

della macchina. Ai fini pratici, tuttavia, l'imperfezione della macchina²³ non influisce tanto, sulle prestazioni, perché le pareti della camera attiva non sono del tutto impermeabili al calore o perché l'innesco alla combustione è localizzato e non distribuito nello spazio, come per il fatto che la situazione geometrica delle luci che provvedono alla sostituzione della carica, per quanto si faccia, è sempre deficiente per una buona respirazione del motore²⁴. Perché le valvole offrano una sezione di passaggio accettabile al fluido occorre un certo tempo dall'inizio dell'alzata (v. par. 2.5) e perciò la schematizzazione ideale e limite, che contempla gli estremi delle fasi ai punti morti dev'essere ritoccata nella pratica, se si vogliono evitare ritardi nelle operazioni fluidodinamiche che in successione assicurano il soddisfacente funzionamento del motore. Tali ritocchi hanno effetti visti sulle prestazioni della macchina e consistono nell'alterare la fasatura di azionamento delle valvole - in sede ideale e limite fissata per angoli θ di manovella pari a 0 o 180° - anticipandola o posticipandola a seconda delle esigenze; e giova assicurare che un anticipo o posticipo angolare anche cospicuo sull'apertura o chiusura di una valvola, in prossimità dei punti morti, impegni uno spostamento dello stantuffo motore piuttosto modesto. La frazione di corsa dello stantuffo corrispondente all'angolo θ di manovella, a partire dal p.m.s., è infatti:

$$x = \frac{1}{2} \left(1 + \mu - \cos \theta - \sqrt{\mu^2 - \sin^2 \theta} \right) \quad (66)$$

ove μ è il rapporto biella/manovella e θ l'angolo di manovella. Con la (66) è facile calcolare ad esempio, con $\mu = 3,5$, per $\theta = 10^\circ$ $x \cong 1/100$ e per $\theta = 20^\circ$ $x \cong 3,8/100$. Sfasando cioè di modesti angoli l'inizio o il termine di una fase rispetto al punto morto, la frazione di corsa che ne rimane coinvolta non supera qualche %. Anche i tempi che impiega la manovella a coprire detti angoli, che alterano la fasatura limite della distribuzione, sono molto brevi, ancorché rilevanti rispetto a quelli impegnati per una fase. Sempre a titolo d'esempio, un motore 4t automobilistico ruotante a 6000 giri/min compie un giro in 1/100 di secondo ed un intero "ciclo" in appena 2 centesimi di secondo. Una corsa dello stantuffo impegna 0,005 s ed uno sfasamento di 10° sull'apertura o chiusura di una valvola comporta un anticipo o un ritardo della corrispondente fase - in termini di tempo - sol-

(²³) Dovuta non tanto all'incapacità, quanto alla mancanza di incentivo economico di ridurla, dato che la qualità corrente della macchina è dettata da esigenze di mercato.

(²⁴) In effetti il motore a c.i., alle velocità operative oggi raggiunte, si presenta, come già detto, "asfittico", sebbene si cerchi di compensare questo inconveniente moltiplicando le valvole su ogni cilindro e disegnando convenientemente i condotti attraversati dal fluido. La sovralimentazione, a questo riguardo, è certamente provvidenziale.

tanto di mezzo millesimo di secondo! I pochi conti dianzi esposti valgono a sensibilizzare il Lettore su quanto si diceva, e cioè che le alterazioni della distribuzione che verranno tra breve discusse, mentre non introducono sostanziali modifiche allo schema del processo, possono produrre notevoli benefici, nonostante siano brevissimi, sotto il profilo temporale, gli allungamenti o accorciamenti delle fasi operative che essi comportano.

Il discorso può essere utilmente sviluppato sul *diagramma polare* della distribuzione, nel caso limite riportato nella figura 15, mentre la figura 16 ne manifesta la *fasatura reale*²⁵ per un motore 4t ad accensione comandata (a), per un motore 4t diesel (b) e per un motore lento diesel 2t (c). In generale è bene che la valvola di aspirazione, la quale in sede limite si apre al p.m.s., nella realtà inizi ad aprirsi in leggero anticipo, onde la valvola stessa possa trovarsi sufficientemente aperta quando lo stantuffo acquista velocità.

