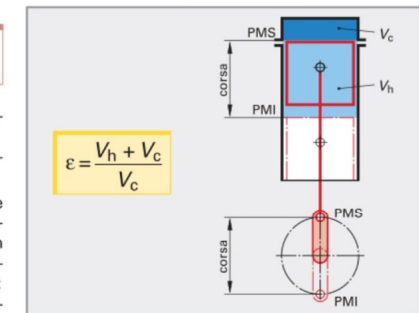


Figura 1: Rapporto di compressione

Tabella 1: Rapporti di compressione a confronto

Rapporto di compressione	7	9
Press. a fine compressione	~10 bar	~16 bar
Press. max di combustione	~30 bar	~42 bar
Pressione ad apertura della valvola di scarico	~4 bar	~3 bar
Temperatura a fine compressione	400 °C	500 °C

All'aumentare del rapporto di compressione, corrisponde un maggior ricavo di energia prodotta dal carburante e, di conseguenza, maggiore sarà il rendimento del motore. Malgrado il sensibile maggior lavoro di compressione per  $\varepsilon = 9$ , lo sfruttamento del significativo aumento del gradiente di pressione, a parità di riempimento di gas freschi, porta un guadagno di lavoro, un aumento della potenza superiore al 10% e una diminuzione del consumo di carburante di circa il 10%. Le cause dell'aumento di rendimento sono le seguenti:

- una migliore evacuazione dei gas combusti;



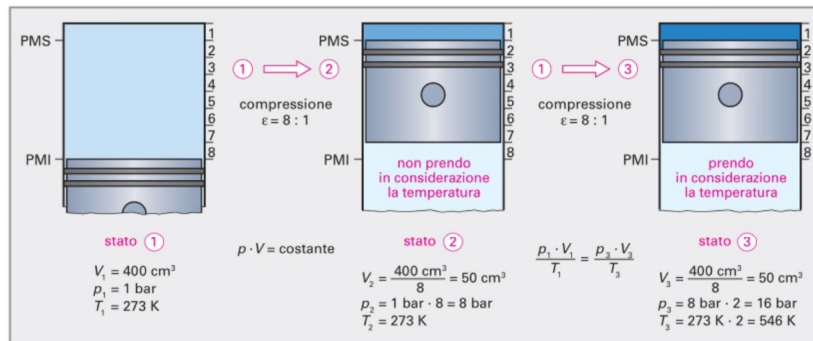


Figura 1: Rapporto tra pressione, volume e temperatura durante la fase di compressione

- temperatura più elevata nella fase di compressione, migliore e più completa gasificazione della miscela;
- a causa dell'elevata compressione, i gas combusti possono espandersi su un maggior volume, la temperatura dei gas di scarico diminuisce e una minor quantità di energia calorica viene dispersa nel condotto di scarico.

Con l'aumentare del rapporto di compressione, aumenta la temperatura di compressione (tab. 1, pag. 203). Per tale motivo, il rapporto di compressione è limitato dalla temperatura di autoaccensione del carburante. Per i motori sovralimentati, il rapporto di compressione è minore in quanto nel cilindro viene immessa aria già compressa in precedenza.

#### Legge di Boyle-Mariotte

Mediante la corsa discendente e ascendente del pistone nel cilindro, insieme al volume, variano anche pressione e temperatura.

Già nel XVII secolo i fisici Boyle e Mariotte scoprirono che, a parità di temperatura, il volume e la pressione nel cilindro variano in rapporto inverso. Difatti, alla diminuzione del volume di 8 volte, corrisponde un aumento della pressione di 8 volte.

Il prodotto tra pressione e volume è costante.

#### Legge di Gay-Lussac

Tenendo in considerazione la temperatura nel rapporto tra volume e pressione, il fisico francese Gay-Lussac ne scoprì la dipendenza formulando la seguente legge:

A parità di pressione, un gas riscaldato di 1 K (1 °C) espande il proprio volume di  $\frac{1}{273}$ .

Un gas, quindi, si espande il doppio del proprio volume se è riscaldato di 273 K.

Nel caso in cui l'espansione venga impedita, per esempio mediante la compressione (fig. 1), si viene a raddoppiare la pressione. In conseguenza della cessione di calore alle pareti del cilindro, la pressione finale risulta in realtà più bassa.

