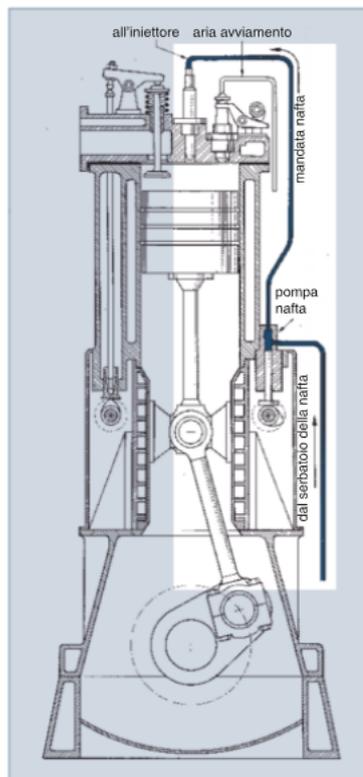


Motori a combustione graduale

1 Generalità

Lo scopo che ispirò le prime realizzazioni di un motore a combustione graduale fu quello di utilizzare combustibili poveri, secondo un ciclo termico nel quale fossero ammissibili forti rapporti di compressione per aumentarne il rendimento. Risale al 1873 la prima costruzione di un motore funzionante a gas di petrolio secondo un ciclo da compiersi in soli due tempi; questa, e altre realizzazioni del genere dettero però risultati poco felici. Solo nel 1893, l'ingegnere tedesco Rudolf Diesel brevettò, e in seguito costruì, un motore concepito per utilizzare come combustibile il polverino di carbone, secondo un ciclo termico simile a quello di Carnot; in seguito questo concetto venne abbandonato per passare all'utilizzazione di combustibili liquidi pesanti seguendo un ciclo a quattro tempi che prese il nome dal suo ideatore. L'impiego di un combustibile liquido piuttosto denso e perciò difficilmente volatile complicò subito il problema dell'alimentazione, non essendo possibile aspirarne i vapori per effetto della semplice depressione creata nel cilindro in seguito al moto discendente dello stantuffo; il combustibile doveva perciò essere iniettato nel cilindro e ridotto in goccioline minutissime per permettere l'intima miscelazione con l'aria comburente, in modo analogo a quanto avviene nei focolari delle caldaie. Per riuscire a elevare il rapporto di compressione del motore senza incorrere nell'eventualità di accensioni anticipate, si ricorse all'aspirazione di aria pura, che, essendo un gas inerte, può essere sottoposta a pressioni notevolissime; l'aria aspirata nella prima corsa dello stantuffo e successivamente compressa nel cilindro, aumenta sensibilmente di temperatura tanto da poter provocare l'accensione del combustibile se esso viene introdotto finemente polverizzato al termine della fase di compressione. Un motore a combustione graduale a quattro tempi (FIGURA 17.1) differisce, apparentemente, dal motore a scoppio solo nell'organo infiammatorio (candela), che è sostituito da uno speciale polverizzatore (o iniettore) per l'introduzione del combustibile. Vedremo in seguito, esaminando più dettagliatamente il suo funzionamento, come le differenze con il motore a scoppio siano maggiori, in relazione alle diverse esigenze di alimentazione, al diverso rapporto di compressione e al regime di rotazione sensibilmente minore di quello dei motori a scoppio. Lo schema ora illustrato si riferisce a una macchina monocilindrica, e questo, se può essere ammissibile per i motori a scoppio, non lo è affatto per

1 Questi motori venivano definiti anche *motori a iniezione*, per il loro sistema di alimentazione.



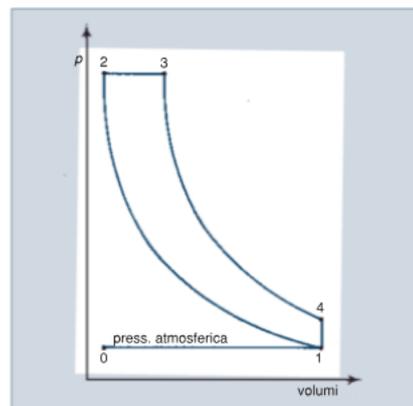
17.1 Motore a combustione graduale 4T semplice effetto (schema).

i motori diesel, tendenzialmente lenti e più adatti all'impiego quando sono richieste potenze medie e alte. I motori a combustione graduale dominano incontrastati il campo delle alte potenze, sia per l'economia di esercizio, sia per la maggior sicurezza, caratteristiche connesse al tipo di combustibile impiegato, molto meno volatile della benzina; in particolare negli impianti navali, dove alla potenza molto elevata si accoppia un limitatissimo regime di rotazione (120 + 200 giri/min) il diesel, malgrado l'inevitabile complicazione costruttiva necessaria per l'avviamento e l'inversione di marcia (v. parr. 2 e 3, cap. 18), compete da pari a pari con gli impianti a turbina. Nelle applicazioni terrestri, l'impiego dei motori diesel è comune nei trasporti, in piccole centrali elettriche a funzionamento intermittente, come motrici di emergenza in mancanza di energia elettrica o infine per l'azionamento di grandi compressori alternativi (moto-compressori) o di pompe a basso regime di rotazione. Come il motore a scoppio, anche il diesel può seguire un ciclo a quattro tempi oppure a due soli tempi, e può essere del tipo a semplice effetto o a doppio effetto, quest'ultimo molto comune, almeno in passato, nella propulsione navale.