Così come si è aperta in anticipo, la valvola di aspirazione deve chiudersi in ritardo, di modo che l'estensione dell'arco di apertura (fase di aspirazione) superi i 180° spesso di oltre il 30%. Non deve meravigliare la notevole ampiezza (in figura 40° per il motore del caso "a") dell'angolo di ritardo alla chiusura della valvola di aspirazione. Se esso non vi fosse, la valvola, chiudendosi a fine corsa, ostruirebbe sempre più la vena fluida e la compressione inizierebbe da un valore della pressione di parecchio inferiore a quello atmosferico. Poiché la potenza del motore è - a parità di altre condizioni - proporzionale alla quantità di fluido "intrappolata" nel cilindro, rinesce non approfittare, nella seconda metà della corsa d'aspirazione, dell'energia cinetica già acquistata dalla vena fluida, che tende ad "in-

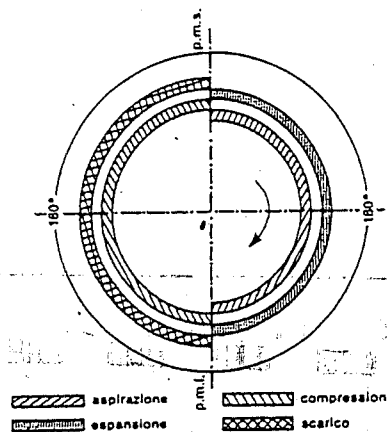


FIG. 15

meravigliare la notevole ampiezza (in figura 40° per il motore del caso "a") dell'angolo di ritardo alla chiusura della valvola di aspirazione. Se esso non vi fosse, la valvola, chiudendosi a fine corsa, ostruirebbe sempre più la vena fluida e la compressione inizierebbe da un valore della pressione di parecchio inferiore a quello atmosferico. Poiché la potenza del motore è - a parità di altre condizioni - proporzionale alla quantità di fluido "intrappolata" nel cilindro, rinesce non approfittare, nella seconda metà della corsa d'aspirazione, dell'energia cinetica già acquistata dalla vena fluida, che tende ad "in-

(²⁵) La fasatura più opportuna fino a tempi recenti veniva assegnata in base all'esperienza del progettista e per il prototipo si costruivano in genere due ulteriori assi a camme della distribuzione, con angolature diverse rispetto a quella preventivata allo scopo di scegliere sperimentalmente la migliore. Gli attuali "modelli matematici" consentono di superare questa procedura e di giungere con il calcolo direttamente alla soluzione ottimale della fasatura della distribuzione. I valori angolari indicati nella fig. 16 sono tuttavia orientativi perché quelli corretti sono diversi da caso a caso, in relazione al tipo di applicazione, alla velocità di rotazione e così via. Anche per uno stesso motore sarebbe utile modificarli in funzione delle condizioni di esercizio e intensi studi sono in corso in tal senso presso i maggiori Costruttori al fine di realizzare dispositivi (taluni già realizzati: ad es. Honda = Shuttle Cam) di *distribuzione variabile*.