### 10.4 Diagramma di lavoro (diagramma p-V)

#### Motore a ciclo Otto

Le relazioni tra pressione, volume e temperatura dei gas per un ciclo di lavoro di un motore a ciclo Otto possono essere definite in un diagramma pressione, volume, temperatura, detto diagramma p-V.

Secondo Boyle-Mariotte si produce così un diagramma ideale in cui il volume, ai punti di inversione del pistone sia al PMS e sia al PMI, non varia nella fase di combustione e di scarico, ossia rimane costante.

Combustione a volume costante: la combustione immediata si sviluppa a volume costante.

Affinché possa svilupparsi una combustione a volume costante ideale, come rappresentato in fig. 1 di pag. 205, vengono premesse le seguenti condizioni:

- il cilindro deve contenere unicamente gas freschi e nessun gas combusto;
- la combustione della miscela aria-carburante deve essere completa;
- il ricambio della carica deve essere senza perdite;
- nessuna cessione di calore al cilindro;
- il volume, durante la combustione e il processo di raffreddamento, deve essere costante;
- la tenuta dei gas nella camera di scoppio (fasce elastiche/segmenti) deve essere ermetica.

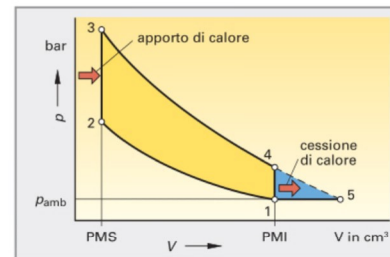


Figura 1: Diagramma p-V effettivo

#### Svolgimento del processo

- 1 → 2 Compressione della miscela aria-carburante, aumento della pressione, nessun apporto di calore.
- 2 → 3 Combustione della miscela aria-carburante, aumento della pressione a volume costante, il pistone è al PMS per l'istante della combustione e vi è apporto di calore.
- 3 → 4 Espansione; il gas, a seguito dell'alta pressione, si espande e muove il pistone verso il PMI dove viene raggiunto il volume di partenza. Nessun apporto di calore.
- 4 → 1 Raffreddamento; il processo si sviluppa a volume costante. A seguito della cessione di calore, la pressione cala fino al punto 1 dove si ripristina di nuovo la pressione di partenza.

#### Ricavo di energia, cessione di energia

Il campo definito nel diagramma (fig. 1) dai vertici 1 - 2 - 3 - 4 determina il lavoro prodotto durante un ciclo (superficie + / positiva). Il ricavo di lavoro potrebbe essere maggiore qualora la valvola di scarico venisse aperta non già nel punto 4, bensì solo quando l'espansione dei gas non sia terminata, ossia quando abbiano raggiunto la pressione di partenza indicata dal punto 5. Questa situazione in realtà non è possibile in quanto il prolungamento dell'espansione è correlata ad un aumento della corsa (motore a corsa lunga). Di conseguenza, il campo definito dai punti 1 - 4 - 5 determina la perdita di lavoro. Mediante un aumento del rapporto di compressione, è possibile ottenere un aumento del lavoro prodotto.

#### Motore Diesel

Contrariamente al motore a ciclo Otto, la pressione durante la fase di combustione teoricamente non muta, ottenendo una combustione a pressione costante. In realtà, sia il processo a volume costante sia quello a pressione costante non si svolgono in modo così ideale in quanto le condizioni promesse non possono essere mantenute.

#### Diagramma p-V effettivo

L'andamento della pressione durante le 4 corse del pistone per un ciclo di lavoro può essere rilevato al motore al banco prova mediante un indicatore pie-

zoelettrico e reso visibile su schermo come diagramma. In tal modo, sono chiaramente riconoscibili le differenze con il diagramma p-V ideale. Nella pratica, l'andamento delle curve per motori a ciclo Otto e motori Diesel si differenziano solo nei valori di altezza delle pressioni (fig. 2). A seguito della pressione di combustione più elevata del motore Diesel e della susseguente espansione dei gas combusti a 4-6 bar, i gas di scarico si raffreddano con maggior forza di quanto avviene nel motore a ciclo Otto. Questa situazione porta a una diminuzione delle perdite ai gas di scarico, così che il lavoro prodotto e il rendimento aumentano. La sollecitazione termica delle valvole è minore. A basse temperature, i moderni motori Diesel non sono in grado di produrre calore per l'impianto di riscaldamento, per cui sono necessari impianti di riscaldamento supplementari.