2 Motori diesel a quattro tempi

Con le stesse ipotesi semplificative premesse nello studio dei motori a scoppio esaminiamo adesso le varie fasi del ciclo teorico seguito da un motore a combustione graduale a quattro tempi; riportando sulle ordinate le pressioni e sulle ascisse i volumi generati dallo stantuffo (FIGURA 17.2) il ciclo inizia dal punto 0 (stantuffo al p.m.s.), supponendo che l'organo mobile sia dotato dell'inerzia sufficiente a compiere le prime corse, per effetto del lavoro sviluppato nel ciclo precedente.

- Nella fase di aspirazione (0 → 1) lo stantuffo muovendosi verso il basso genera una depressione; la valvola di aspirazione è aperta e il cilindro aspira aria pura dall'ambiente esterno. **Anche in questo caso potremo supporre che questa fase avvenga a pressione costante.**
- Nella fase di compressione (1 → 2) lo stantuffo, invertito il movimento, comprime l'aria nel cilindro, essendosi chiusa la valvola di aspirazione all'inizio della corsa di ritorno. L'aria viene compressa a 30 + 35 bar (pressioni inconciliabili con una miscela detonante ma pienamente accettabili per un gas inerte), elevando la propria temperatura fino a 800 + 900 °C. **Possiamo supporre, in prima approssimazione, che la fase di compressione sia adiabatica.**
- Al termine della fase di compressione, il polverizzatore inietta nel cilindro il combustibile finemente polverizzato, che, a contatto con l'aria caldissima, si infiamma spontaneamente; **la combustione non è istantanea come nel motore a scoppio, sia perché il combustibile polverizzato non si è ancora miscelato completamente con l'aria calda, sia perché l'iniezione continua per un certo tempo durante il quale lo stantuffo comincia la fase discendente.** Questa fase potrebbe essere paragonata a quella di ammissione che si verifica in una macchina alternativa a vapore; si suppone infatti – almeno teoricamente – che l'incremento di pressione prodotto dai gas combusti venga compensato dall'aumento di volume generato dal moto discendente dello stantuffo. **Ciò consente di affermare che la fase di**



17.2 Ciclo teorico di un motore a combustione graduale a 4 tempi.

combustione (2 → 3) avviene a pressione costante, il che costituisce l'unica differenza fra il ciclo teorico del diesel e quello del motore a scoppio.

- Terminata la combustione, segue una fase di espansione – che riterremo adiabatica – simile a quella del ciclo teorico del motore a scoppio.
- Alla fine della corsa, si apre la valvola di scarico e la pressione dei gas combusti cade bruscamente fino a uguagliare il valore della pressione esterna. **Tale fase di inizio scarico (4 → 1) può essere ritenuta a volume costante.**
- La fase di scarico si conclude con la corsa di ritorno dello stantuffo che scaccia innanzi a sé i prodotti della combustione; con le consuete ipotesi semplificative, **si ritiene che la fase di scarico avvenga a pressione costante.**

Il ciclo teorico del motore a combustione graduale a quattro tempi, a meno delle due isobariche (0 → 1) e (1 → 0), coincide pertanto con il ciclo termodinamico descritto al paragrafo 5, capitolo 19, volume 2. Quindi è sempre valida la formula del rendimento termico ideale, ricavata nel paragrafo stesso:

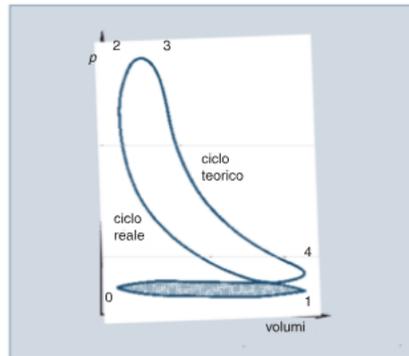
$$\eta_{id} = 1 - \frac{1}{r^{\gamma-1}} \cdot \frac{(C^{\gamma} - 1)}{\gamma \cdot (C - 1)}$$

funzione del rapporto di compressione r , che nel diesel è maggiore rispetto al motore a scoppio (mediamente intorno a 18 e talvolta fino a 20 + 22), e del rapporto di combustione C , che è una particolare caratteristica dei diesel non confrontabile con altra grandezza analoga presente negli altri motori. L'aspirazione di aria pura nella prima fase, consente infatti di comprimerla a pressioni molto elevate senza che si manifestino i fenomeni di accensione spontanea caratteristici del motore a scoppio (v. cap. 19).

