UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI MODENA E REGGIO EMILIA

Dipartimento di Ingegneria "Enzo Ferrari"

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Meccanica

IMPIEGO DEI MOTORI STELLARI IN AERONAUTICA

Relatore:
Chiar.mo Prof. Ing. Giuseppe Cantore

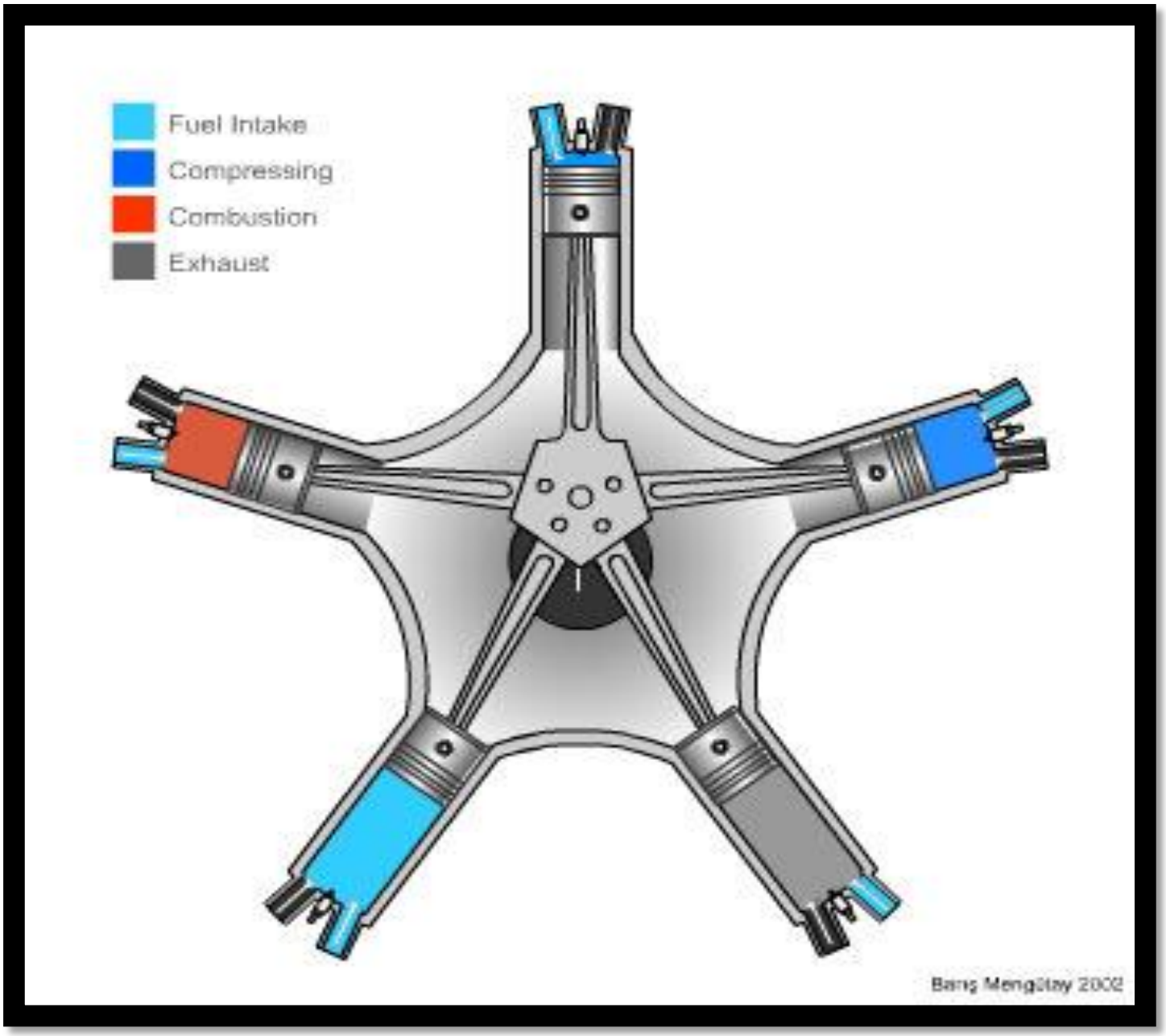
Tesi di laurea di:
Giovanni Tiramani

Anno Accademico 2015/2016

Ringraziamenti

Desidero, innanzitutto, ringraziare per la competenza e per la disponibilità esemplare il Professore Ing. Giuseppe Cantore.

Il mio ringraziamento è pure rivolto, per il valido supporto tecnico proveniente dalla documentazione dell'Archivio digitale "Reggiane" – Università di Modena e Reggio Emilia, in particolare al Sig. Riatti Adriano, che mi ha permesso di consultare i documenti relativi al Manuale uso manutenzione Motore Piaggio PXI RC 40 D – S 1938, il Manuale nomenclatore RE 2000 serie 0 e l'album fotografico Motori Stellari Reggiane 1940 ed al figlio Ing. Riatti Paolo che mi ha fornito preziosi suggerimenti.


Fuel Intake
Compressing
Combustion
Exhaust
Barış Mengüay 2002

INDICE GENERALE

Introduzione: Cenni storici 7

1. ***I motori stellari*** 10
   1.1 Uso aeronautico 10
   1.2 Uso automobilistico 12

2. ***Descrizione dei motori stellari*** 12
   2.1 Generalità 12
   2.2 Requisiti di un motore aeronautico a pistoni 13

3. ***Introduzione allo studio dei motori stellari*** 14
   3.1 Generalità 14
   3.2 Principio di funzionamento 16
   3.3 Il meccanismo biella-manovella 17
   3.4 Il cilindro 20
   3.5 La testata 22
   3.6 Il basamento 23
   3.7 Il pistone 23
   3.8 La biella 24
   3.9 L'albero motore 25
   3.10 La distribuzione 26

4. ***La sovralimentazione*** 29
   4.1 Generalità 29
   4.2 Il compressore volumetrico 30
   4.3 Il turbocompressore 31
   4.4 La pressione di alimentazione 32

4.5 Criteri di impiego della sovralimentazione 33
4.6 L'intercooler 34

5. ***La combustione*** 35
5.1 Generalità 35
5.2 Velocità di fiamma 35
5.3 Detonazione e preaccensione 36
5.4 La miscela aria carburante 38
5.5 I combustibili 38

6. ***La carburazione*** 39
6.1 Generalità 39
6.2 Il titolo della miscela 40

7. ***La lubrificazione*** 42
7.1 Generalità 42
7.2 Schema di funzionamento 42

8. ***Il raffreddamento*** 44
8.1 Generalità 44
8.2 Il raffreddamento ad aria 46

9. ***L'accensione*** 47
9.1 Generalità 47
9.2 La candela di accensione 48

10. **Motore radiale Piaggio P.XI RC 40** 49
Documentazione fotografica Reggiane OMI 58

Conclusioni 63
Bibliografia 66

INTRODUZIONE

Cenni storici

Il motore radiale, spesso chiamato anche motore stellare, è un motore a combustione interna nel quale i cilindri sono disposti secondo linee radiali, intorno all'albero motore. Esso può essere composto da una o più "stelle", da cui il nome che lo identifica, cioè da una o più serie, autonome, di cilindri. In questo caso si parlerà di motore a doppia, tripla o quadrupla stella. Era con questo tipo di motore che erano equipaggiati tutti i grandi velivoli da trasporto civile o militare con i quali si chiuse l'era del motore a pistoni in aviazione.

Il rapporto peso/potenza di questi motori era migliore di quelli di altri motori aeronautici, elemento che li rese attraenti agli occhi degli ingegneri aeronautici. I materiali utilizzati per la loro costruzione erano degli acciai al carbonio (basso e medio legati) legati con nichel, molto popolare a quei tempi.

Una delle prime applicazioni di questi motori fu il francese *"Gnôme"*, un motore da 50 CV che volò con successo nel 1909 (fig. 1.1). I pistoni giravano a 1200 rpm a pieno gas e furono introdotte delle alette sul cilindro, per aumentare la superficie di scambio termico e dissipare più calore. Le pareti del cilindro erano piuttosto sottili e la testa era parte integrante del cilindro, ottenendo una struttura pulita, semplice e leggera. Non essendovi alcun modo di incorporare circuiti di recupero dell'olio nel corpo motore, il sistema di lubrificazione era inevitabilmente del tipo a "perdita totale". Il raffreddamento era ad aria.

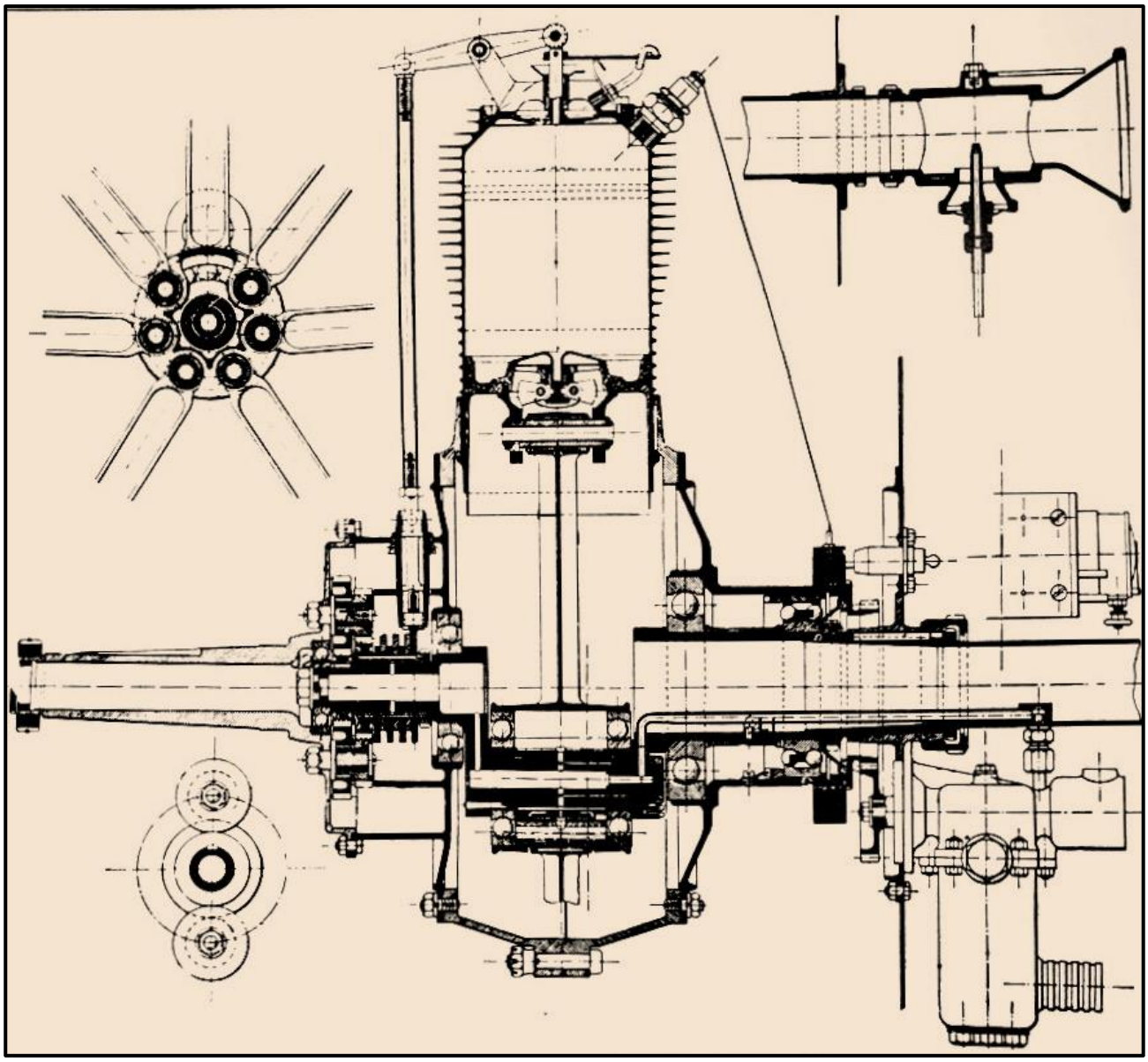


Fig.1.1 - Sezione longitudinale del motore "Gnome", primo rotativo aeronautico,1909

Alla fine del 1918, grazie ai progettisti militari britannici, comparve il *"Jupiter"*, un 9 cilindri stellare con 4 valvole per cilindro in acciaio alettato con cielo chiuso e testata di alluminio (475 CV); venne sviluppato con tenacia finchè finì per imporsi sul mercato : 17 ditte su 14 nazioni ne acquistarono la licenza di costruzione e tra di esse l'Alfa Romeo e la Piaggio (che però l'ebbe dalla licenziataria francese Gnôme-Rhôme).

Da qui iniziò la gloriosa storia del *P.XI*, che diventò il più famoso dei motori Piaggio, detentore di numerosi primati di quota e velocità e del quale tratteremo nella parte finale di questa tesi. In seguito alla sigla fu

aggiunta la lettera R per indicare che era fornito di riduttore e C di compressore; una cifra suggeriva la quota di ristabilimento della potenza in CV.