Dal diagramma p-V si può ricavare il lavoro effettivo  $W_{\text{eff}}$  di un motore se dal lavoro prodotto (campo +) viene detratto il lavoro disperso (campo -) (fig. 1, pag. 206).

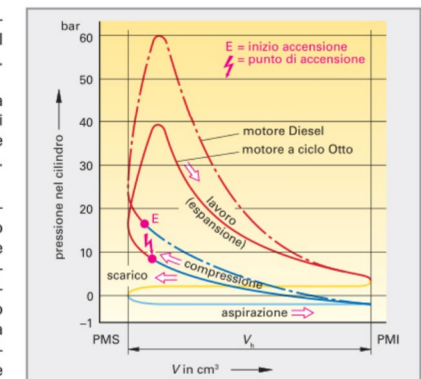


Figura 2: Diagramma p-V reale

#### Rilevazione di errori nel diagramma p-V

Divergenze di una certa importanza rispetto al normale andamento della pressione permettono di riconoscere errori nella messa a punto del motore (miscelazione, punto di accensione, compressione) in particolare dovuti all'insorgere di fenomeni di battito in testa (fig. 1, pag. 206).

#### Punto di accensione troppo anticipato

La massima pressione possibile viene già raggiunta prima che il pistone abbia raggiunto il PMS. L'insorgere di pressioni e temperature elevate oltre misura porta a una combustione con battito in testa, con conseguente aumento delle emissioni nocive allo scarico, nonché perdita di potenza, quest'ultima riconoscibile dalla superficie più piccola nel diagramma.

**Punto di accensione troppo ritardato (fig.1)**

L'andamento della pressione è normale fino al PMS. Dopo il PMS, la pressione prima cala e poi ritorna a salire, ma non può più raggiungere il picco massimo possibile di pressione di combustione, in quanto il pistone sta già discendendo verso il PMI prima che la miscela aria-carburante abbia potuto essere completamente combusta. Le conseguenze dirette sono: perdita di potenza, consumo di carburante più elevato e pericolo di surriscaldamento.

**Inermeticità di valvole e fasce elastiche (segmenti)**

L'innalzamento della pressione non può compiersi e la linea di curva della compressione rimane piatta. Anche in presenza di un corretto punto di accensione, non è possibile raggiungere la massima pressione di combustione possibile. Le conseguenze sono: perdita di potenza e pessimi valori dei gas di scarico.

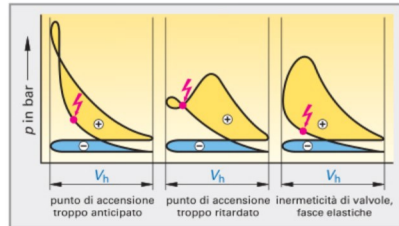


Figura 1: Diagramma p-V di motori difettosi

**10.5 Diagramma della distribuzione**

Il diagramma della distribuzione dà una visione d'insieme degli angoli di comando e degli angoli di apertura delle valvole come pure l'incrocio delle medesime (fig. 2).

**Angolo di comando.** È l'angolo tra il punto morto e l'apertura e chiusura della rispettiva valvola.

**Angolo di apertura.** In questo campo angolare, la rispettiva valvola è aperta.

**Incrocio delle valvole.** In questo lasso di tempo risultano aperte sia la VA, sia la VS. Per raffigurare graficamente i tempi della distribuzione, si riportano i valori angolari di apertura della VA e della VS riferiti in gradi di albero motore (°AM) su un diagramma a forma di spirale oppure a forma circolare (fig. 2). Gli angoli di apertura delle valvole e il profilo delle camme di comando sono definiti per ogni tipologia di motore attraverso prove al banco al fine di ottenere la potenza più alta possibile e le minori emissioni nocive possibili allo scarico. Dal momento che questo obiettivo non è realizzabile su tutto l'arco di impiego della rotazione del motore, questi sono dotati di alberi a camme a comando variabile sia sull'aspirazione sia sullo scarico. Con questo sistema, i tempi di

apertura e di chiusura delle valvole possono essere variati di un determinato angolo (fasatura variabile).

**Diagramma della distribuzione simmetrico.** Gli angoli Aa (aspirazione apre) prima di PMS e Sc (scarico chiude) dopo PMS sono uguali, così come per gli angoli Sa (scarico apre) prima di PMI e Ac (aspirazione chiude) dopo PMI.