► È bene anzi rimarcare che il motore diesel non solo può, ma **deve** avere un forte rapporto di compressione, in quanto la combustione della nafta è affidata unicamente all'alta temperatura regnante nell'interno del cilindro al termine della fase di compressione.

I motivi di discordanza fra il ciclo teorico ora discusso e il ciclo reale, quale potrebbe essere direttamente rilevato con un indicatore, sussistono anche per il motore a combustione graduale, e sono gli stessi del motore a scoppio: inerzia opposta dalle valvole al movimento di apertura e chiusura, laminazione del fluido attraverso le valvole stesse, espansione e compressione non rigorosamente adiabatiche in seguito alla sottrazione di calore effettuata con la refrigerazione dei cilindri ecc. Questo, insieme al complesso di anticipi e ritardi all'introduzione e allo scarico, fa sì che il ciclo reale si discosti sensibilmente da quello teorico assumendo l'aspetto illustrato in FIGURA 17.3.

Anche la fase di combustione non avviene a pressione costante secondo quanto ipotizzato in precedenza. Come nei motori a scoppio si anticipa l'accensione della miscela combustibile per evitare una caduta di pressione nella fase di espansione, così **nei diesel si opera in modo del tutto analogo, anticipando l'iniezione del combustibile in modo da provocare dapprima un brusco aumento della pressione interna (dovuta in parte all'incipiente combustione e in parte alla diminuzione di volume conseguente al moto dello stantuffo che non ha ancora raggiunto il p.m.s.) e in seguito una fase a pressione decrescente, non appena lo stantuffo, invertito il suo movimento, inizia a spostarsi verso il p.m.i.**



17.3 Ciclo reale di un motore diesel 4T.

La configurazione classica del ciclo diesel è seguita, con molta approssimazione, dai motori a combustione graduale molto lenti (tipici quelli impiegati nella propulsione navale) mentre il funzionamento dei motori con un veloce regime di rotazione si avvicina sensibilmente al ciclo Sabathé per via dell'iniezione anticipata.

3 Motori diesel a due tempi

Il ciclo teorico di un motore diesel a due tempi si deduce da quello del quattro tempi, con le stesse varianti esposte per i motori a scoppio: lo stantuffo, nel suo moto di discesa scopre le luci di scarico consentendo una prima riduzione della pressione nell'interno del cilindro, poi le luci di ammissione, attraverso le quali penetra l'aria pura di ricarica, proveniente dalla pompa di lavaggio (che in questi motori è generalmente separata), in leggera pressione (0,2 + 0,3 bar effettivi).

L'aria scaccia innanzi a sé i gas combusti, compiendo un lavaggio molto più efficace di quello dei motori a scoppio, poiché viene immessa in quantità sovrabbondante, e una parte di essa effluisce verso lo scarico.

Lo stantuffo inizia poi la corsa ascendente comprimendo l'aria nel cilindro a pressione un po' superiore a quella dei corrispondenti motori a «4T» (32 + 36 bar); poco prima che la fase di compressione si concluda il polverizzatore inietta gradualmente la nafta nel cilindro e questa brucia (a pressione costante) a contatto con l'aria calda; la spinta esercitata dai prodotti della combustione costringe lo stantuffo a ridiscendere compiendo la fase utile del ciclo che si suppone avvenga adiabaticamente.

La fase di espansione si conclude non appena si scoprono le luci di scarico e i gas combusti cominciano a defluire verso l'esterno perdendo di pressione, mentre dalle luci di ammissione, aperte in un tempo successivo, inizia la nuova fase di introduzione.

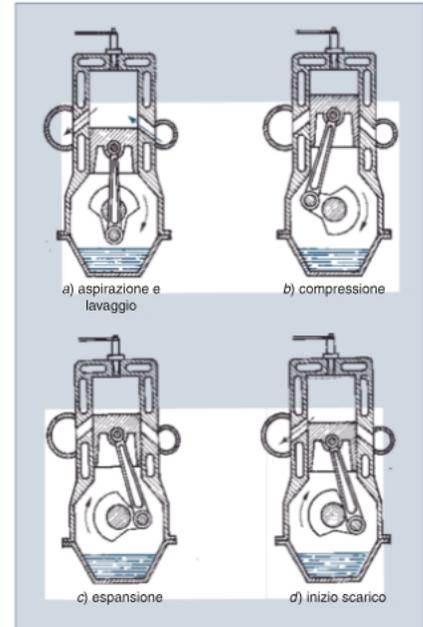
A parte la fase di combustione, le altre fasi sono simili a quelle di un motore a scoppio (FIGURA 17.4) e lo è anche il ciclo teorico (FIGURA 17.5, pagina seguente).