1. I motori stellari

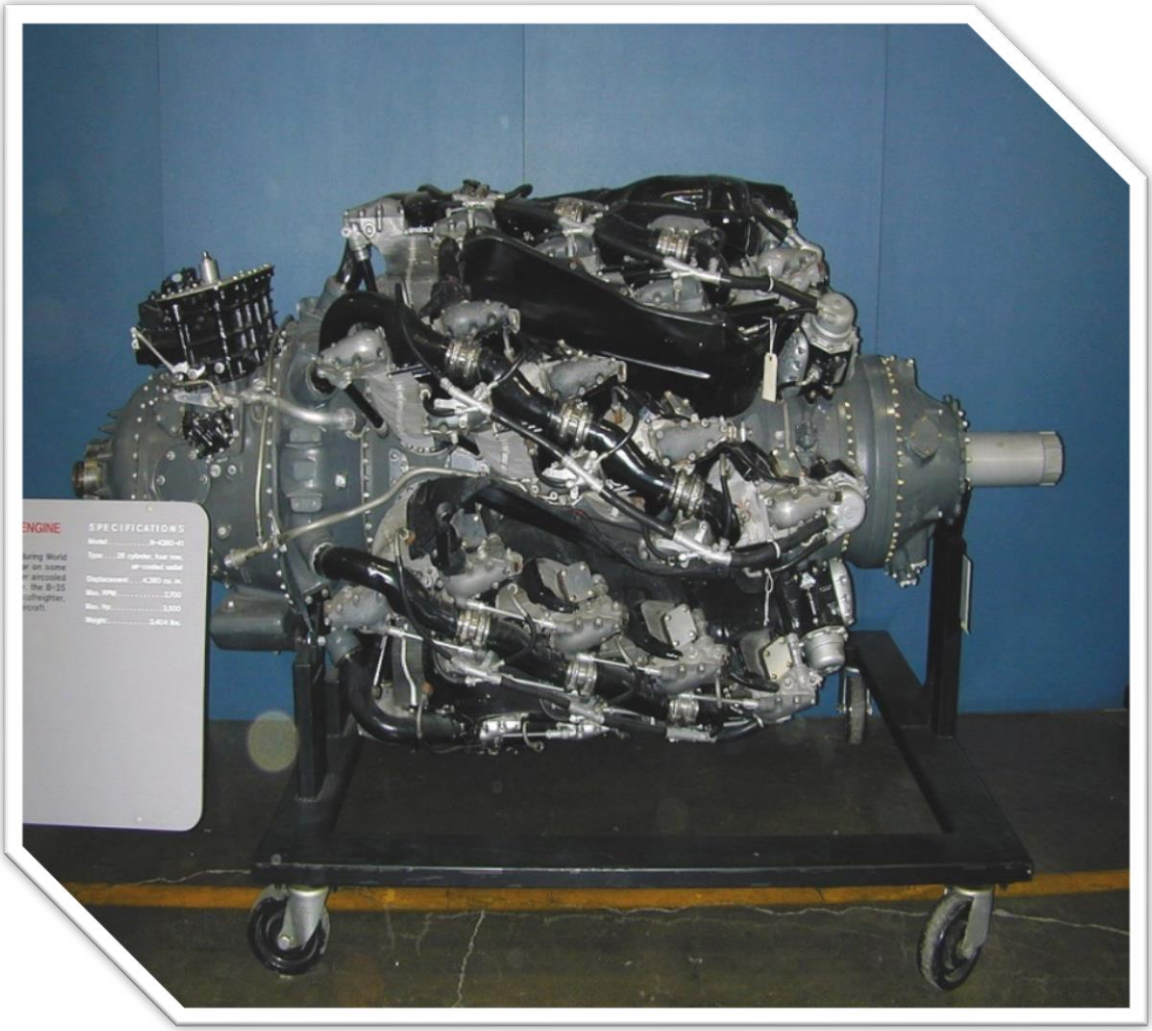
1.1 Uso aeronautico

I primi motori radiali (detti anche stellari) utilizzati dall'aviazione avevano tre cilindri a raggiera; più tardi diventarono cinque e poi sette sistemati a stella. Questi cilindri erano disposti radialmente in piano; al centro, in posizione perpendicolare c'era l'albero motore sul quale prolungamento si trovava l'asse dell'elica. Con il progredire della tecnica furono realizzati motori radiali dotati di turbocompressore o a doppia stella con due blocchi di cilindri accoppiati uno davanti all'altro, in grado di offrire una potenza davvero considerevole. Quasi tutti i motori radiali erano raffreddati ad aria anche se non mancarono riusciti esempi di raffreddamento a liquido. Il motore radiale, raffreddato ad aria tramite alette che, applicate a ciascun cilindro, disperdevano calore accumulato, era più pesante di quello refrigerato ad acqua, ma diventava più leggero se si teneva conto di tutti gli elementi accessori necessari al sistema liquido (refrigerante, radiatori, conduttore) che il motore radiale non aveva. La forma circolare e la collocazione frontale rendevano piuttosto complicata la carenatura del motore radiale. Nel periodo tra le due Guerre venne trovata la soluzione di dotare i motori di un anello che coinvolgesse l'aria per il raffreddamento della stella di cilindri (anelli Townend).
I mastodontici bombardieri apparsi alla fine della guerra avevano bisogno di una potenza straordinaria che esigeva motori di cilindrata sempre maggiore. Lo sviluppo tecnico divenne esasperato, tanto che si giunse a

realizzare motori radiali con ben quattro stelle di cilindri. A questo riguardo il vertice dello sviluppo fu raggiunto con lo statunitense Pratt & Whitney R-4360, un motore turbocompresso con 28 cilindri in quattro stelle da sette. Il motore, raffreddato ad aria, era in grado di erogare circa 4 000 CV e fu impiegato sui bombardieri B-50 e B-36. Oltre questo limite non fu possibile andare e i motori radiali furono ben presto sostituiti da quelli a reazione.

Vi furono anche alcuni limitati esempi di motori radiali diesel, ma malgrado i vantaggi di un minor consumo di carburante e una riduzione del rischio di incendio, non ebbero grande successo.

Un Pratt & Whitney R-4360 Wasp Major esposto presso il National Museum of USAF, Dayton, Ohio. Si notino le 4 stelle che fanno assumere al motore una curiosa configurazione a pannocchia.



1.2 Uso automobilistico

Uno dei rari esempi dato dall'uso automobilistico del motore radiale è dato dall'installazione in un'autovettura da competizione, la **Monaco-Trossi** del 1935, che fece la sua unica apparizione in pubblico durante le prove di qualificazione nel Gran Premio d'Italia disputato sull'Autodromo Nazionale di Monza. Grazie alla dotazione di due compressori, era capace di 250 CV a 6 000 giri/min, sufficienti per consentire alla vettura di raggiungere la ragguardevole velocità di 280 km/h. A causa della sua particolare conformazione, con una ripartizione di pesi che gravava per il 75% sull'asse anteriore, aveva un'estrema difficoltà di inserimento in curva ed in pratica i benefici apportati dalla motorizzazione non furono sufficienti a compensare la sua cronica mancanza di tenuta di strada. Pur nell'insuccesso sportivo, è una vettura che si è guadagnata un posto nella storia dell'automobilismo, tanto da essere conservata ed esposta al Museo dell'Automobile di Torino.

2. DESCRIZIONE MOTORE STELLARE

2.1 Generalità

I motori a stella sono classificati in motori radiali e motori rotativi: il motore radiale ha i cilindri disposti a stella, che sono solidali al basamento che a sua volta è solidale al velivolo, mentre l'elica è fissata all'albero motore; i motori rotativi, pur avendo la stessa struttura generale dei motori radiali, al contrario di questi presentano l'intero motore che ruota insieme all'elica, attorno all'albero motore che invece è fisso e solidale al velivolo. Questa rotazione dà luogo ad un effetto giroscopico che attenua fortemente le vibrazioni che ci sarebbero nei comuni motori a pistoni.

Il motore stellare è un motore a combustione interna nel quale i cilindri sono disposti secondo linee radiali, intorno all'albero motore. Il suo funzionamento è quello di un motore ciclo Otto a quattro tempi, come un normale motore dell'automobile, e del quale presenta gli stessi problemi costruttivi, con in più alcuni nuovi problemi che nascono dai nuovi requisiti posti dalle applicazioni aeronautiche. Questi tipi di motori di solito non richiedono trasmissioni in quanto funzionano per la maggior parte della loro vita a regime costante; devono piuttosto essere in grado di sviluppare elevate potenze per soddisfare le esigenze del decollo, della salita e, per i velivoli militari, di particolari manovre; naturalmente i motori aereonautici richiedono elevate doti di affidabilità, ben maggiori di quelle richieste al motore di automobile.

2.2 Requisiti di un motore aeronautico a pistoni

I cinquant'anni di ricerche inerenti alle migliorie di motori stellari per aeromobili (estese anche per tutti gli altri tipi di motori a combustione interna) che seguirono furono impiegati per sviluppare queste caratteristiche onde ottenere via via gli obiettivi che si presentavano come prioritari e cioè:

- Un migliore rapporto peso/potenza
- Una elevata potenza unitaria
- Potenza poco variabile con la quota di volo
- Una diminuzione della resistenza aerodinamica dovuta al motore
- Lo sfruttamento ottimo della potenza disponibile in tutte le condizioni di volo
- Una elevata affidabilità
- Un ridotto consumo di combustibile nell'evoluzione.

3. INTRODUZIONE ALLO STUDIO DEI MOTORI STELLARI

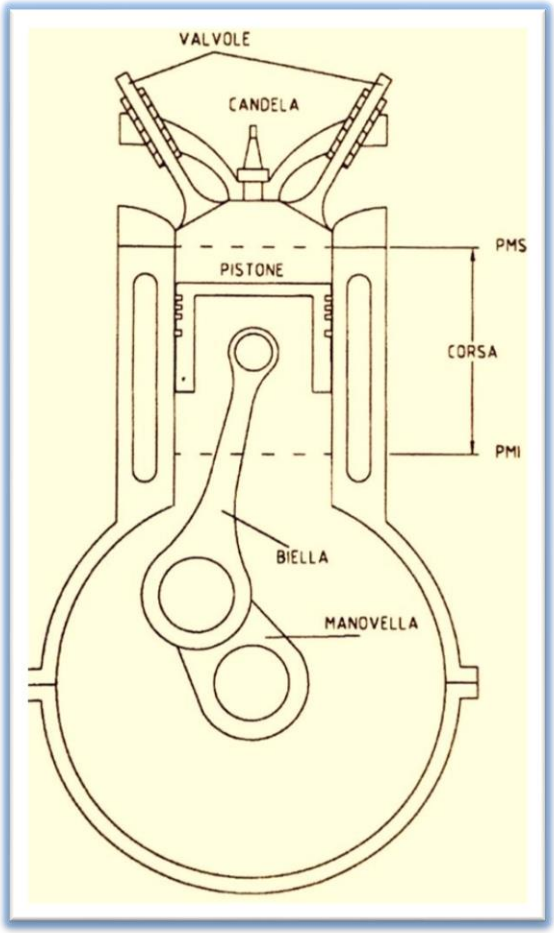


Fig. 3.1 - Sezione di un generico motore a pistoni

3.1 Generalità

Nonostante le evoluzioni tecniche e le possibilità oggi giorno esistenti, il motore a pistoni riveste ancora un ruolo fondamentale come propulsore aeronautico, almeno per quanto riguarda l'aviazione generale.

Il motore a pistoni è oggi universalmente diffuso per la generazione di potenza con particolare riguardo ai motori per autotrazione; dal punto di vista aeronautico, dopo lungo periodo che va dall'inizio del 900 alla fine della seconda guerra mondiale, il motore a pistoni ha rappresentato l'unico propulsore aeronautico.

Con riferimento alla sezione di fig.3.1, il motore a pistone è formato da un albero motore, una biella, un pistone che scorre all'interno del cilindro, una testata contenente le valvole e la candela: in pratica il pistone, scorrendo nel cilindro, muove l'albero motore mediante la biella e così produce potenza.

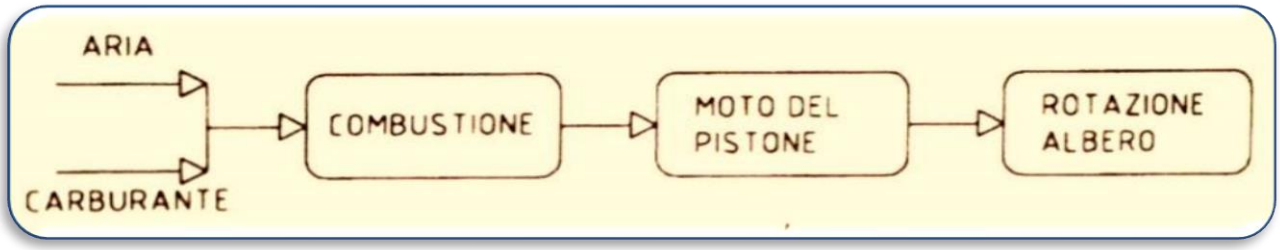


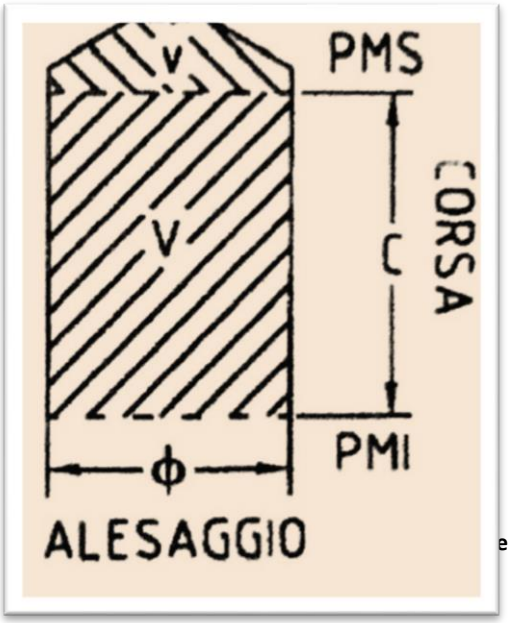
Fig.3.2 - Principio di funzionamento di un motore a pistoni

In linea di principio il processo avviene secondo lo schema mostrato in fig.3.2: l'aria ed il combustibile, opportunamente dosati, danno luogo ad

una reazione di combustione, a seguito della quale il pistone viene messo in movimento e, mediante il meccanismo biella manovella, causa la rotazione dell'albero motore. Da un punto di vista energetico, il motore a

Fig.3.3 - Conversioni di energia in un motore a pistoni

pistoni funziona secondo lo schema riportato in fig.3.3: l'energia chimica contenuta nel carburante viene, mediante una reazione di combustione, trasformata in energia di pressione e termica; tramite il pistone, la biella e la manovella, tale energia viene trasformata in energia meccanica disponibile all'albero motore.