**Diagramma della distribuzione asimmetrico.** Una delle due coppie di valori angolari è differente.

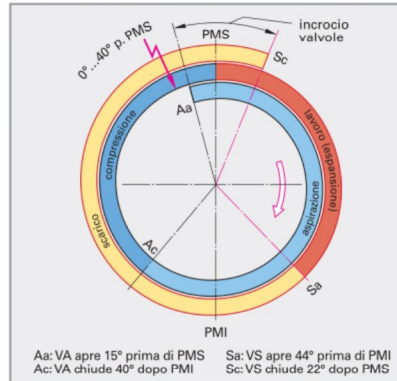


Figura 2: Diagramma della distribuzione di un motore a ciclo Otto a 4 tempi

**10.6 Numerazione dei cilindri, ordine di accensione**

**Numerazione dei cilindri.** L'indicazione dei singoli cilindri di un motore è regolata da norme. L'ordine di numerazione dei cilindri inizia dal lato opposto all'uscita di forza. Per i motori a V, VR e Boxer, si inizia

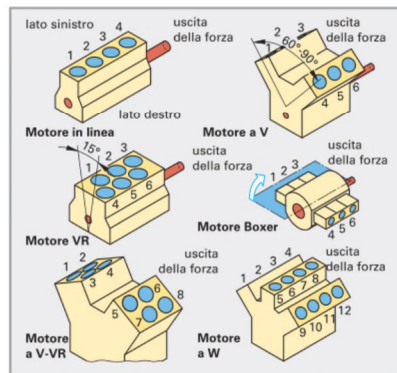


Figura 3: Numerazione dei cilindri

dalla bancata sinistra contando i cilindri in progressione su ogni linea in successione (fig. 3, pag. 206).

**Ordine e intervallo di accensione di motori pluricilindrici (fig.1)**

**Ordine di accensione.** Indica in quale ordine si susseguono le fasi di lavoro dei singoli cilindri di un motore.

**Intervallo di accensione.** Indica a quale distanza, riferita in gradi di albero motore si susseguono le fasi di lavoro e le accensioni dei singoli cilindri. Più è alto il numero di cilindri, più breve sarà l'intervallo di accensione. La rotondità di rotazione del motore diviene più uniforme e la coppia motrice prodotta è più regolare.

$$\text{Intervallo di accensione} = \frac{720 \text{ }^\circ\text{AM}}{\text{n. dei cilindri}}$$

**Esempio.** Per un motore 5 cilindri, l'intervallo di accensione si calcola in  $720 \text{ }^\circ\text{AM} : 5 = 144 \text{ }^\circ\text{AM}$ . Come surrogato dell'albero a manovelle, è utilizzata una rappresentazione grafica a forma di stella. Partendo dal cilindro posizionato in alto, indicato con il numero 1, gli altri cilindri sono fissati conformemente all'ordine di accensione 1 - 2 - 4 - 5 - 3 in senso contrario alla rotazione a distanza di  $144^\circ$ . Ad ogni stella di manovella, si potrà in tal modo leggere l'ordine di accensione.

Tipologia motore	Albero motore	Stella di accensione	Intervallo di accensione	Ordine di accensione
monocilindrico verticale 2 x portate (supporti)			720°	
due cilindri motore boxer 2 x portate (supporti)			360°	
due cilindri motore in linea 2 x portate (supporti)			360°	
tre cilindri motore in linea 4 x portate (supporti)			240°	1 - 3 - 2
quattro cilindri motore in linea 5 x portate (supporti)			180°	1 - 3 - 4 - 2 1 - 2 - 4 - 3
quattro cilindri motore boxer 3 x portate (supporti)			180°	1 - 4 - 3 - 2
cinque cilindri motore in linea 6 x portate (supporti)			144°	1 - 2 - 4 - 5 - 3
sei cilindri motore in linea 7 x portate (supporti)			120°	1 - 5 - 3 - 6 - 2 - 4 (oppure 1 - 2 - 4 - 6 - 5 - 3) (oppure 1 - 5 - 4 - 6 - 2 - 3)
otto cilindri motore a V 5 x portate (supporti)			90°	sequenza ordine di accensione più comune 1 - 5 - 4 - 8 - 6 - 3 - 7 - 2 1 - 8 - 2 - 7 - 4 - 5 - 3 - 6 1 - 6 - 3 - 5 - 4 - 7 - 3 - 8

Figura 1: Tipologie di alberi motore, ordini di accensione e sequenza delle fasi



### 10.7 Curve caratteristiche del motore (diagramma motore)

Le caratteristiche di un motore relative a potenza, coppia motrice e consumo specifico sono definite mediante misurazioni rilevate al banco prova.