Nel ciclo reale invece (FIGURA 17.6, pagina seguente) scompaiono gli spigoli in corrispondenza ai punti morti, le adiabatiche sono sostituite da politropiche (più basse) e la fase di combustione, teoricamente rettilinea, assume la configurazione di una curva; **dal lavoro prodotto, deducibile dal ciclo, si dovrà detrarre quello speso per l'azionamento della pompa di lavaggio, che non è rappresentato nel diagramma.**

Nel motore diesel a due tempi a semplice effetto (FIGURA 17.7, pagina seguente), il lavaggio avviene con pompa separata (non visibile in figura) che invia l'aria a un collettore disposto su un lato del motore all'altezza dei cilindri; opportune valvole automatiche, funzionanti per differenza di pressione, consentono l'immissione dell'aria entro il cilindro nell'istante dovuto.

I motori diesel «2T» sono spesso del tipo a doppio effetto: il cilindro è chiuso in basso e porta un secondo polverizzatore per l'iniezione nella camera inferiore; l'altezza dello stantuffo non è più articolata sullo spinotto ma sul *testa a croce* dal quale si diparte poi la biella.

2 Non ci riferiamo alla fine della fase di compressione, in quanto è ormai noto il concetto dell'anticipo adottato nei motori a scoppio, concetto che vale integralmente (salvo la realizzazione pratica) anche per i motori diesel.

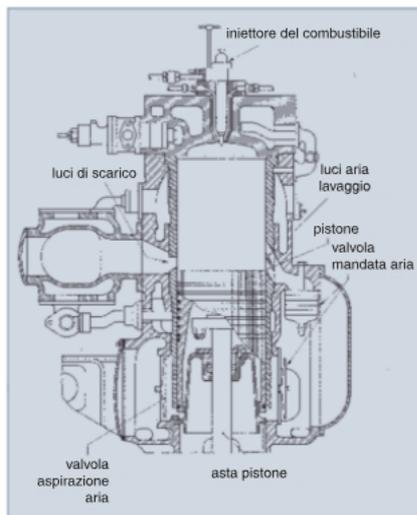


17.4 Fasi di un motore diesel a due tempi.

La valvola automatica, oltre alla semplicità di funzionamento e all'assenza di meccanismi accessori, evita i rimescolamenti fra l'aria di lavaggio e i prodotti della combustione, rende più efficace il lavaggio e consente cariche più complete migliorando il rendimento volumetrico del motore. Nel motore Sulzer di FIGURA 17.11 sono perfettamente visibili sul lato destro le luci di lavaggio normali e quelle aggiuntive; l'immissione dell'aria è regolata da una valvola del tipo descritto in precedenza.

La distribuzione in un motore diesel a quattro tempi, analogamente ai motori a scoppio, prevede (specialmente per i grossi motori) un albero a camme posto lateralmente ai cilindri, sul quale sono riportate le camme per l'apertura delle valvole di aspirazione e di scarico attraverso un sistema di aste e bilancieri. Il diagramma circolare mantiene inalterata la propria efficacia rappresentativa, mettendo in evidenza gli anticipi all'apertura e i ritardi alla chiusura delle rispettive valvole, e di conseguenza l'estensione angolare delle varie fasi.

Per i motori diesel a due tempi senza luci aggiuntive di lavaggio l'albero a camme non ha motivo di esistere essendo la distribuzione affidata al movimento dello stantuffo; se però sono previste le luci aggiuntive per migliorare la fase di lavaggio e se la loro apertura è condizionata da valvole non automatiche, è necessario un albero a camme, o un sistema di piccoli bilancieri articolato sulla testa a croce per effettuare l'apertura di tali valvole; si noti che l'installazione di un albero a camme, per quanto onerosa, può essere talvolta giustificata anche dalla necessità di azionare il polverizzatore del combustibile, il cui intervento deve avvenire in un istante ben determinato. In questo caso, che peraltro dipende dal sistema di iniezione adottato, l'albero ausiliario assolve la doppia funzione di distribuzione e di accensione. A titolo indicativo riportiamo alcuni valori degli anticipi e dei ritardi relativi ai motori diesel a 4T:



17.11 Motore a due tempi con luci aggiuntive di lavaggio.

TABELLA 17.1

	Motori veloci	Motori lenti
Anticipo all'aspirazione	15° + 25°	10° + 20°
Ritardo all'aspirazione	20° + 40°	10° + 20°
Anticipo allo scarico	40° + 60°	30° + 45°
Ritardo allo scarico	10° + 15°	8° + 10°
Anticipo all'iniezione	15° + 30°	7° + 8°
Termine iniezione	0° + 10°	30° + 45°

5 L'iniezione

Vediamo alcune considerazioni sui motori a combustione graduale:

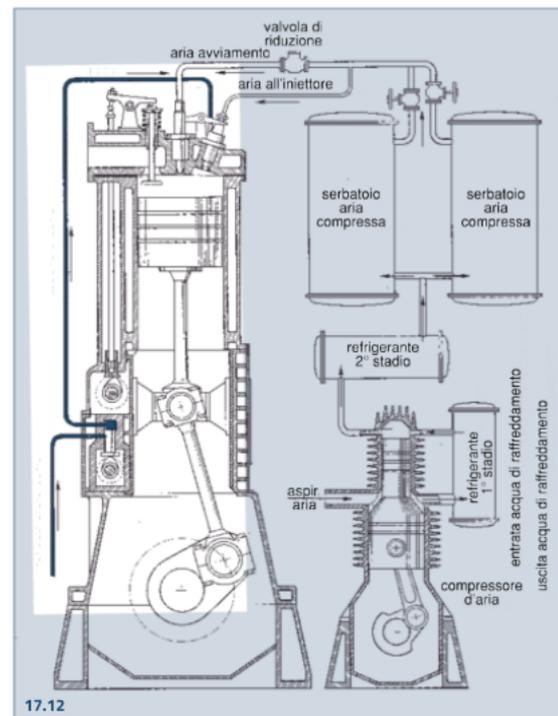
- l'organo infiammatore è superfluo in quanto la combustione avviene per semplice contatto fra il combustibile e l'aria calda contenuta nel cilindro;
- non variano invece concettualmente i sistemi di distribuzione anche se si opera su aria pura anziché su miscela.

Occorre però tener presente che il miscelarsi tra aria e combustibile è possibile solo se quest'ultimo viene introdotto nel cilindro finemente polverizzato, in modo ana-

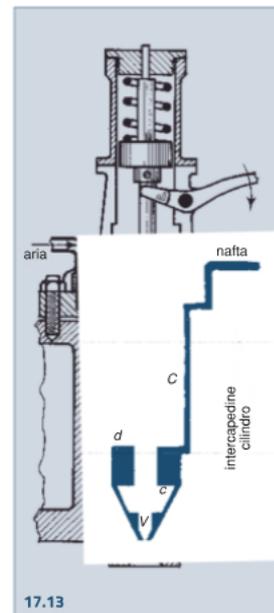
logo a quanto avviene nei focolari delle caldaie; però, a differenza dei focolari ove la pressione è poco diversa da quella atmosferica, nei cilindri di un motore diesel, al termine della fase di compressione, regna una pressione piuttosto elevata e la nafta deve esservi spinta da un opportuno organo meccanico. **Il complesso di operazioni che permettono l'introduzione del combustibile nel cilindro e la sua conseguente polverizzazione, va sotto il nome di iniezione.** Occorre perciò far penetrare il combustibile nell'aria compressa del cilindro, facendo in modo che esso si suddivida in minutissime particelle, ciascuna delle quali sarà avvolta da un'atmosfera di aria calda, formando la miscela atta a bruciare rapidamente; a tale scopo è necessario l'intervento di un organo propulsore che, nei casi più comuni, è di tipo pneumatico o meccanico.

Iniezione pneumatica

Il fluido propulsore è costituito da aria compressa, elaborata da un compressore, inviata sotto una pressione di 60 ± 70 bar al polverizzatore installato sulla testata del cilindro. Il compressore di tipo multistadio è generalmente azionato dalla motrice principale, quando il suo compito si limita all'elaborazione dell'aria di iniezione; tuttavia, nei grandi impianti (in special modo nella propulsione navale) dove anche l'avviamento della motrice è effettuato tramite aria compressa, il compressore è indipendente (FIGURA 17.12) dovendo provvedere alla ricarica dei serbatoi di avviamento quando la motrice principale è inattiva. Il polverizzatore impiegato nei sistemi di iniezione pneumatica è schematizzato in FIGURA 17.13:



17.12



17.13

17.12 Motore diesel a iniezione pneumatica (schema).

17.13 Iniettore per iniezione pneumatica a comando esterno (schema).

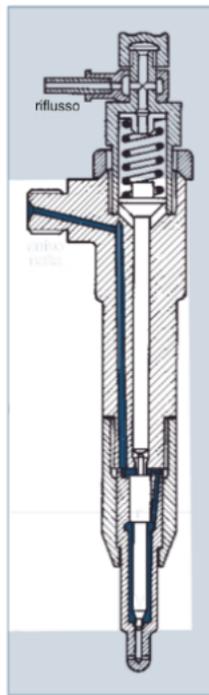
nella camera (C) la cui parte inferiore è chiusa da una valvola ad ago (V), comandata dall'esterno mediante una camma calettata sull'albero della distribuzione, convergono due tubicini; il primo adduce l'aria compressa, mentre l'altro convoglia il combustibile liquido, spinto (a bassa pressione) da una pompa e talvolta preventivamente riscaldato per aumentarne la fluidità.