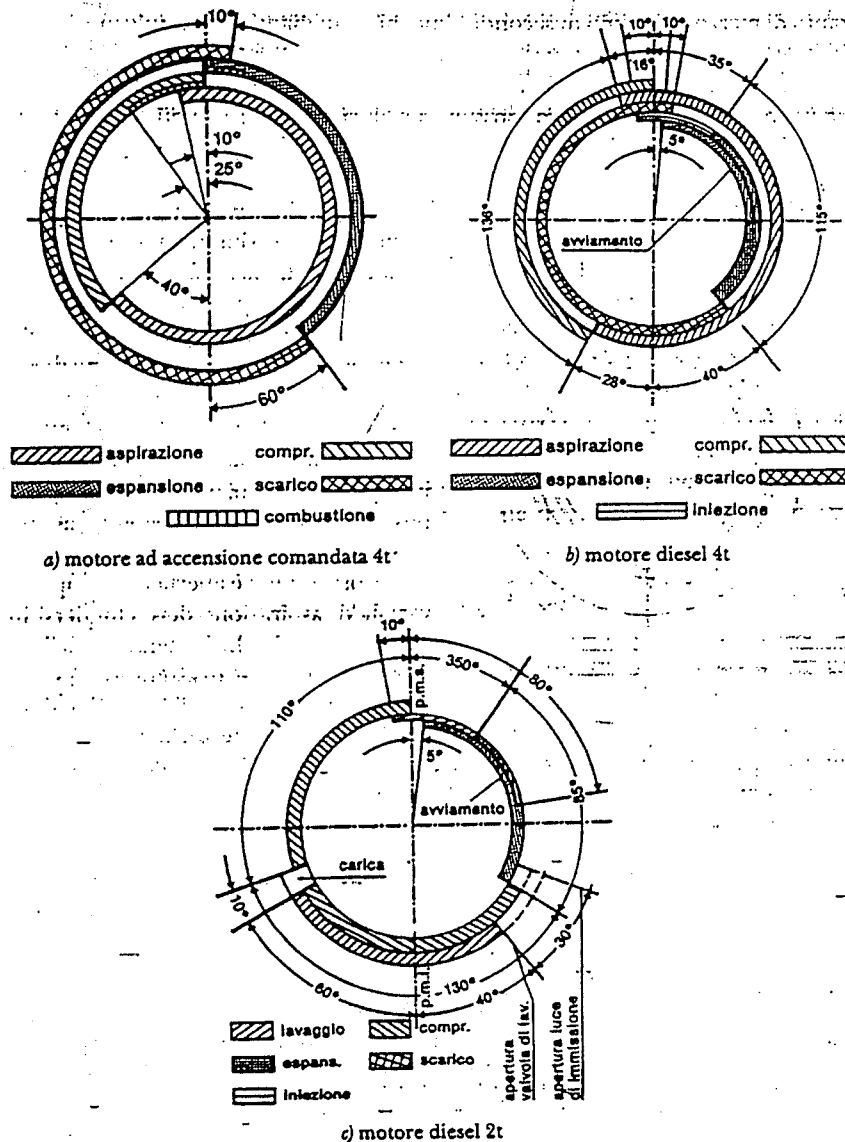


FIG. 16 - Diagrammi polari della distribuzione

saccare" il fluido stesso del cilindro mentre lo stantuffo sta decelerando. Se dunque il ritardo dell'inizio della compressione sottrae, a valvola di aspirazione ancora aperta, una certa frazione (sia pure, come detto, spesso piccola) della corsa alla compressione vera e propria, per contro quest'ultima inizia da una pressione più elevata, con totale beneficio delle prestazioni del motore. Tanto che il massimo di questo beneficio è condizione determinante per l'ottimizzazione della fasatura.

Al termine della fase di compressione, nei motori ad accensione comandata (fig. 16a), si produce l'accensione della miscela presente nel cilindro. È bene, però, che l'innesco (scintilla elettrica alla candela) non venga attivato al p.m.s., ma in anticipo, altrimenti la combustione avverrebbe interamente in fase di espansione, con riduzione della temperatura massima di combustione - e quindi del rendimento termodinamico della macchina - per via della sottrazione di lavoro operata dallo stantuffo sul fluido. Si pensi infatti che la velocità del fronte di fiamma, che partendo dalla candela deve interessare tutta la massa fluida, è relativamente modesta: dell'ordine del 15+20 m/s. Per coprire una distanza di 15 mm (ci si riferisce ancora al motore automobilistico prima citato a titolo d'esempio) occorre dunque un tempo di circa 1/1000 di secondo, laddove l'intera fase di espansione si realizza in 5/1000 di secondo. Nell'esempio in parola, dunque, la combustione occuperebbe 1/5 della corsa di espansione (cioè 36° di manovella) ed il grosso della combustione si avrebbe al termine di quest'arco a causa della propagazione tridimensionale della fiammata, che impegna, come meglio si vedrà in appresso, masse fluide crescenti col tempo.

L'anticipo all'accensione trasferisce la prima parte della combustione, che interessa una piccola aliquota della massa fluida, al termine della compressione, con il vantaggio di avvicinare la seconda parte della combustione (la più "consistente", che resta in fase di espansione) al p.m.s., nei pressi del quale lo stantuffo è praticamente fermo. Si è anzi dimostrata buona norma collocare l'arco di combustione quasi "a cavaliere" del p.m.s. e questo guida in sede progettuale - salvo successivi controlli sperimentali su prototipo - la scelta del valore da assegnare all'angolo d'anticipo in argomento. Angolo, però, non costante, ma ovviamente variabile con la velocità e con il carico del motore; cosicché l'attivazione dell'innesco è nella pratica prodotta da un sistema meccanico sfasatore (nell'automobilismo il distributore dello spinterogeno) sensibile alla velocità di rotazione ed alla depressione nel collettore d'aspirazione²⁶.

(²⁶) Per certe applicazioni (per esempio piccoli veicoli a due ruote) si sta sempre più sviluppando il criterio di inserire in una memoria elettronica ROM ("read only memory") i segnali corrispondenti ad un certo numero di situazioni operative di riferimento del motore con quelli dell'anticipo migliore all'accensione; sicché in ogni condizione di funzionamento, per interpolazione tra i segnali, viene automaticamente fasata in modo corretto l'accensione della miscela.

La fase di espansione, per il tratto iniziale impegnato dalla combustione, occupa la corsa discendente dello stantuffo. Sarebbe però un errore farla terminare al p.m.i. perché, avendo ancora i gas nel cilindro una pressione considerevole (qualche centinaio di kPa) e richiedendo la valvola di scarico un certo tempo per offrire sezioni di passaggio accettabili, troppo gravoso risulterebbe il lavoro di pompaggio, a carico dello stantuffo, nella successiva fase di scarico forzato. È preferibile dunque aprire in anticipo la valvola di scarico, riservando così l'ultimo tratto della corsa di espansione allo scarico spontaneo. È ben chiaro a questo punto che, per ottenere tale effetto, l'angolo d'anticipo in discussione dev'essere ampio: anche superiore ai 50° ed ovviamente tanto più grande quanto maggiore è la velocità massima prevista della macchina. Nonostante un anticipo d'apertura così vistoso della valvola di scarico, la perdita del lavoro di espansione resta piuttosto contenuta, sia perché l'inerzia del fluido produce un'espulsione graduale dei fumi ed impegna un certo tempo (cioè un certo angolo di manovella) per accelerare la vena verso il condotto di scarico; sia perché la pressione, in sede di espansione pressoché adiabatica, precipita rapidamente nel primo tratto; sia infine perché il "braccio di manovella" (con il quale la forza agente sullo stantuffo produce coppia sull'albero) è sempre più piccolo a misura che ci si avvicina al punto morto. Anche in questo caso, comunque, la fasatura ottimale è chiaramente quella che comporta maggior beneficio per le prestazioni del motore.