Se si riportano tali valori misurati in un diagramma in funzione del regime motore, si ottengono le curve caratteristiche del motore (fig. 1).

Si distinguono curve a pieno carico e curve a carico parziale.

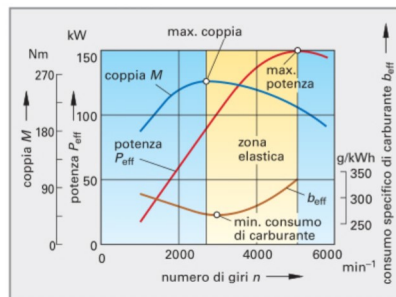


Figura 1: Curve caratteristiche a pieno carico di motore Otto a 4 tempi

**Curve caratteristiche a pieno carico.** Il motore portato a temperatura di esercizio viene frenato al banco prova.

Per pieno carico si intende il carico al quale il motore può sostenere un determinato regime di rotazione al banco prova. I valori rilevati su tutto l'arco del campo di rotazione, a parità di carico, definiscono l'andamento delle curve di coppia motrice massima, potenza massima e consumo minimo di carburante in relazione al numero di giri corrispondente.

**Curve caratteristiche a carico parziale.** Considerando che un motore nel proprio utilizzo di tutti i giorni viene a trovarsi di rado a pieno carico, sono altrettanto importanti le rilevazioni fatte a carico parziale. Per questo vengono compiute più serie di prove al banco a diversi regimi di rotazione dove la farfalla viene aperta solo parzialmente.

In teoria, su tutto il campo di impiego e a parità di apertura di farfalla, il consumo di carburante nonché la coppia motrice dovrebbero rimanere uguali in quanto la medesima quantità di energia prodotta dal riempimento del cilindro dovrebbe produrre anche la medesima forza torcente (momento di coppia) sull'albero motore. Conformemente, la potenza dovrebbe crescere in modo costante con l'aumentare del regime di rotazione del motore.

Dopo il raggiungimento della potenza massima, la curva di potenza cala in quanto, con l'aumentare del regime di rotazione, la perdita di coppia non può più essere bilanciata.

Le cause per lo scostamento della linea di curva ideale sono le seguenti:

- riempimento incostante ai bassi e agli alti regimi di rotazione;
- mancanza di aria e cattiva turbolenza della miscela aria-carburante in seguito a bassa velocità di flusso, con conseguente combustione più lenta e incompleta;
- perdita di calore;
- perdite di attrito.

**Campo elastico.** Si situa tra il punto di coppia massima e il punto di potenza massima (fig. 1). Con il calo del regime di rotazione, la diminuzione di potenza è compensata dall'aumento della coppia. La coppia massima dovrebbe essere raggiunta già prima del regime di rotazione medio, la potenza massima, invece, ai regimi di rotazione più alti. In questo modo, viene a crearsi un campo elastico più ampio che si riflette positivamente sulla scelta dei rapporti al cambio in quanto il campo di coppia diviene più esteso.

**Diagramma caratteristico del consumo.** Nel diagramma (fig. 2) sono rappresentate le curve di consumo in funzione della coppia e del regime di rotazione. Si ottengono linee di curva a consumo specifico costante le quali si richiudono parzialmente. Queste linee prendono un andamento a forma di conchiglia, motivo per il quale sono denominate curve a conchiglia o curve ovoidali.

Inoltre, nel diagramma sono definite anche curve a carico di utilizzo costante, dalle quali si può evincere che il motore è in grado di rilasciare la medesima potenza di utilizzo con diversi valori di consumo specifico.

Nell'esempio riportato in figura, il motore relativo al diagramma può produrre la potenza di 60 kW con un consumo specifico sia di 320 g/kWh e sia di 280 g/kWh, ma con un aumento di coppia motrice.

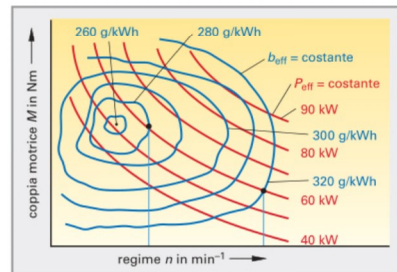


Figura 2: Diagramma caratteristico dei consumi di carburante, curve ovoidali

### 10.8 Rapporto corsa-alesaggio, potenza specifica, peso-potenza

#### Rapporto corsa-alesaggio

Indica la relazione tra corsa e alesaggio.