La nafta viene immessa nell'interno del polverizzatore sopra una serie di piastrelle bucherellate, seguite da un cono metallico munito di solchi ricavati lungo le generatrici. Quando la camma, tramite il bilanciario, apre la valvola ad ago (V) vincendo l'azione della molla antagonista, il combustibile, spinto dall'aria compressa sovrastante, attraversa le piastrelle, si fraziona, si mescola con l'aria e penetra nell'interno del cilindro attraverso il forellino calibrato e sagomato a *diffusore* formando un getto conico che a contatto con l'aria calda brucia progressivamente. Il sistema di iniezione pneumatica crea nella camera di combustione un ottimo grado di turbolenza in quanto i due fluidi subiscono un preventivo rimescolamento durante la fase di efflusso dall'ugello; ciò consente una buona polverizzazione della nafta, una combustione regolare e realizza nel cilindro una pressione massima inferiore a quella ottenuta con l'iniezione meccanica. La presenza del compressore, però, riduce il rapporto potenza/peso della macchina, aumenta l'ingombro e la rende inadatta ad alcune applicazioni (ad es. alla trazione ferroviaria); inoltre, l'espansione dell'aria attraverso l'ugello diminuisce la temperatura della camera di combustione e ciò è un inconveniente tanto più sensibile quanto minore è il carico del motore e il suo regime di rotazione.

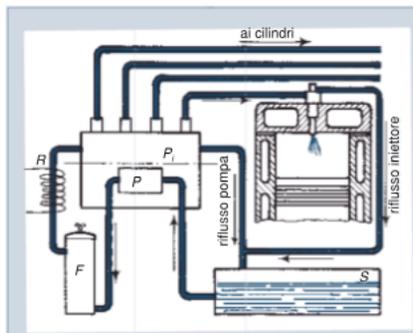
Iniezione meccanica

Coincide concettualmente con il sistema adottato per i combustibili liquidi nelle caldaie a vapore. La differenza sostanziale riguarda il valore della pressione che nei motori a combustione graduale è molto più elevato; infatti, il combustibile viene iniettato nella camera di combustione di una caldaia alla pressione di $15 \div 20$ bar, pari cioè a $15 \div 20$ volte quella esistente nell'interno della camera stessa, e la polverizzazione è assicurata in virtù del rapporto fra le due pressioni; in modo analogo lo stesso rapporto deve sussistere fra la pressione di iniezione e quella esistente nell'interno del cilindro di un motore diesel. Poiché in quest'ultimo, al termine della fase di compressione si raggiungono pressioni di $30 \div 35$ bar, la nafta deve esservi immessa a una pressione intorno a $500 \div 700$ bar, valore elevatissimo conseguibile solo con pompe adatte. Nell'iniettore (FIGURA 17.14) la valvola ad ago (V) porta un ringrosso (r) su cui agisce la spinta (verso l'alto) del combustibile inviato dalla pompa di iniezione; quest'ultimo fornisce una portata pulsante e invia la nafta ai singoli cilindri nell'istante dovuto, in modo da provocare l'apertura automatica della valvola eliminando ogni dispositivo esterno.

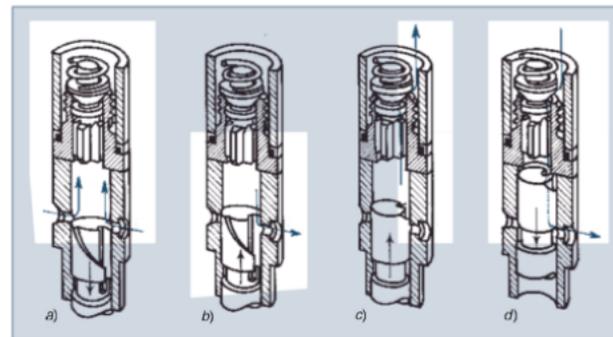
La pompa di iniezione è in genere del tipo a stantuffo, a semplice effetto, azionata dal motore stesso, con una modestissima portata (anche nei motori di grandi dimensioni). Perciò, i primi diesel adottarono un unico corpo-pompa per l'alimentazione di tutti i cilindri ottenendo una maggior semplicità costruttiva ma un *dosaggio* non uniforme nei vari cilindri; in seguito si preferì installare una pompetta per ogni cilindro o un'unica pompa suddivisa in tanti corpi separati (uno per ogni relativo cilindro). **Per evitare le ridottissime dimensioni delle singole pompette, queste vengono progettate per erogare una portata maggiore di quella indispensabile;** un opportuno dispositivo di regolazione provvede a eliminare l'eccesso di nafta pompata, rinviandolo sull'aspirazione della pompa attraverso una tubazione di ritorno (FIGURA 17.15): la nafta aspi-



17.14 Iniettore per iniezione meccanica ad apertura automatica (schema).



17.15 Schema del circuito di iniezione.



17.16 Fasi di una pompetta di iniezione alternativa.

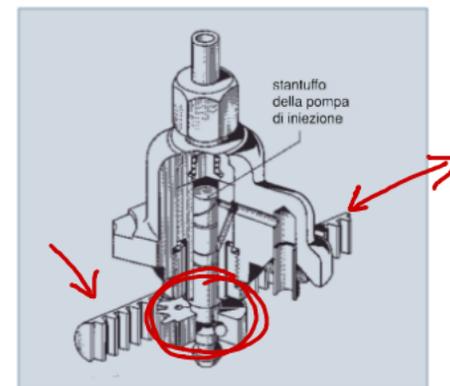
rata dal serbatoio (S) con una pompa ausiliaria (P) viene inviata a bassa pressione prima ai filtri (F), e in seguito all'eventuale riscaldatore (R), che (nel caso si tratti di nafta pesante) aumenta la sua temperatura fino a $80 \div 90$ °C; passa poi alla pompa di iniezione (P_i) distribuendosi nei vari cilindretti dai quali viene inviata ai cilindri motori sotto forte pressione. La regolazione della portata si realizza:

- **mantenendo sollevata la valvola di aspirazione** della pompetta per un certo tratto della corsa premente, in modo che parte del liquido venga respinto nella tubazione di arrivo;
- **aprendo una valvoletta** che metta in comunicazione il tubo di mandata con quello di aspirazione (sistema by-pass);
- **variando opportunamente la corsa dello stantuffo** della pompetta.

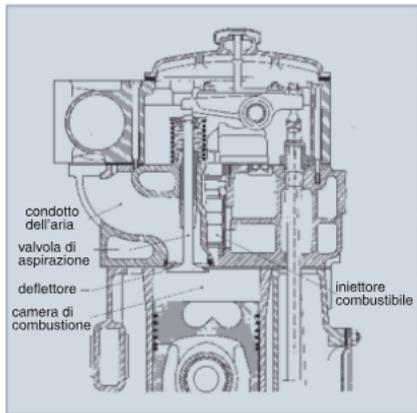
L'ultimo sistema è il più impiegato nei motori di piccola e media potenza (FIGURA 17.16): lo stantuffo porta una scanalatura elicoidale lungo la quale la nafta può rifluire sull'aspirazione in quantità variabile a seconda della posizione dell'elica rispetto al foro (f). La posizione dell'elica viene modificata facendo ruotare lo stantuffo intorno al proprio asse mediante un accoppiamento ruota dentata-cremagliera, quest'ultima azionata dal regolatore centrifugo. Nei motori di bassa e media potenza, la pompa di iniezione è generalmente costituita da un monoblocco nel quale sono ricavati tanti cilindretti quanti sono i cilindri motori da alimentare; gli stantuffi sono mossi da un piccolo albero a camme (che prende il moto dall'albero principale) e la regolazione della portata è assicurata dallo spostamento della cremagliera, che consente la rotazione simultanea di tutti gli stantuffi.

Nei motori di grandi dimensioni si preferisce installare su ogni cilindro motore una pompetta separata (FIGURA 17.17), che è movimentata da un albero a camme che corre parallelamente alle testate. Tale albero, pur costituendo un maggior onere costruttivo, assolve anche l'importante compito di provvedere all'avviamento della motrice, quando tale operazione è realizzata mediante aria compressa.

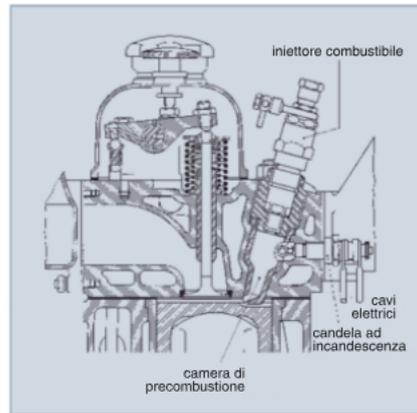
Per realizzare le migliori condizioni per la miscelazione del combustibile con l'aria calda contenuta nel cilindro, la conformazione della camera di combustione deve creare quella turbolenza che con il sistema di iniezione pneumatica era assicurata dalla premiscelazione nella fase di efflusso. Le soluzioni più comuni usate dai progettisti sono:



17.17 Pompetta di iniezione separata (da una monografia della Mobilioil italiana).



17.18 Camera di combustione aperta (da una pubblicazione della Shell Italiana).

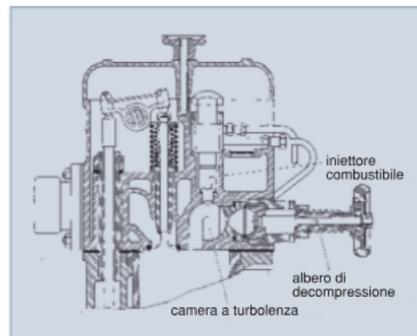


17.19 Motore con camera di pre-combustione (da una pubblicazione della Shell Italiana).

- camera di combustione aperta;
- camera di precombustione;
- camera di combustione a turbolenza.