Questi schemi sono assai generali, in realtà ben più complicato è un motore a pistoni. Si vede infatti che occorrono delle luci di aspirazione e di scarico, la cui apertura è comandata da apposite valvole, a loro volta mosse dal sistema di distribuzione. Dal punto di vista cinematico il pistone si muove di moto alternativo, dal punto morto superiore o PMS, al punto morto inferiore o PMI; la distanza tra questi due punti è detta corsa, mentre il diametro del pistone è detto anche alesaggio ed è indicato in genere con $\emptyset$; la cilindrata unitaria di un motore a pistoni è data dal volume V spazzato dal pistone durante una sua corsa

$$V = \frac{\pi \emptyset^2}{4}$$

In fig. 3.4 sono stati indicati con V la cilindrata unitaria e con v il volume della sola camera di combustione; si definisce rapporto volumetrico di compressione, il rapporto

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

ovvero il rapporto tra il volume a disposizione del fluido di lavoro quando il pistone è al PMI ed il volume a disposizione quando il pistone al PMS; come si vedrà in seguito, il rapporto di compressione rappresenta uno dei parametri geometrici più importanti di un motore a pistone.

3.2 Principio di funzionamento

Il principio di funzionamento di un motore a quattro tempi si può introdurre mediante l'esposizione del ciclo operativo dei quattro tempi, cioè la successione delle operazioni, o fasi, che il fluido di lavoro compie nel cilindro e ripete periodicamente.

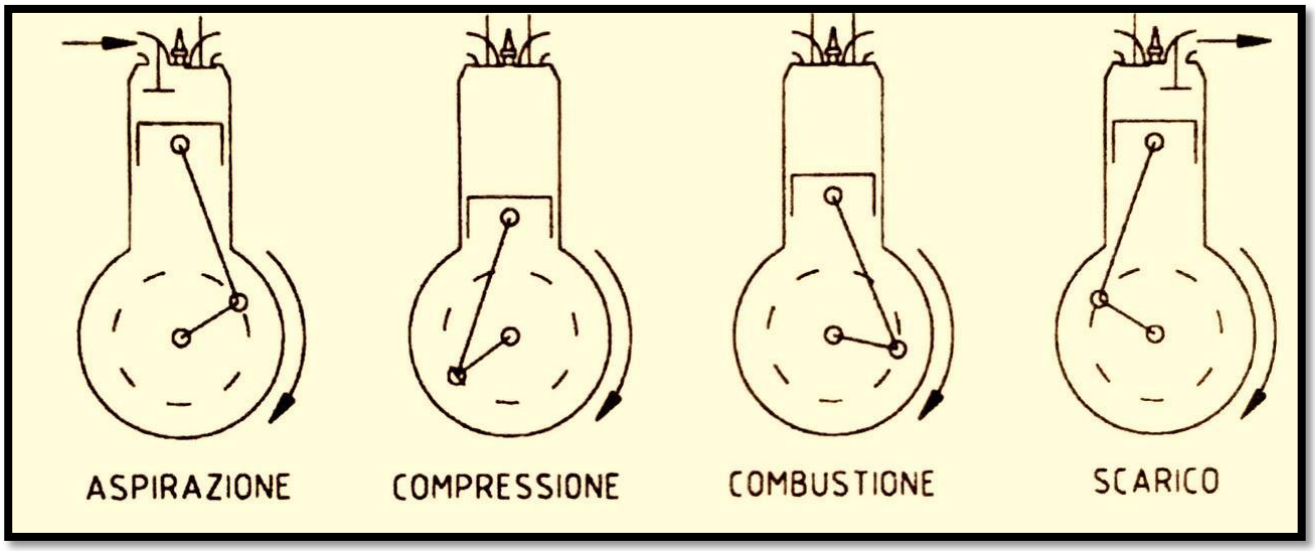


Fig. 3.5 - Le quattro fasi del motore a pistoni a quattro tempi

Il ciclo è a quattro tempi in quanto esso stesso si compie mediante quattro corse del pistone, ovvero ogni due giri dell'albero motore.

Le quattro fasi prendono i seguenti nomi (fig.3.5) :

- aspirazione o immissione
- compressione
- combustione, o scoppio, ed espansione
- scarico dei residui di combustione.

Aspirazione

Durante la corsa del pistone dal PMS al PMI si crea una depressione nel cilindro ,in quanto il volume interno aumenta: così, tenendo aperta la valvola di aspirazione e chiusa quella di scarico, durante questa fase si aspira dall'esterno la miscela composta da aria e combustibile. Quando l'aspirazione è completata, ovvero quando il pistone ha raggiunto il PMI, si chiude la relativa valvola.

Compressione

Durante la corsa del pistone dal PMI al PMS, con entrambe le valvole chiuse, la miscela introdotta nel cilindro durante la fase di aspirazione viene compressa nella camera di combustione: alla fine di questa fase si avrà un gas ad elevata pressione, il quale è a condizioni ottimali per l'innesco della combustione.

Combustione ed espansione

Alla fine della compressione avviene la combustione, causata dalla scintilla generata dalla candela: così, durante la combustione la pressione aumenta in modo notevole e, conseguentemente, il pistone viene spinto dal PMS al PMI: è evidente che questa fase di espansione rappresenta la vera e propria fase utile del ciclo a quattro tempi.

Scarico

Durante la fase di scarico, cioè quando il pistone si muove dal PMI al PMS, la valvola di scarico è aperta ed il gas residuo della combustione viene spinto fuori dal moto stesso del pistone. Alla fine di questa fase, quando cioè il pistone ha raggiunto il PMS, la valvola di scarico si chiude, così che può iniziare una nuova fase di aspirazione e quindi un nuovo ciclo.

3.3 Il meccanismo biella – manovella

Il meccanismo composto da biella e manovella trasforma il moto rettilineo alternativo del pistone in moto di rotazione dell'albero motore.

In particolare, il piede di biella si muove come il pistone, cioè di moto rettilineo, mentre la testa di biella si muove come la manovella, cioè di

moto rotatorio. Pertanto, il moto assoluto della biella è composto da un moto alternato, analogo al pistone, più un moto oscillatorio attorno al piede di biella.

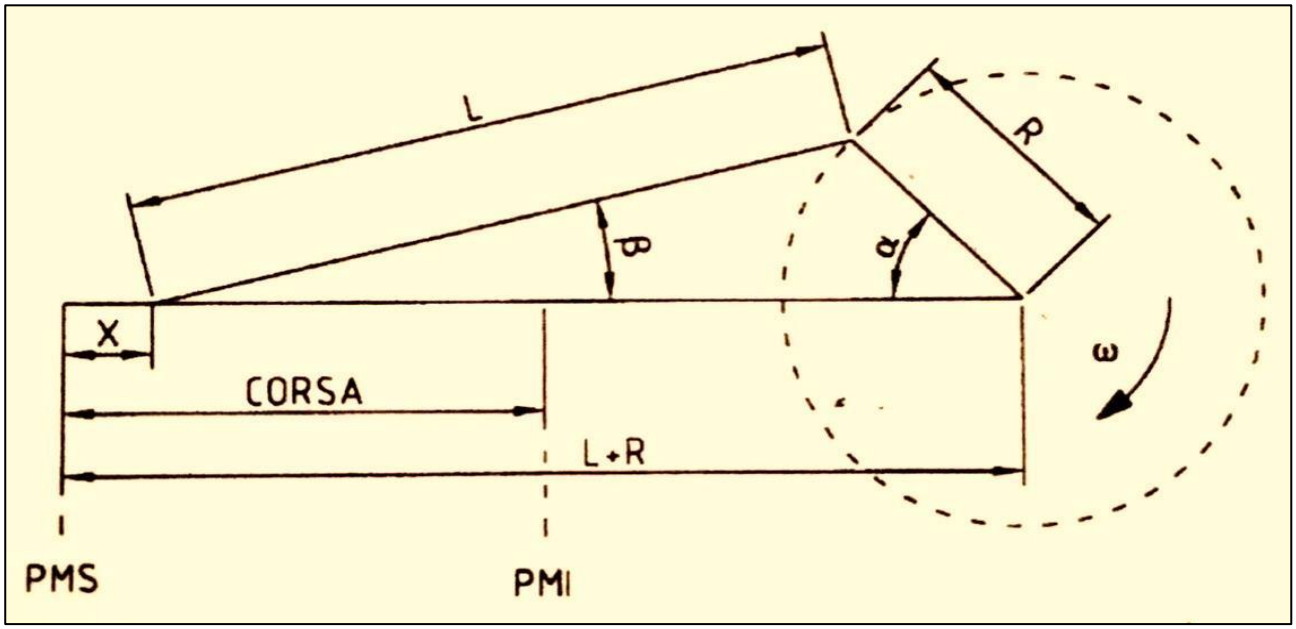


Fig.3.6 - Parametri geometrici del meccanismo biella-manovella

Dalla fig. 3.6 si può ricavare un'espressione dello spostamento del pistone, indicato con x, in funzione dell'angolo di manovella α ; con L si indica la lunghezza della biella, mentre con R si indica il raggio di manovella, che poi è, in lunghezza, pari alla metà della corsa.

Per lo spostamento si ottiene l'espressione

$$x = L + R - (L \cos\beta + R \cos\alpha)$$

dalla quale si ottiene subito

$$X = R(1 - \cos\alpha) + L(1 - cos\beta)$$

Si è così giunti ad esprimere x in funzione degli angoli α e β: ma gli angoli α e β non sono indipendenti tra loro, ma sono legati da una relazione; infatti si verifica subito che risulta

$$R \text{ sen } \alpha = L \text{ sen } \beta$$

dalla quale si ottiene

$$\text{sen } \beta = \lambda \, sen \, \alpha$$

avendo posto

$$\lambda = \frac{R}{L}$$

In altre parole, λ rappresenta il rapporto tra il raggio di manovella e la lunghezza della biella: nei motori aeronautici i valori di λ oscillano tra 0,28 e 0,32:

$$0{,}28 \leq \lambda \leq 0{,}32$$

E questo rapporto λ può essere anche visto come l'indice dell'inclinazione massima della biella: infatti per $\alpha = \pi/2$ si ottiene

$$\text{sen}\,\beta = \lambda$$

Tenendo presente che dalla trigonometria si ha che

$$\cos\beta = \sqrt{1 - sen^2\,\beta}$$

e che in questo caso si ottiene

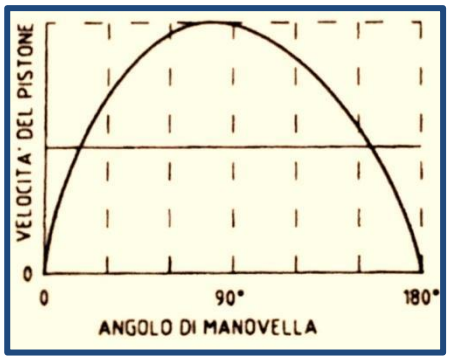


Fig.3.7 - Velocità del pistone in funzione dell'angolo di manovella

$$\cos\beta = \sqrt{1 - \lambda^2\,sen^2\beta}$$

sostituendo la precedente nella espressione di x prima trovata, si ottiene

$$\underline{x = R(1 - \cos\alpha) + L\left(1 - \sqrt{1 - \lambda^2\,sen^2\,\alpha}\right)}$$

che rappresenta la cercata legge dello spostamento del pistone rispetto all'angolo di manovella α.

Da quanto esposto sopra, si deduce che la velocità del pistone non è uniforme. In particolare, la velocità sarà nulla ai punti morti, dove il pistone inverte il suo movimento.

La velocità del pistone è

$$\underline{V = \omega R sen\alpha\,(1 + \lambda\cos\alpha)}$$

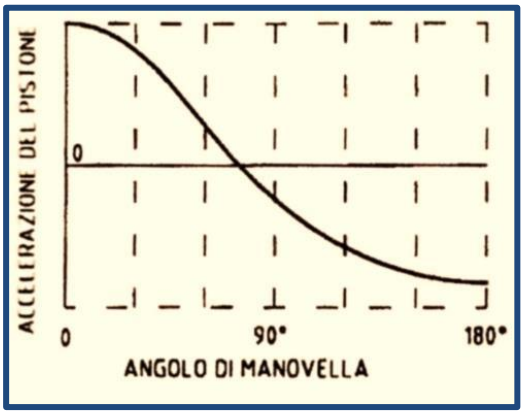


Fig.3.8- Accelerazione del pistone in funzione dell'angolo di manovella

In fig. 3.7 è mostrato l'andamento della velocità in funzione dell'angolo di manovella: coerentemente con quanto detto prima, la velocità massima si raggiunge durante la prima metà della corsa del pistone.