La fase di scarico copre dunque un angolo di manovella notevolmente più ampio dei 180° relativi ad una corsa e questo perché la valvola di scarico, apertasi come detto con notevole anticipo rispetto al p.m.i., si chiude anche in ritardo (5+10°) rispetto al p.m.s. Quest'ultimo provvedimento consente di migliorare l'espulsione dei prodotti della combustione approfittando dell'inerzia della vena fluida avviata verso il condotto di scarico. Ci si avvantaggia così, in coda allo scarico forzato, di un fenomeno analogo a quello incentivato - per effetto opposto - in coda all'aspirazione e che suggerì la chiusura posticipata della valvola d'aspirazione.

Sta di fatto comunque che, all'atto della saldatura tra un "ciclo" e il successivo, con lo schema di distribuzione dianzi illustrato le valvole di aspirazione e di scarico restano entrambe parzialmente aperte per un certo arco di manovella (15+20° per fissare le idee) a causa dell'anticipo all'apertura della prima e del ritardo alla chiusura della seconda.

Siffatta programmazione della distribuzione viene chiamata *a diagramma incrociato* e si parla di *incrocio* delle valvole di aspirazione e di scarico nell'arco di contemporanea apertura. Atkinson e Kadenacy, il primo che pochi decenni or sono propose "l'incrocio" ed il secondo che ne manifestò l'utilità pratica, misero in luce l'effetto aspirante che la vena fluida convogliata allo scarico esercita a ri-

chiamo di quella che si sta formando all'aspirazione, con duplice beneficio: di ridurre le depressioni nel cilindro nel tratto iniziale della fase di aspirazione e di lavare la camera di compressione, mettere al limite a disposizione della nuova carica, non già la sola cilindrata V , bensì il maggior volume:

$$V_1 = V + V_2 = V \frac{r}{r-1} \quad (67)$$

Alla perplessità che nasce pensando alla possibilità di un mescolamento tra carica fresca e fumi nel periodo di incrocio risponde, negandola, l'ormai lunga esperienza sistematicamente condotta sui più disparati tipi di motori, la qual cosa appare anche logica pensando che per deviare la direzione di una vena fluida occorre un impulso nella fattispecie inesistente.

Per il motore 4t ad accensione per compressione si possono ripetere quasi tutte le considerazioni dianzi esposte. La figura 16b) ne mostra il diagramma polare con riferimento ad un motore diesel per veicoli industriali e giova ancora ed a maggior ragione avvertire che i valori delle angolazioni di fasatura sono soltanto orientative, dato che i motori diesel coprono una gamma di applicazioni (ciascuna enormemente diversificata per velocità e potenza) ben più vasta di quella dei motori ad accensione comandata. Nel diagramma è tracciato l'arco di iniezione, a cavaliere del p.m.s.; ovviamente, infatti, è opportuno che l'iniezione incominci con un certo anticipo rispetto al p.m.s.. Certamente conviene adeguare il periodo d'anticipo dell'iniezione al tempo di incubazione del combustibile, affinché la "esplosione" iniziale della combustione avvenga per quanto possibile in corrispondenza del p.m.s., relegando la rimanente parte della combustione al primo tratto della fase di espansione.

Nella figura 16a) è infine tracciato il diagramma polare della distribuzione reale per un motore diesel lento a 2 tempi. Poiché ci si riferisce ad una macchina con feritoie di lavaggio e valvola di scarico, nel quale lo stesso stantuffo provvede in parte alla distribuzione, il diagramma polare ne risulta vincolato per quanto attiene all'inizio dell'operazione di lavaggio.

A causa delle predette alterazioni della distribuzione e del fatto che gli otturatori, all'atto della chiusura e dell'apertura, laminano il fluido offrendo ad esso limitate sezioni di passaggio in progressiva diminuzione o in graduale aumento, il diagramma operativo del motore, inteso come diagramma della pressione del fluido nel cilindro in funzione dello spostamento dello stantuffo (o del volume della camera) si presenta privo di singolarità, a differenza di quello dei cicli idea-