In FIGURA 17.18 è rappresentata la testata di un motore diesel con **camera di combustione aperta**, soluzione tipica delle macchine tendenzialmente lente; questo sistema viene comunemente designato anche come **iniezione diretta**, ed è caratterizzato da una apposita cavità, ricavata nella testata, o più frequentemente nel cielo dello stantuffo, costituente la vera camera di combustione. Il combustibile viene iniettato attraverso uno o più ugelli, sistemati in modo che esso venga equamente distribuito in tutte le zone della camera; la pressione di iniezione è in genere molto elevata. La turbolenza necessaria è ottenuta mediante un deflettore ricavato nella parte superiore della valvola di aspirazione come è facile rilevare nella figura citata. In altri tipi di motori (particolarmente quelli veloci) si realizzano delle cavità accessorie comunicanti con la camera di combustione attraverso varchi ristretti, in modo che la combustione iniziata nella camera supplementare provochi un veloce efflusso dei gas prodotti atti a rimescolare il fluido presente nella camera principale. Nella FIGURA 17.19 è rappresentato un motore con **camera di pre-combustione** (o pre-camera) atta a contenere circa 1/3 dell'aria comburente; nella pre-camera avviene una parziale combustione che, innalzando sensibilmente la temperatura e la pressione del fluido, genera un violento efflusso verso l'interno del cilindro propagando rapidamente la combustione a tutta la massa gassosa. Nella fase di avviamento, questi motori richiedono una sorgente di calore per innescare le prime accensioni.

Il **sistema di iniezione a turbolenza** (FIGURA 17.20) non differisce sostanzialmente da quello ora descritto; la pre-camera è più ampia (contiene fino al 90% dell'aria comburente) e il foro di comunicazione con il cilindro è disposto in modo tale da creare un moto vorticoso fra l'aria che penetra dal basso e il getto del combustibile effluente dal polverizzatore; la combu-



17.20 Motore diesel con pre-camera a turbolenza (da una pubblicazione della Shell Italiana).

stione parziale è più nutrita e i gas prodotti passano nel cilindro dove il processo si completa rapidamente. Un opportuno sistema di regolazione consente di variare il rapporto di compressione durante la fase di avviamento.

► La camera di combustione separata trova larga applicazione nei motori veloci dove, a causa del breve periodo di tempo concesso al combustibile per mescolarsi con l'aria comburente, si rende ancor più necessario un intenso rimescolamento della massa gassosa.

La pressione di iniezione è più modesta di quella che si realizza nelle camere aperte; ne segue una minor usura delle pompe e degli ugelli e un minor assorbimento di potenza per l'azionamento dell'organo di iniezione.

Moderni sistemi di iniezione

Il sistema di iniezione più recente è costituito dal sistema **common rail**, che è un sistema di alimentazione a iniezione diretta per motori diesel basato sul controllo elettronico della quantità di gasolio iniettato, del numero di iniezioni, e dell'istante di iniezione.

La prima applicazione su vetture di serie fu fatta nel 1997 dalla FIAT, sulla vettura Alfa Romeo 156.

A differenza dei sistemi di iniezione tradizionali, il common rail prevede una pressione elevatissima (da 300 a 1800 bar) del combustibile all'interno di un unico condotto (il condotto comune o **common rail**, di solito realizzato con un cilindro cavo posto sulla testata del motore) che alimenta gli iniettori.

Il sistema è suddiviso in due sezioni, una a bassa pressione che alimenta il sistema dal serbatoio della vettura, e una ad alta pressione che viene realizzata mediante una pompa elettrica. L'uso di una pompa elettrica permette di svincolare la pressione del sistema di iniezione dal numero di giri del motore, e di avere quindi una pressione costante e ottimizzata a tutti i regimi di rotazione del motore; l'alta pressione costante permette iniezioni di carburante molto polverizzate, grazie alla dimensione ridotta degli ugelli.

La centralina elettronica (ECU) comanda elettronicamente gli iniettori (o per meglio dire gli elettroiniettori) a valle del condotto di alimentazione.

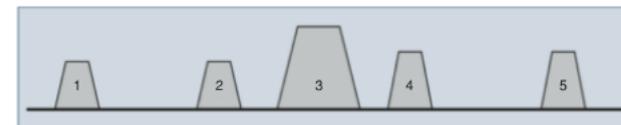
L'iniettore a comando elettronico permette anche una iniezione multipla in sequenza del carburante.

Rispetto alla prima tecnologia utilizzata, denominata Unijet, nella tecnologia attuale (Multijet) vengono effettuate da tre a cinque iniezioni di carburante.

Nel caso di tre iniezioni si ha una pre-iniezione, chiamata Pilot, che viene effettuata prima che il pistone raggiunga il punto morto superiore, seguita dall'iniezione principale e successivamente da una post-iniezione chiamata Post.

Grazie alla preiniezione la pressione nella camera di combustione si innalza in modo più graduale, evitando così la rumorosità di funzionamento una volta tipica dei motori diesel a iniezione diretta.

Nel caso di cinque iniezioni si hanno due preiniezioni e due postiniezioni (FIGURA 17.21).



17.21 Schema iniezioni multijet: 1. iniezione pilota (riduce rumorosità); 2. preiniezione (riduce rumorosità emissioni di CO e CH); 3. iniezione principale (controlla coppia); 4. iniezione after (riduce particolato); 5. postiniezione (rigenera filtro antiparticolato).