Mentre l'accelerazione in funzione dell'angolo di manovella (fig.3.8) è:

$$a = \omega^2 R\,(\cos\alpha + \lambda\cos 2\alpha)$$

Come si vede, l'accelerazione assume valori massimi quando la velocità è nulla, cioè in corrispondenza dei due punti morti, mentre si annulla quando è massima la velocità.

3.4 Il cilindro

Il cilindro costituisce la guida entro la quale scorre il pistone, nonché la zona all'interno della quale si espande il gas e avviene la trasformazione termodinamica che permette lo sviluppo della potenza.

Un cilindro deve possedere molteplici qualità, fra le quali:

- sufficiente robustezza, tale da resistere alle elevate pressioni sviluppate all'interno;
- buona conduzione del calore, tale da consentire un efficiente raffreddamento a seguito delle elevate temperature di esercizio;
- accettabile leggerezza dei materiali costituenti, tale da ottenere un motore il più leggero possibile;
- semplicità di costituzione, per agevolare la costruzione, la manutenzione e l'ispezione.

Il tipo di raffreddamento del motore influenza moltissimo la costituzione dei cilindri; i motori raffreddati ad aria utilizzano cilindri separati, dotati esternamente di alettature che favoriscono in raffreddamento (fig.3.9); i motori raffreddati a liquido, invece, in genere utilizzano i cilindri raggruppati in un unico blocco cilindri, o monoblocco; i vantaggi della costruzione a monoblocco rispetto a quella a cilindri separati sono :

- diminuzione della lunghezza del motore
- aumento della rigidezza del motore
- minori costi di produzione.

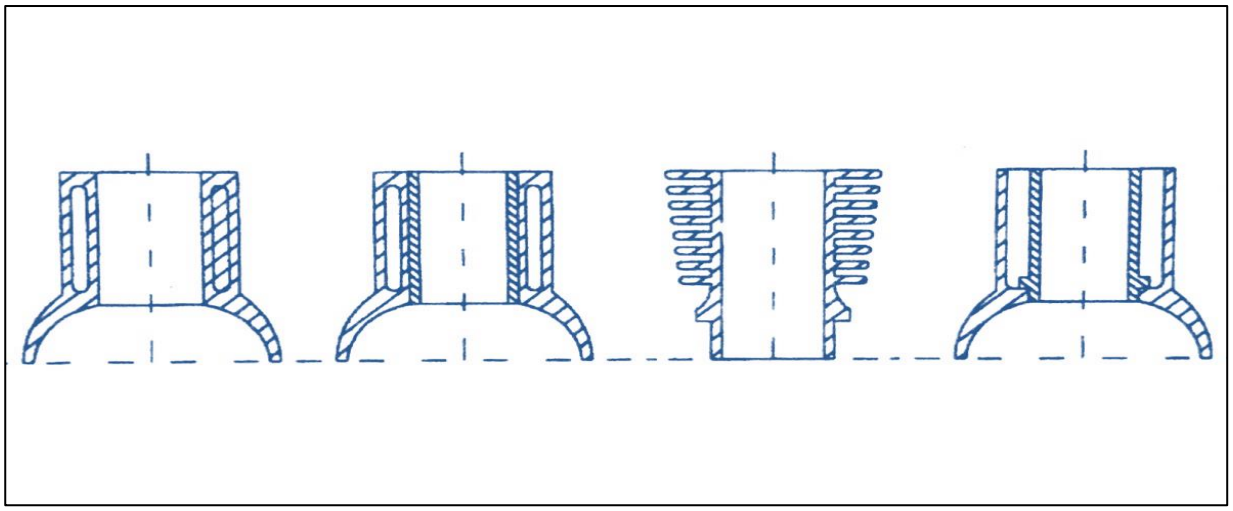


Fig. 3.9 - Cilindri con canne integrali e canne riportate

Il materiale costituente il cilindro deve essere di grande durezza superficiale ed elevata resistenza all'usura, che può essere causata dallo scorrimento del pistone; attualmente si utilizzano la ghisa e l'acciaio, in particolare le canne di cilindri monoblocco sono realizzate in ghisa mentre i cilindri raffreddati ad aria sono realizzati in acciaio.

I motori a stella hanno sempre un numero di cilindri dispari, in genere da cinque a nove cilindri, e sono raffreddati ad aria; nel caso di motori a più stelle i cilindri delle varie stelle possono essere allineati o sfalsati per favorirne il raffreddamento.

Il motore stellare è formato sempre e comunque da un numero dispari di cilindri al fine di avere una componente di spinta da parte delle bielle sul collo della manovella sempre positiva, determinando un momento motore sempre attivo e garantendo quindi la fluidità di funzionamento. Se ipotizziamo di avere un motore con sette cilindri, al primo giro si accendono i cilindri 1-3-5-7 e al secondo giro i cilindri 2-4-6; al terzo giro avremo ancora 1-3-5-7. Quindi, con un numero di cilindri dispari si può fare in modo di avere le accensioni sempre "un cilindro sì e uno no", mantenendo una maggiore regolarità del moto. Se non si spartissero le accensioni tra il primo e il secondo giro, ma avvenissero solo, per esempio nel primo giro, poiché ogni cilindro impiega due giri a compiere l'intero suo ciclo, nel giro successivo non avremmo alcuna accensione e quindi l'elica avrebbe un giro in cui spingono tutti i pistoni in sequenza ed un giro senza alcuna spinta, con conseguenze pessime per la propulsione del velivolo.

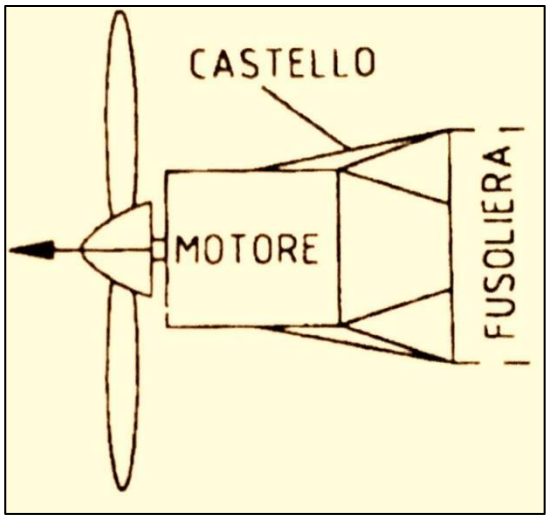


Fig.3.10 - Spinta generata dall'elica trasmessa tramite il basamento

3.5 La testata

La testata costituisce la parte superiore del cilindro, ed all'interno di questa è ricavata la camera di combustione; nella testata sono alloggiate le valvole ed il meccanismo di distribuzione (tutto o parte), sono ricavate le luci di aspirazione e di scarico, nonché gli alloggiamenti delle candele.

A seconda delle soluzioni costruttive adottate, si possono avere testate in un solo blocco fuso per monoblocchi, oppure testate singole per ciascun cilindro. L'unione tra testa e cilindro deve avvenire mediante bulloni disposti in modo da assicurare la tenuta ed impedire le deformazioni indotte dal calore. Tra cilindro e testa è interposta in genere una guarnizione realizzata in lamiera di rame e d' acciaio, a volte ricoperta da speciali vernici.

I materiali utilizzati per la costruzione delle testate sono l'alluminio e, più raramente la ghisa. Il disegno della testata è influenzato da diversi fattori: il tipo di distribuzione (albero a camme in testa, aste e bilancieri, ecc.), il numero e disposizione delle valvole e delle candele, il tipo di raffreddamento adottato.

In particolare la forma della camera di combustione e la posizione della candela hanno una notevole influenza sul processo di combustione e quindi sul rendimento del motore. Anzi, si può senz'altro dire che il numero e la disposizione delle valvole è subordinato alla scelta del tipo di camera di combustione, in modo da conseguire una combustione ottimale.

3.6 Il basamento

Nei motori a pistoni il basamento, o carter, rappresenta il vero e proprio telaio del motore: infatti, tramite i cuscinetti supporta l'albero motore, blocca e mantiene allineati i cilindri dei pistoni, collega tra loro i vari gruppi meccanici e racchiude al suo interno l'olio lubrificante.

Inoltre il basamento porta esternamente gli attacchi per il fissaggio del motore alle strutture di sostegno: deve, perciò, sopportare, oltre ai carichi interni generati dal manovellismo, anche i carichi esterni come la spinta dell'elica: infatti la spinta generata dall'elica è trasmessa alla struttura del velivolo tramite il basamento (fig.3.10). Mentre per i motori automobilistici il basamento è realizzato in ghisa o in lega di alluminio, per i motori aeronautici i basamenti sono realizzati per fusione di leghe di alluminio o electron, oppure in acciaio e, per motori stellari, in duralluminio fucinato.

3.7 Il pistone

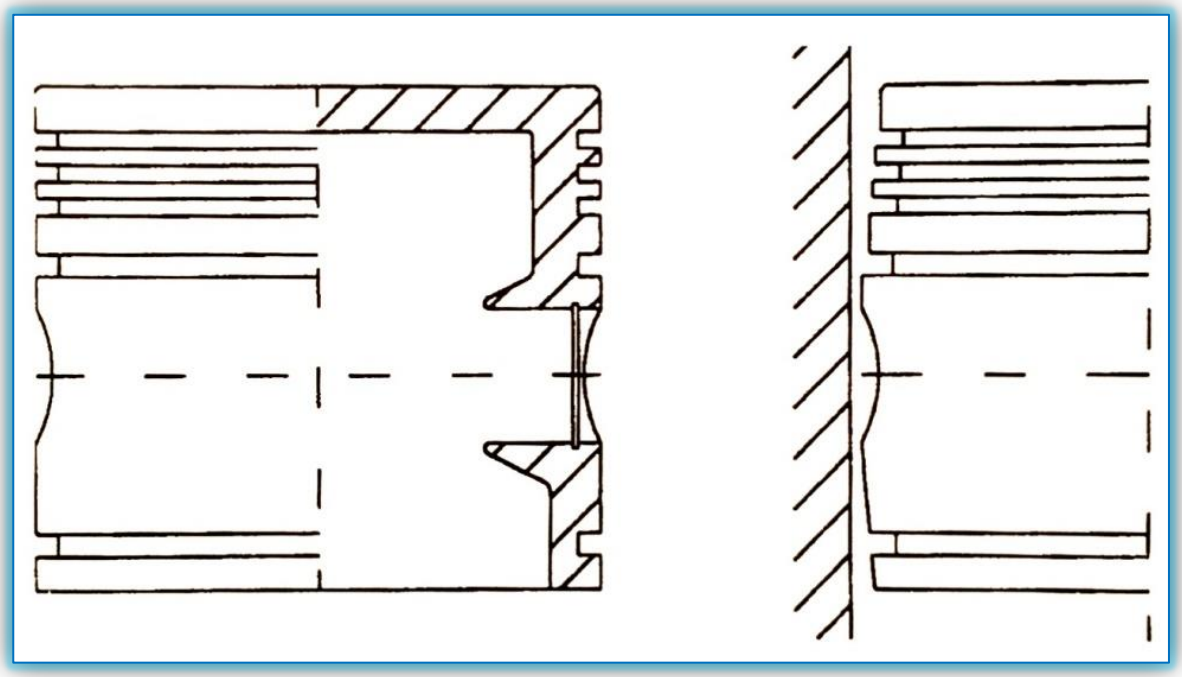


Fig. 3.11 - Schema di un pistone e del collegamento al suo cilindro

Il pistone o stantuffo (fig.3.11) è l'organo che trasmette all'albero motore, mediante la biella, la spinta esercitata dai gas ad elevata pressione all'interno della camera di combustione; avente la forma di un bicchiere rovesciato, porta a circa metà dell'altezza i fori di alloggiamento dello spinotto con il quale è collegato al piede di biella.

Viene di solito realizzato in leghe di alluminio, che devono favorire lo smaltimento del calore e consentire naturalmente la massima leggerezza; per questo motivo i pistoni per aeromobili hanno altezza minore del diametro.

La parte superiore del pistone, detta anche testa o cielo, è normalmente piana ma esistono anche pistoni con testa concava o convessa, a seconda delle necessità dettate dalla realizzazione della camera d combustione.

La tenuta del pistone con il relativo cilindro è assicurata dalle fasce elastiche, dette anche anelli oppure segmenti, che sono alloggiate in apposite scanalature ricavate sul mantello del pistone; oltre alle fasce di tenuta sono usate anche le fasce raschiaolio, di solito alloggiate sotto alla fascia di tenuta, che hanno la funzione di raccogliere l'eccesso di olio lubrificante sul cilindro.

Infine, l'organo che assicura il collegamento tra pistone e biella è lo spinotto, elemento costituito in acciaio cementato, temperato e rettificato: ha il maggiore diametro possibile per poter ripartire adeguatamente i carichi a cui è sottoposto ed è internamente cavo per conseguire la massima leggerezza.

3.8 La biella

La biella collega tra loro il pistone e l' albero motore, trasmettendo a quest'ultimo i carichi raccolti dal pistone, e trasformando così il moto alternativo del pistone in moto rotatorio dell'albero motore (fig. 3.12): in particolare la parte collegata ala pistone è detta piede di biella, mentre la parte collegata all'albero motore è detta testa e la parte centrale è il fusto.