Se la corsa è minore dell'alesaggio, il rapporto corsa-alesaggio è inferiore a 1. Al contrario, è maggiore di 1 se la corsa è superiore all'alesaggio.

**Motori a corsa corta.** Nell'interesse di garantire una lunga durata dei motori di serie, non si dovrebbe superare una velocità media lineare del pistone di 20 ms. Per poter comunque raggiungere alti regimi di rotazione, sono costruiti motori a corsa corta. Per questi motori, il rapporto corsa-alesaggio è minore di 1 (0,7-0,9).

**Motori a corsa lunga.** Il rapporto corsa-alesaggio è maggiore di 1 (1,1-1,3). Sono utilizzati per lo più per la propulsione di veicoli da lavoro (per esempio, autocarri) e autobus. Tramite regimi più bassi si ottengono elevati rendimenti di marcia ed attraverso il maggiore raggio di manovella si ottengono coppie più elevate.

#### Potenza specifica

La potenza specifica indica la potenza massima di utilizzo per litro di cilindrata che un motore è in grado di produrre.

I motori veloci sono tanto più idonei alla trazione dei

veicoli quanto maggiore è la loro potenza in rapporto alla cilindrata e quanto minore è il loro peso di costruzione in rapporto alla potenza. Per poter paragonare tra di loro i singoli motori, sono stati introdotti i concetti di potenza specifica e peso per unità di potenza (tab. 1).

Il rapporto peso-potenza di un motore indica quale peso ha il motore ogni kW di potenza massima utile fornita.

Il rapporto peso-potenza di un veicolo indica quale peso ha il veicolo ogni kW di potenza massima utile fornita.

Tabella 1: Potenza specifica, rapporto peso-potenza

Tipo di motore	Potenza specifica	Rapporto peso-potenza	
	kW/l	kg/kW	kg/kW
motori a ciclo Otto motoveicoli	... 155	0,5 ... 3	2 ... 9
autovetture	... 90	1,3 ... 5	4 ... 22
auto da corsa	< 300	1 ... 0,2	1,5 ... 7
motori Diesel veicoli industriali	25 ... 30	1,8 ... 5	12 ... 25
motori sovralim. di autov. Diesel	... 80	1 ... 4	9 ... 20
motori sovralim. di v. pesanti Diesel	... 30	2 ... 7	50 ... 210

#### DOMANDE DI RIPASSO

- 1 In base alla disposizione dei cilindri, come possono essere classificati i motori a combustione?
- 2 In quale successione si svolgono le fasi di un motore a 4 tempi?
- 3 Quali rapporti di compressione possiedono i motori a ciclo Otto a 4 tempi?
- 4 Entro quali limiti si situano i valori di pressione di compressione e quelli di pressione di combustione nei motori a ciclo Otto a 4 tempi?
- 5 Come si svolge la miscelazione interna nel motore Diesel?
- 6 Cosa dice la legge di Gay-Lussac?
- 7 Quali sostanze si formano dalla combustione della miscela aria-carburante?
- 8 Quali conseguenze ha il battito in testa nei motori a ciclo Otto?
- 9 Cosa si intende per ritardo di accensione nel motore Diesel?
- 10 Cosa si intende per battito in testa nel motore Diesel?
- 11 Quali caratteristiche particolari caratterizzano il motore Diesel?
- 12 Come si chiamano i 4 gruppi costruttivi del motore a ciclo Otto e quelli del motore Diesel?
- 13 Quali difetti si possono evincere da un diagramma di lavoro?
- 14 Cosa si intende per diagramma della distribuzione simmetrico?
- 15 In cosa si differenziano i motori a corsa corta da quelli a corsa lunga?
- 16 Qual è la sequenza di accensione di un motore a 6 cilindri in linea?
- 17 Come viene definita la numerazione normalizzata dei cilindri?
- 18 Cosa indica la potenza specifica?
- 19 Cosa indica il rapporto peso-potenza di un motore?
- 20 Cosa si intende per massima potenza di utilizzo di un motore?
- 21 Cosa si intende per curve caratteristiche a pieno carico di un motore?
- 22 Per quale motivo la coppia motrice di un motore a ciclo Otto non è costante su tutto l'arco di regime di rotazione?
- 23 Cosa si intende per campo elastico?