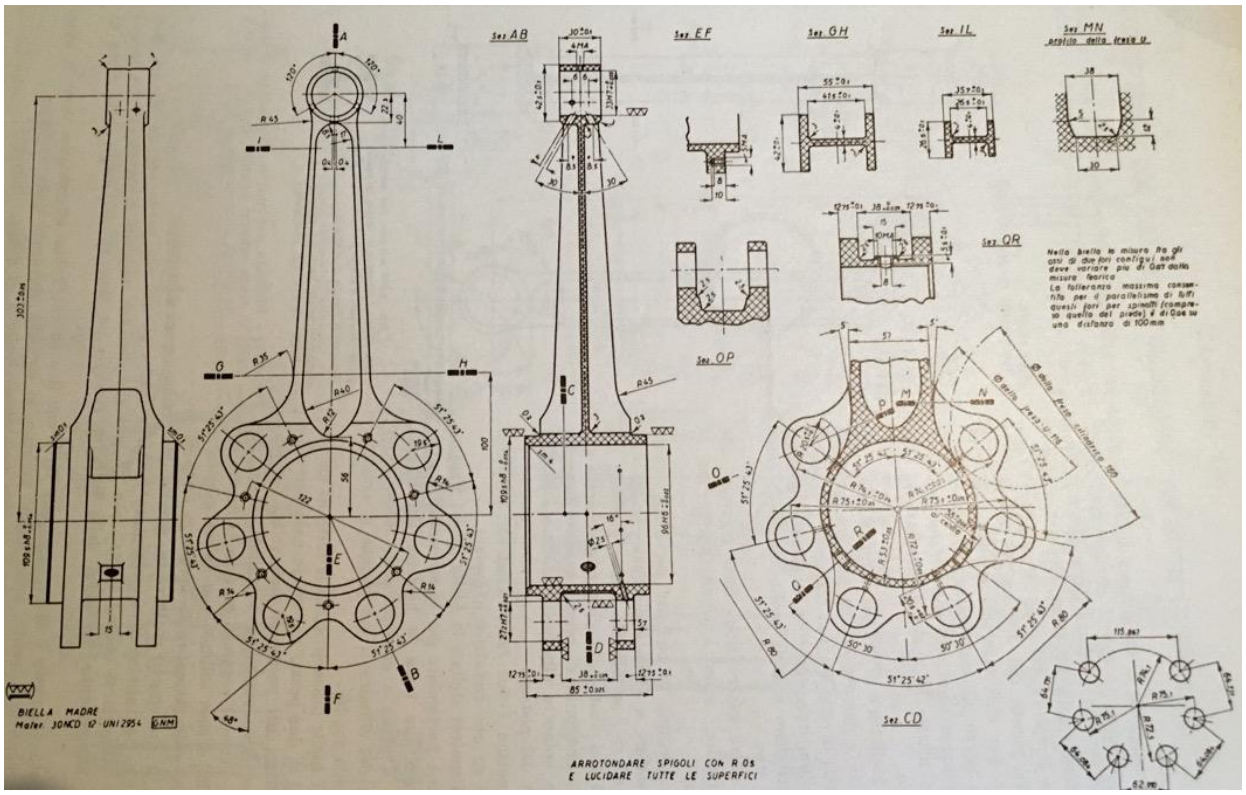


Fig.3.12 - Biella madre per motore d'aviazione dia. 146, c = 165

La biella è un elemento strutturale che, come al solito, deve garantire contemporaneamente un'elevata robustezza e un basso peso: per questo motivo in genere il fusto viene realizzato con una sezione a doppio T; comunemente le bielle si realizzano in leghe d'acciaio ad alta resistenza, anche se non mancano esempi di bielle in leghe di alluminio stampato.

In un motore radiale, invece, i pistoni sono connessi all'albero motore con un sistema particolare: un solo pistone è connesso direttamente all'albero motore attraverso una biella di grandi dimensioni detta biella madre, mentre gli altri pistoni sono connessi alla biella madre attraverso delle biellette. Anche se tale collegamento può essere inteso come meccanicamente scorretto (per via del differente centro di rotazione della biella madre rispetto alle biellette), il calo di rendimento derivante può intendersi come limitato.

3.9 L'albero motore

L'albero motore è l'organo che riceve il lavoro dall'insieme biella manovella, provvedendo all'azionamento dell'elica, degli organi della distribuzione, del raffreddamento, della lubrificazione e di tutti gli accessori necessari per il funzionamento del motore stesso (generatore

elettrico, pompa del carburante, ecc.); l'albero motore può assumere diverse forme, a seconda del tipo di motore. (Vedasi figura sotto riportata).

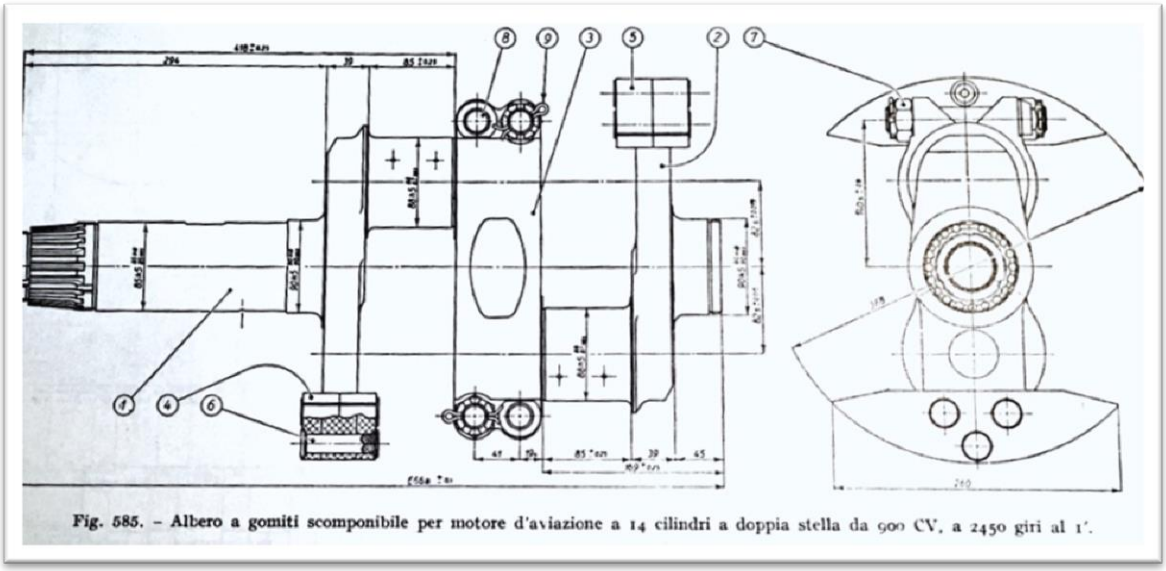


Fig.3.13 - Albero per motore stellare a doppia stella

Generalmente realizzato mediante leghe di acciaio al nichel cromo molibdeno, l'albero motore deve essere accuratamente lavorato in ogni sua parte, per eliminare ogni spigolo vivo che può rappresentare il punto di innesco di cricche dovute alla fatica; deve inoltre essere forato internamente per permettere il passaggio del lubrificante .

Nei motori a stella semplice l'albero ha una sola manovella, alla quale si collega il biellismo composto dalla biella madre e da tante biellette quanti sono i pistoni, e l'albero stesso è in genere costruito in due parti unite mediante bulloni e dotato di contrappesi; nei motori a stella multipla (fig.3.13) si hanno tante manovelle quante sono le stelle.

3.10 La distribuzione

La distribuzione è un insieme di organi che hanno lo scopo di assicurare l'alimentazione della miscela aria combustibile ai cilindri e la successiva evacuazione dei gas combusti. Pertanto la distribuzione deve regolare accuratamente l'apertura e la chiusura delle luci di aspirazione e di scarico. I principali organi della distribuzione sono:

- l'albero a camme
- i bilancieri e le eventuali aste con punterie
- le valvole e le relative molle.

A seconda dei criteri costruttivi, l'albero (o gli alberi) a camme può essere collocato nel basamento oppure nella testata: comunque, esso prende il moto dall'albero motore. Così si avranno alberi a camme comandati da ingranaggi, catene, cinghie dentate: in ogni modo la velocità di rotazione dell'albero a camme deve essere la metà di quella dell'albero motore, in modo tale che per ogni ciclo completo, per il quale occorrono due giri

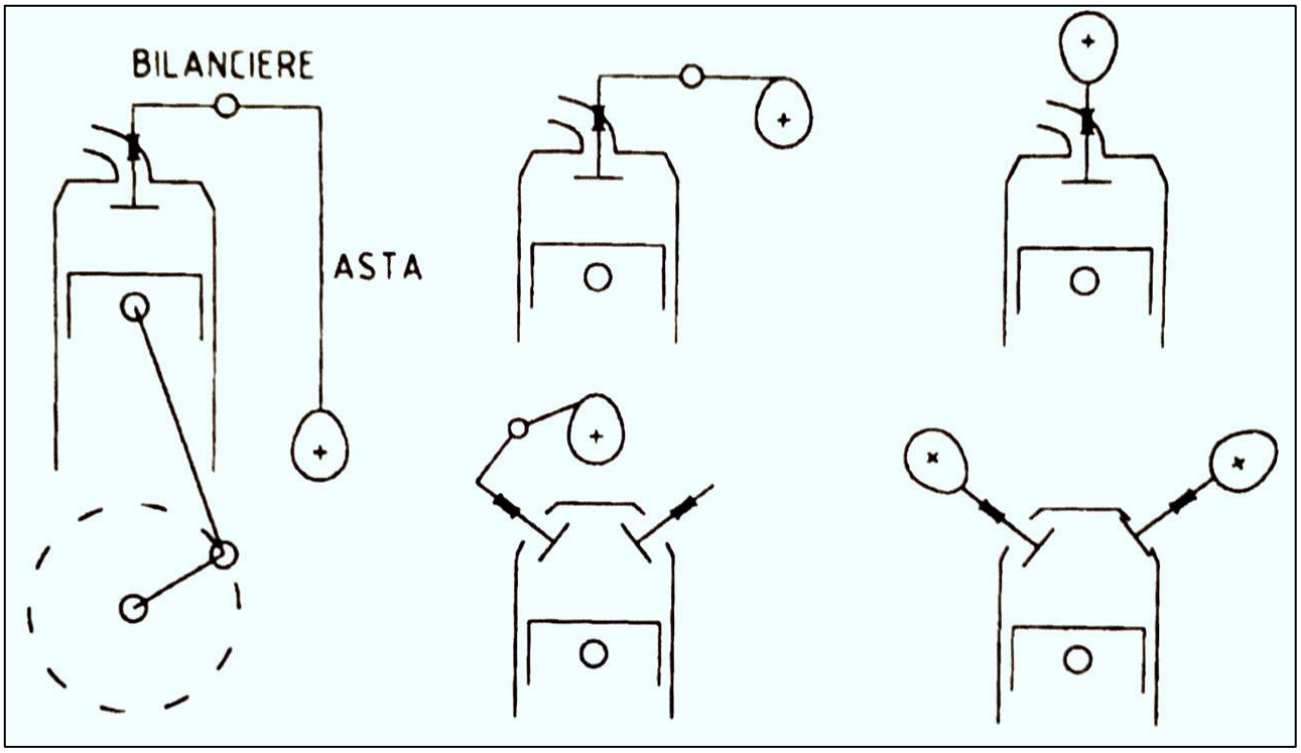


Fig.3.14 - Schemi di disposizione degli organi della distribuzione

dell'albero motore, l'albero a camme compia un giro.

In fig.3.14 sono rappresentati i tipici schemi di disposizione degli organi della distribuzione. L'albero a camme, o albero degli eccentrici, è un organo sul quale sono ricavate le camme o eccentrici, in genere una per

ogni valvola, le quali ruotando insieme all'albero stesso comandano l'apertura e la chiusura delle valvole: in genere viene realizzato in acciaio a basso tenore di carbonio, fucinato e cementato in corrispondenza degli eccentrici per aumentarne la durezza superficiale.

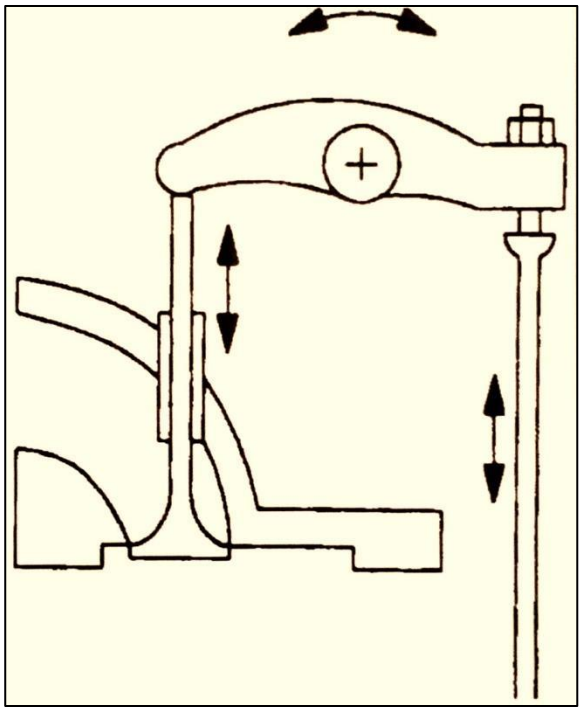


Fig. 3.15. - Distribuzione con sistema ad asse e bilancieri

Una soluzione particolare è quella utilizzata nei motori stellari: qui tutte le valvole di aspirazione, mediante aste e bilancieri, sono comandate da un unico anello il cui profilo esterno forma la serie degli eccentrici, mentre un altro anello comanda le valvole di scarico.

Come detto, il comando di apertura e chiusura delle valvole può essere trasmesso mediante aste e bilancieri: in pratica gli eccentrici

causano un moto alternativo all'asta la quale lo trasmette al bilanciere: questo, ruotando attorno al fulcro trasmette il moto alla relativa valvola, come si vede dalla fig.3.15. Ciascun bilanciere è dotato di vite di registrazione per la regolazione del gioco delle valvole.

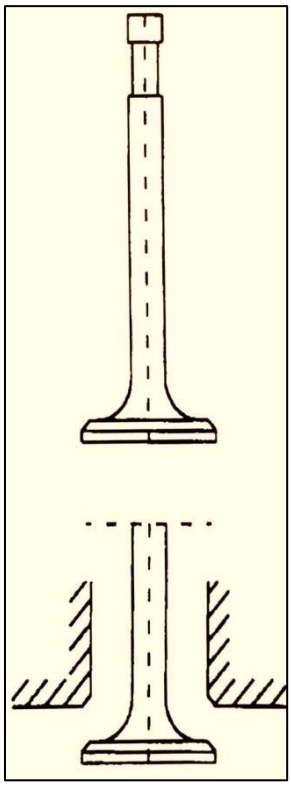


Fig. 3.16 - Valvola e relativa sezione di passaggio

Le valvole sono gli elementi che aprono e chiudono a perfetta tenuta le luci di aspirazione e di scarico: esse si aprono verso l'interno del cilindro , in relazione al diametro della testa e dell'alzata, determinano la sezione di passaggio dei gas (fig.3.16). Le valvole sono costruite in acciaio speciale e devono subire particolari trattamenti termici di indurimento; all'aumentare della sezione delle luci, per evitare di costruire valvole troppo grandi e quindi troppo pesanti, si possono utilizzare più valvole sia per l'aspirazione che per lo scarico.

Ogni valvola è trattenuta in sede da una o più molle, che devono essere costruite in acciaio speciale e devono offrire una determinata tensione per assicurare la tenuta della chiusura delle valvole.

4. LA SOVRALIMENTAZIONE

4.1 Generalità

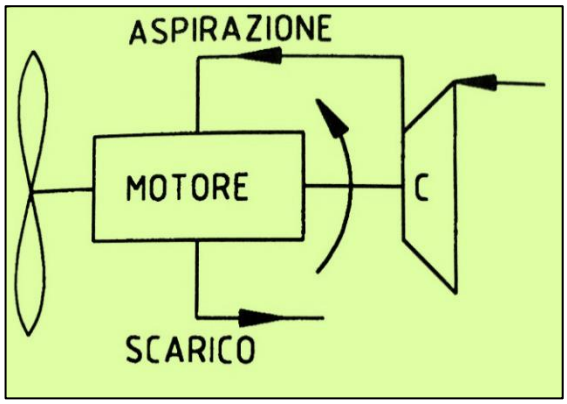


Fig.4.1 - Compressore comandato meccanicamente

Come già detto in precedenza, con l'aumento della quota di volo diminuisce la potenza erogata dal motore a causa della diminuzione della densità dell'aria: in pratica occorre quindi limitare questo fenomeno per potere ottenere delle quote di volo più elevate, in quanto inoltre con l'aumento della quota aumenta pure la potenza necessaria. La sovralimentazione è un sistema che utilizza un compressore e contrasta la naturale diminuzione della potenza erogata con la quota.

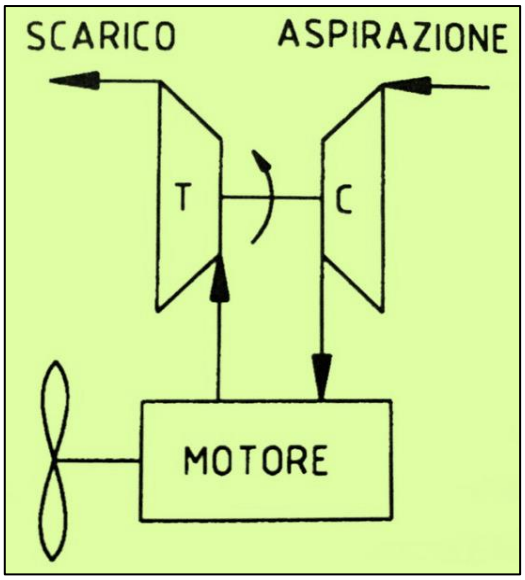


Fig. 4.2 - Compressore comandato mediante turbina a gas di scarico

I diversi sistemi di sovralimentazione possono essere classificati in base al tipo di forza motrice del compressore oppure al suo principio di funzionamento. Si hanno compressori a comando meccanico, fig.4.1, nei quali la forza motrice è fornita, mediante pulegge o ingranaggi, direttamente dall'albero motore; si hanno compressori comandati con turbina a gas di scarico (fig.4.2), quando il moto del compressore è fornito da una turbina che a sua volta è messa in funzione dai gas di scarico del motore. In termini di principio di funzionamento, si hanno compressori volumetrici o compressori centrifughi.

Un compressore a comando meccanico può essere sia di tipo volumetrico sia di tipo centrifugo, mentre il compressore comandato con turbina a gas di scarico è solamente di tipo centrifugo. In particolare, quando si

accoppia una turbina al compressore centrifugo si parla di turbocompressore. Nei propulsori aeronautici è pressochè universalmente utilizzato il turbocompressore, mentre nei propulsori automobilistici si usa questo tipo, oppure un compressore volumetrico comandato meccanicamente.

4.2 I compressori volumetrici

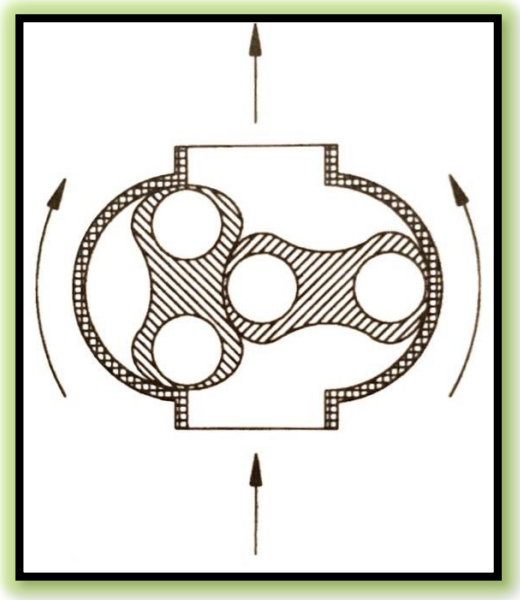


Fig. 4.3 - Compressore volumetrico a lobi di tipo Roots

I compressori volumetrici sono messi in rotazione direttamente dal motore: la presa del moto, normalmente, è realizzata con una serie di ingranaggi e, nei casi più semplici, mediante accoppiamento a cinghie. Solitamente, nella catena di ingranaggi tra l'albero motore e la ruota conduttrice del compressore, viene interposto un giunto elastico o addirittura un accoppiamento a frizione di tipo meccanico o idraulico, il quale slittando nelle fasi di accelerazione e decelerazione del motore, preserva gli organi di trasmissione e smorza le eventuali vibrazioni.

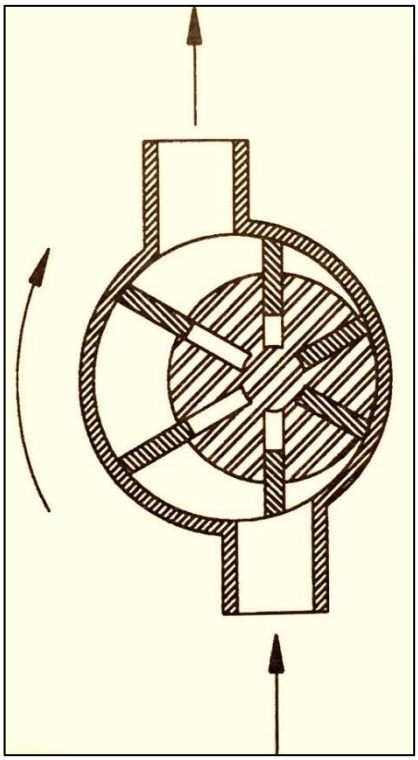


Fig.4.4 - Compressore volumetrico a palette

Uno dei compressori volumetrici più diffusi è del tipo a lobi Roots (fig.4.3):questo, nella sua realizzazione più semplice, è composto sostanzialmente da due rotori a due lobi ciascuno, collegati tra loro mediante ingranaggi, e rotanti alla medesima velocità ma in senso inverso. Nei casi in cui è richiesta una elevata uniformità di erogazione dell'aria compressa, i rotori possono assumere forma elicoidale ed essere realizzati in tre lobi.

I compressori volumetrici a palette, il cui schema è mostrato in fig. 4.4, permettono di raggiungere buoni rendimenti e accettabili rapporti di compressione, ma presentano di avere parti dotate di moto alterno e difficoltà di lubrificazione, essendo in definitiva delicati e di costo elevato.

4.3 Il turbocompressore

La potenza massima di un moderno motore per aeromobili si attesta oggigiorno sui circa 450 cavalli, e quando occorrono potenze unitarie maggiori, ci si rivolge in genere alle turbine a gas; la soluzione ideale per la sovralimentazione di questi motori è senz'altro il turbocompressore, un sistema nel quale il compressore, sempre centrifugo, viene comandato da una turbina azionata dai gas di scarico; una vista in sezione di un turbocompressore è riportata in fig.4.5. Questo sistema è particolarmente efficiente in quanto l'energia impiegata per azionarlo non viene sottratta al motore, ma è presa dall'energia dei gas di scarico, che andrebbe altrimenti perduta; inoltre, il turbocompressore presenta ingombri e pesi estremamente limitati.

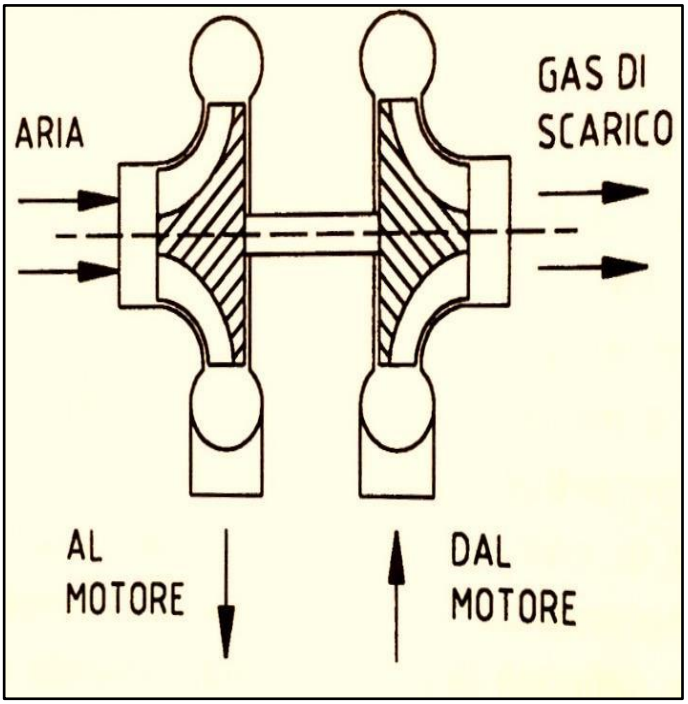


Fig. 4.5 - Vista in sezione di un turbocompressore azionato dai gas di scarico

L'aria viene prelevata dall'esterno e filtrata, quindi raggiunge il compressore, entro il quale viene aumentata la pressione, dopodichè viene inviata al motore; al termine del ciclo i gas di scarico vengono inviati

in turbina, la quale trasmette il moto direttamente al compressore, mediante un apposito albero.

Siccome la potenza erogata dal motore non deve superare i limiti imposti dal costruttore, si rende necessaria la regolazione dell'azione del compressore, in modo da mantenere la pressione di alimentazione entro i limiti consentiti: infatti, il lavoro richiesto al compressore è minimo alle basse quote ed aumenta al diminuire della densità dell'aria. Per effettuare la necessaria azione di regolazione, la portata dei gas di scarico da inviare alla turbina viene dosata da un'apposita valvola detta waste-gate, che devia la eventuale parte eccedente direttamente allo scarico senza transitare nella turbina.

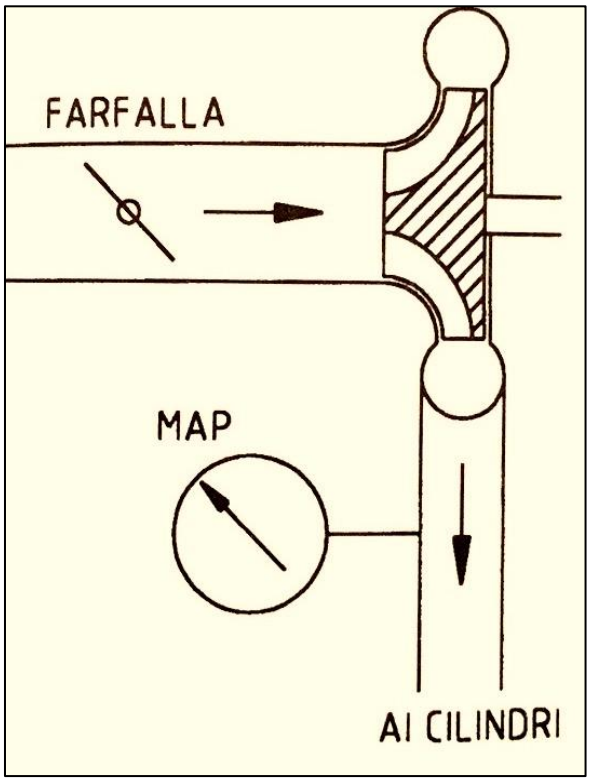
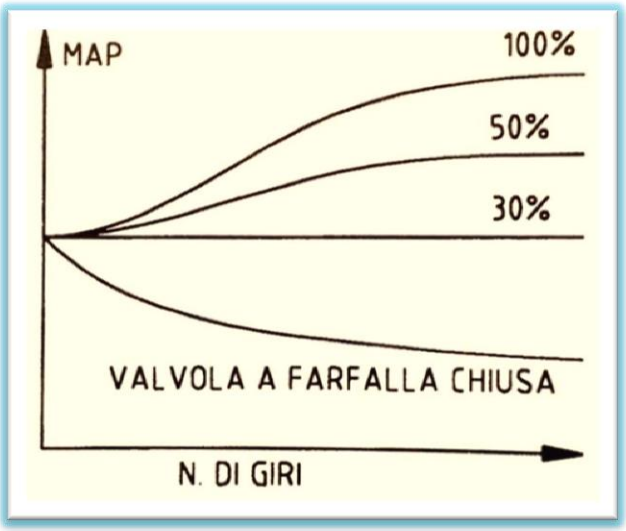


Fig.4.6 - Pressione di alimentazione (MAP, manifold absolute pressure)

4.4 La pressione di alimentazione

A parità di tutte le altre condizioni di funzionamento, come numero di giri, titolo della miscela e temperature varie, la potenza erogata da un motore è direttamente proporzionale alla pressione di alimentazione: viene definita pressione di alimentazione (manifold absolute pressure, MAP) la pressione posseduta dalla miscela nei condotti di aspirazione, a valle della valvola a farfalla e del compressore (fig.4.6). La MAP, pressione a valle del compressore, oltre che da questo viene influenzata dall'apertura della



valvola a farfalla e dal numero di giri del motore; come mostrato nel grafico, le diverse curve sono relative a diverse aperture della valvola a farfalla, per cui si passa da valvola chiusa a valvola completamente aperta, indicata con 100%. Da questo grafico si vede come, a parità di numero di giri, all'aumentare della apertura aumenta la pressione di alimentazione: infatti, più la valvola è chiusa e più la MAP è bassa, a causa dell'aspirazione del motore.

Inoltre, a parità di apertura della farfalla, una variazione del numero di giri influenza la MAP.

4.5 Criteri di impiego della sovralimentazione

Indipendentemente dal tipo di sovralimentazione utilizzato, un motore aeronautico sovralimentato a livello del mare ed al massimo numero di giri non può avere la valvola del carburatore completamente aperta: se così fosse, infatti, si avrebbe una pressione di alimentazione (MAP) superiore al valore massimo consentito, con pericolo per l'integrità del motore stesso. Quindi, il compressore non può essere completamente sfruttato a terra al massimo numero di giri: all'aumentare della quota, non variando la posizione della manetta ed a parità di numero di giri motore, la MAP diminuisce con conseguente diminuzione della potenza erogata.

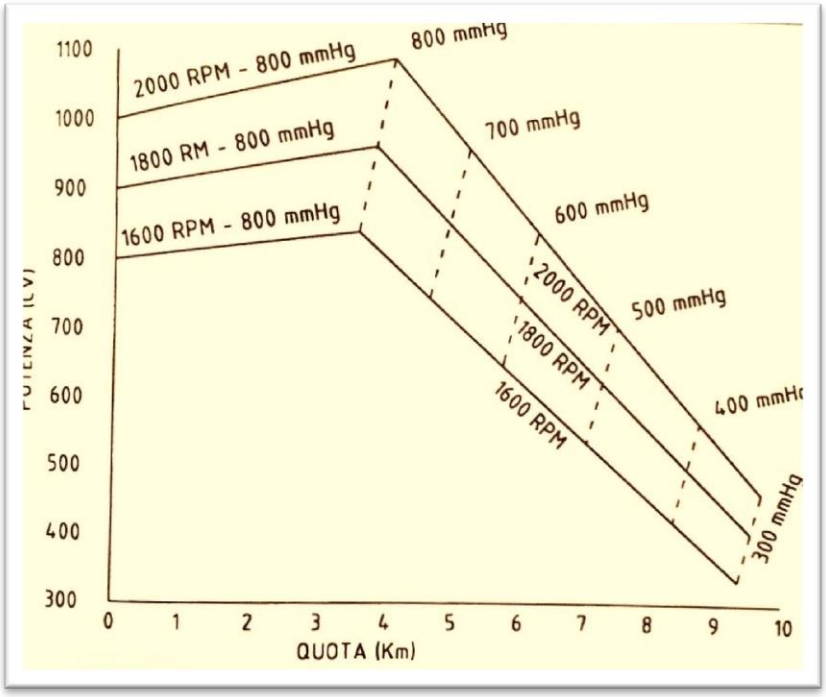
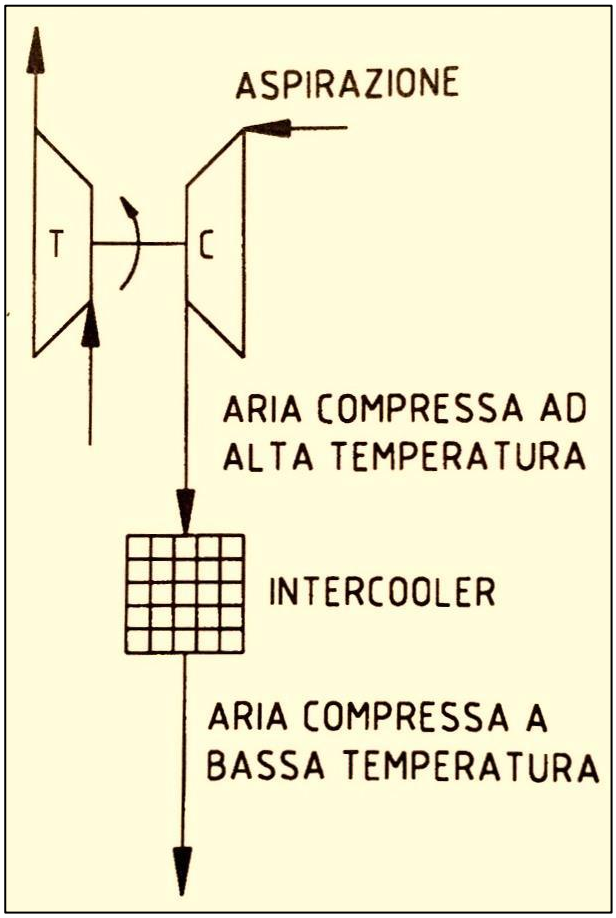


Fig.4.7 - Variazione della potenza erogata in funzione della quota di volo, per un assegnato valore della MAP, a diversi numeri di giri

Se con l'aumento della quota si aumenta anche l'apertura della valvola a farfalla in modo tale da

mantenere la MAP costante, la potenza erogata aumenta in quanto diminuisce la temperatura dell'aria e quindi aumenta la densità dell'aria aspirata; questo fenomeno può verificarsi fino a quote in cui la farfalla raggiunge la massima apertura: questa quota viene definita quota di omologazione. Oltre la quota di omologazione, non potendosi più mantenere la MAP costante, la potenza inizia a diminuire. A parità di MAP, ad un maggior numero di giri corrisponde una maggiore quota di alimentazione (variazioni riassunte nel grafico in fig.4.7).



-Schema di impianto di raffreddamento dell'aria compressa mediante intercooler

4.6 L'intercooler

All'aumentare della quota, deve aumentare il lavoro del compressore per garantire le prestazioni richieste. D'altra parte, una compressione dell'aria è sempre accompagnata da un riscaldamento: ad elevati rapporti di compressione del compressore, si verificano quindi elevati surriscaldamenti dell'aria aspirata; questo fatto genera due effetti nocivi; il primo è un generale calo di potenza, ed il secondo e più pericoloso è il surriscaldamento del motore.

Quindi, se il livello di sovralimentazione è tale da evidenziare questi problemi, per risolverli almeno parzialmente occorre diminuire il valore della temperatura dell'aria compressa, e per questo viene utilizzato un dispositivo chiamato intercooler: questo, mostrato nello schema a lato, è in pratica un radiatore o scambiatore di calore aria, attraverso il quale

viene fatta passare l'aria in uscita dal compressore, la quale viene quindi raffreddata prima di entrare nei cilindri.

In pratica, l'asportazione di buona parte del calore generato dalla compressione avviene immergendo il radiatore in un flusso d'aria proveniente dall'esterno e successivamente scaricato all'esterno. Con questo dispositivo si consegue una maggiore durata del motore, il quale funzionando a temperature più basse eroga una data potenza con pressioni di alimentazione più basse.

5. LA COMBUSTIONE

5.1 Generalità

In un motore a pistoni ciclo Otto, detto anche motore ad accensione per scintilla, la fase di combustione è preceduta dalla fase di compressione, nella quale una miscela di aria e di combustibile è stata vaporizzata dal calore sviluppato per compressione; allo scoccare della scintilla, intorno a questa si forma un focolaio iniziale (nocciolo di fiamma) e da questo la combustione si propaga gradualmente fino ad interessare tutta la miscela introdotta secondo un fronte di fiamma.

5.2 Velocità di fiamma

La velocità del fronte di fiamma, o velocità di fiamma, dipende da due fenomeni distinti: la velocità di combustione e la velocità di traslazione. La velocità di combustione è sostanzialmente legata alla composizione della miscela aria combustibile; la velocità di traslazione è invece legata alla velocità del fronte fiamma rispetto alla camera di combustione. Analisi sperimentali mostrano che la fiamma inizialmente avanza con velocità relativamente bassa, per poi accelerare e raggiungere una velocità più elevata, che in seguito si mantiene sostanzialmente costante, diminuendo quando la combustione si avvia al termine.

Ai fini della corretta messa a punto del motore e del miglioramento del rendimento, sono di particolare importanza inizio di combustione e la

durata di questa: entrambe questi parametri sono influenzati dalla velocità del fronte di fiamma.

La velocità di fiamma, oltrechè dalla composizione della miscela e della camera di combustione, dipende da molti altri fattori, quali: turbolenza della miscela, il rapporto di miscela, la composizione e lo stato fisico della miscela. Il rapporto di miscela, o rapporto aria combustibile è estremamente importante: la velocità di fiamma raggiunge il massimo, a parità di altre condizioni, quando questo rapporto è un po' più ricco, cioè minore di quello stechiometrico; qualsiasi altro valore di tale rapporto diminuisce la velocità di fiamma.

5.3 Detonazione e preaccensione

Quando la combustione non procede in modo regolare, è detta combustione anormale o anomala. Le combustioni anormali possono essere suddivise in detonazione o preaccensione.

La detonazione

La detonazione o autoaccensione è un fenomeno di accensione spontanea di parte della miscela aria combustibile, che si verifica in particolari condizioni di pressione e temperatura.

La detonazione genera un rumore metallico caratteristico detto battito in testa, che è accompagnato da ruvidità di funzionamento e perdita di potenza.

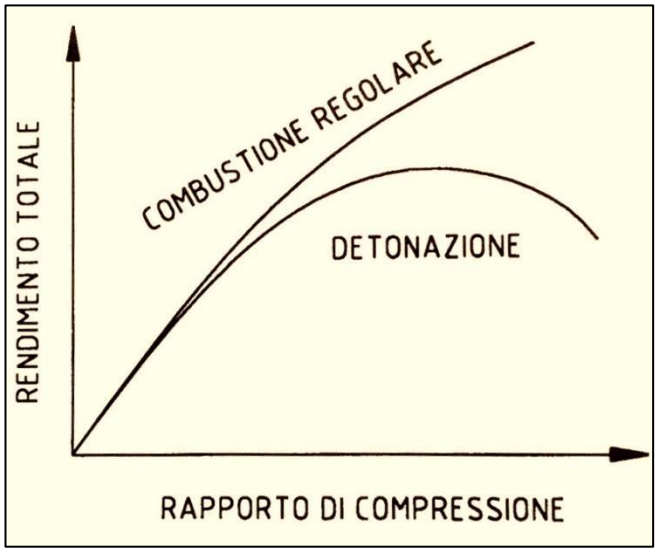


Fig.5.1 - Diminuzione del rendimento totale a causa della detonazione

Il fenomeno della detonazione può innescarsi a seguito di una preaccensione o a seguito di una normale accensione: la differenza tra preaccensione e detonazione è che nella prima la velocità di fiamma è sostanzialmente uguale a quella di una combustione normale, mentre nella seconda è molto maggiore. Il funzionamento continuato in condizioni di detonazione, d'altra parte, può causare il riscaldamento eccessivo di alcuni punti del motore, per cui si può innescare una preaccensione.

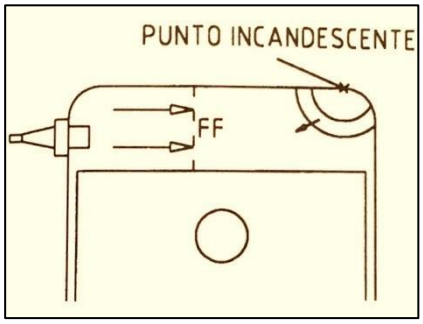


Fig.5.2 - Il fenomeno della detonazione o autoaccensione

In presenza di detonazione si causa una diminuzione del rendimento totale (fig.5.1) e surriscaldamento di alcune parti del motore, tale da produrre la loro distruzione, come nel caso della foratura del pistone per fusione del cielo.

In pratica la situazione della detonazione può essere schematizzata come in fig.5.2: mentre il fronte di fiamma avanza verso destra, causa un aumento di pressione che, in opportune condizioni di pressione e temperatura, può causare l'accensione spontanea della miscela che, a sua volta, produce un fronte di fiamma che interagendo con il precedente produce eccessivi valori di pressione e temperatura: la combustione normale produce una spinta graduale sul pistone, mentre la detonazione genera un colpo eccessivo e violento che danneggia il pistone e deteriora le prestazioni.

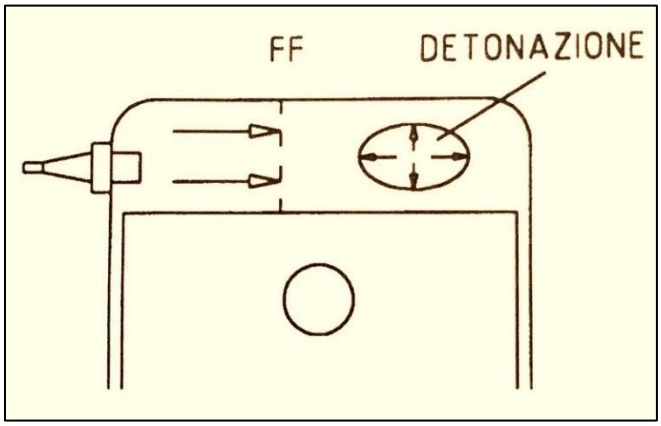


Fig.5.3 - Il fenomeno della preaccensione o accensione a superficie

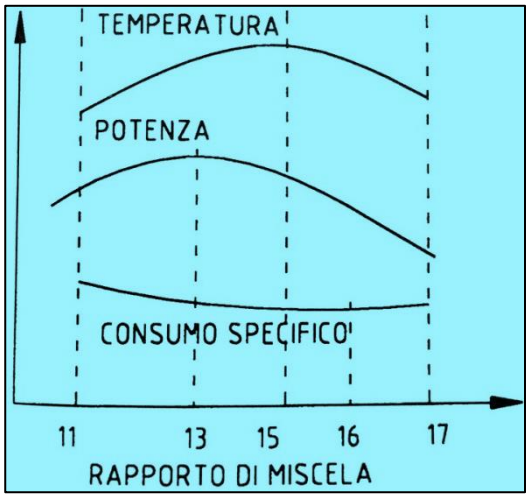
La preaccensione

La preaccensione o accensione di superficie è una combustione originata da punti eccessivamente caldi della camera di combustione o da particelle incandescenti, ed in genere avviene prima dello scoccare della scintilla, pure se si può verificare anche dopo (fig.5.3).

La preaccensione è un fenomeno che tende ad aumentare la temperatura e la pressione all'interno della camera di combustione, in modo da aumentare la temperatura anche dei punti che la hanno innescata: perciò si può verificare che questo fenomeno si accentui con il tempo, quindi la pressione tende ad aumentare con possibilità di detonazione.

Quindi la preaccensione è un fenomeno estremamente dannoso e deve essere evitato in quanto può essere pericoloso per l'integrità degli organi soggetti ad elevate temperature di esercizio, come i pistoni, le candele e le valvole di scarico.

5.4 La miscela aria carburante



Come detto in precedenza, un motore a pistoni, come tutti i motori a combustione interna, produce un lavoro a spese dell'energia chimica contenuta nel combustibile: tale energia si libera, sotto forma di calore, quando il combustibile viene bruciato all'interno del motore, in presenza di ossigeno contenuto nell'aria: pertanto, è necessario introdurre nel motore sia combustibile sia aria, in opportune proporzioni.

Il fluido di lavoro, per la parte precedente la combustione, è formato da una miscela di aria e combustibile; per la parte successiva alla combustione è formato invece dai gas residui di combustione: pertanto la composizione chimica del fluido di lavoro cambia durante il ciclo operativo.

Si definisce rapporto aria combustibile, o rapporto di miscela o titolo della miscela, la quantità in massa di aria impiegata per bruciare l'unità di massa di combustibile: il rapporto che rappresenta la dosatura teorica ideale per ottenere la combustione completa, che nel caso dell'ottano vale circa 15 è detto rapporto stechiometrico: questo rapporto può

essere considerato con buona approssimazione costante in quanto varia poco per i diversi idrocarburi.

5.5 I combustibili

I combustibili aeronautici sono degli idrocarburi liquidi, di caratteristiche ben controllate e definite da apposite specificazioni; in particolare per i motori a pistoni vengono utilizzate le benzine, che sono frazioni leggere degli idrocarburi naturali separate per distillazione.

6. LA CARBURAZIONE

6.1 Generalità

La carburazione è un processo che riguarda il fluido di lavoro, e che in particolare consiste nel dosare il combustibile in modo tale da ottenere il desiderato rapporto di miscela o rapporto aria benzina, che soddisfi alle esigenze di funzionamento del motore; inoltre, in tale processo il combustibile deve essere polverizzato e mescolato omogeneamente con l'aria.

Il sistema di alimentazione comprende tutti gli organi destinati alla preparazione del fluido di lavoro ed alla sua distribuzione in ogni cilindro: uno schema del circuito di alimentazione è mostrato in fig.6.1: il carburatore è l'organo essenziale dell'impianto, che comprende anche uno o più serbatoi del combustibile, una o più pompe per alimentare il carburatore, uno o più filtri per eliminare le eventuali impurità nell'aria e nel combustibile, e le relative tubature per l'aria, per il combustibile e per la miscela aria combustibile.

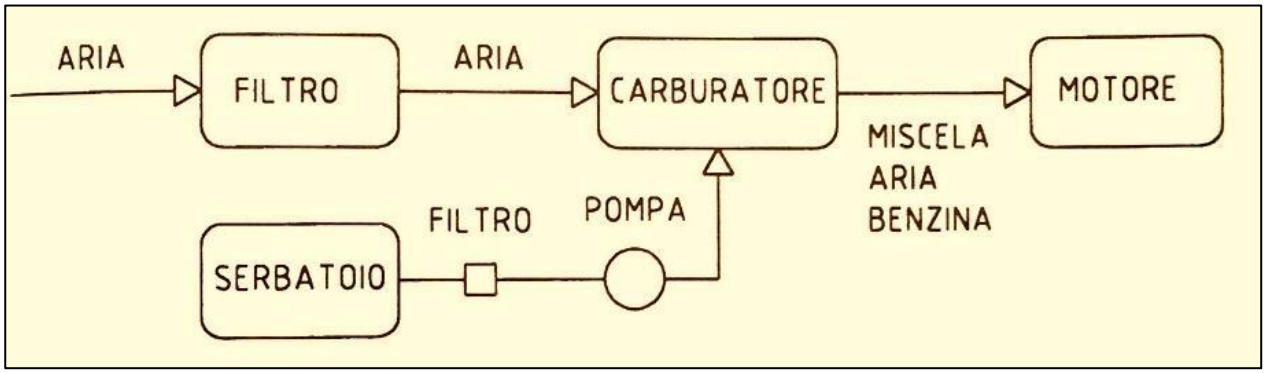


Fig.6.1 - Schema del circuito di alimentazione del motore

L'aria esterna, richiamata dal motore durante la fase di aspirazione, transita attraverso un filtro dell'aria, che in genere è realizzato in panno o carta speciale: un buon filtro d'aria deve avere un'elevata efficienza filtrante, cioè la capacità di trattenere anche le polveri più fini; deve, inoltre, possedere una buona capacità di accumulo, cioè deve poter assicurare il regolare funzionamento del motore per lunghi periodi senza bisogno di sostituzione o pulizia; naturalmente, deve presentare una basa perdita di carico all'aspirazione, per potere favorire il riempimento dei cilindri.

Per mandare il combustibile dal serbatoio al carburatore, vengono impiegate delle apposite pompe di vario tipo. Infine, ma non per ultimo, nel circuito di alimentazione deve essere previsto anche un filtro per il carburante, che per i motori aeronautici serve soprattutto a consentire di asportare eventuali parti d'acqua contenute nel sistema, oltre alle normali funzioni di filtraggio.

In senso letterale carburazione significa intima miscelazione nella giusta dose di aria e combustibile o carburante. La carburazione può avvenire direttamente nei cilindri oppure fuori, nel condotto di aspirazione.

6.2 Il titolo della miscela

In un motore a pistoni, i cilindri vengono riempiti di una miscela composta d'aria e carburante ad ogni ciclo: infatti, affinchè la combustione possa avvenire, occorre che il carburante venga combinato con un'adeguata quantità di ossigeno, contenuto nell'aria. Come visto nel capitolo sulla combustione, si definisce titolo della miscela, oppure semplicemente titolo, il rapporto in peso o massa tra l'aria ed il carburante che compongono la miscela: quando il rapporto tra aria e carburante è tale che la combustione avviene in modo completo, senza eccessi né di aria né di carburante, il titolo corrispondente è detto stechiometrico; in queste condizioni la quantità di calore prodotto dalla combustione è massima, per cui è massima anche la temperatura di esercizio del motore, a parità di altre condizioni.

Normalmente il titolo stechiometrico è pari a circa 15, cioè 15 parti di aria per ogni parte di benzina. Quando il titolo è più grande, cioè quando c'è eccesso d'aria, la miscela si dice povera o magra: in queste condizioni la

combustione del carburante è completa, ma l'eccesso d'aria presente nella miscela causa una diminuzione della temperatura del motore. Al contrario, quando il titolo è più piccolo dello stechiometrico, la miscela si dice ricca o grassa: non tutto il carburante può essere bruciato a causa della carenza di ossigeno, e quindi il carburante in eccesso presente nei residui di combustione contribuisce a diminuire la temperatura del motore. Pertanto, se si misura la temperatura delle testate dei cilindri al variare del titolo della miscela a parità di altre condizioni, si ottiene un andamento analogo a quello mostrato in fig.6.2.

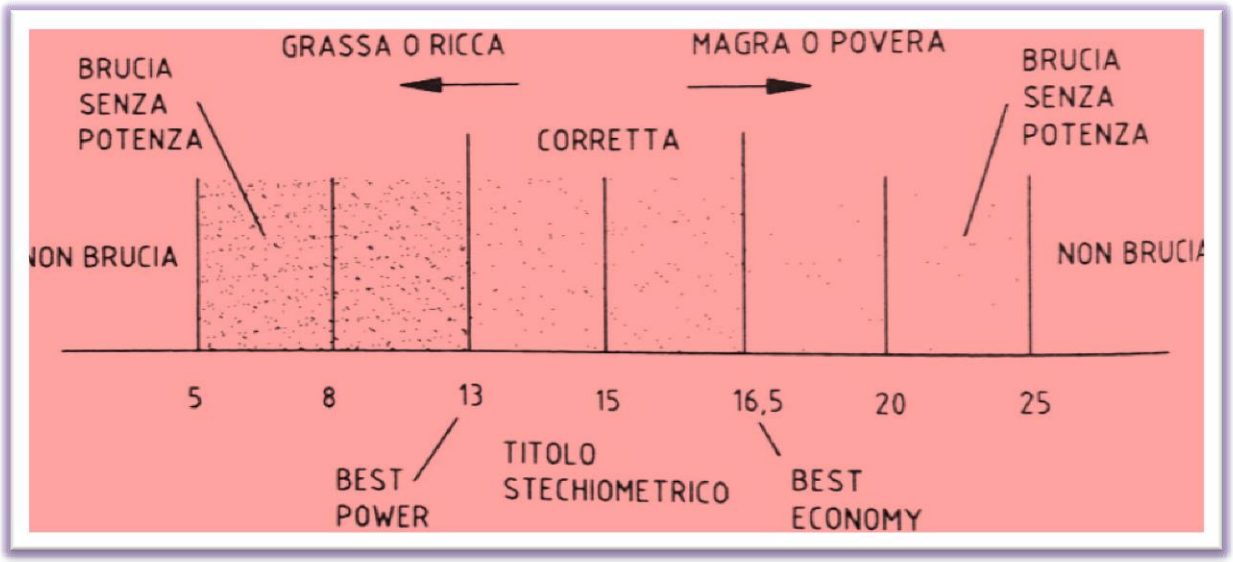


Fig. 6.2 - Schematizzazione del comportamento della miscela aria carburante al variare del titolo

Pertanto, in sintesi si può dire che la miscela deve essere ricca sia alle basse che alle alte potenze, mentre può essere magra soltanto nel campo delle potenze intermedie, cioè ai regimi di crociera. Dunque si può utilizzare miscela al titolo di best economy solo nelle fasi di crociera o di attesa (holding); d'altra parte, occorre evitare di fare funzionare il motore nelle fasi di minimo o massimo, con titoli vicini allo stechiometrico, per non incorrere nel pericoloso fenomeno della detonazione, a causa delle elevate temperature di esercizio che si verificano a tale titolo.

Naturalmente il motore può funzionare regolarmente anche al titolo di best power in crociera, ma in tal caso si verifica un eccessivo consumo rispetto alle prestazioni ottenute, con una conseguente diminuzione dell'autonomia oraria e chilometrica.

7. LA LUBRIFICAZIONE

7.1 Generalità

L'impianto di lubrificazione è uno dei principali componenti di un motore a pistoni, ed il suo corretto funzionamento è uno dei parametri critici nella vita del motore stesso.

7.2 Schema di funzionamento

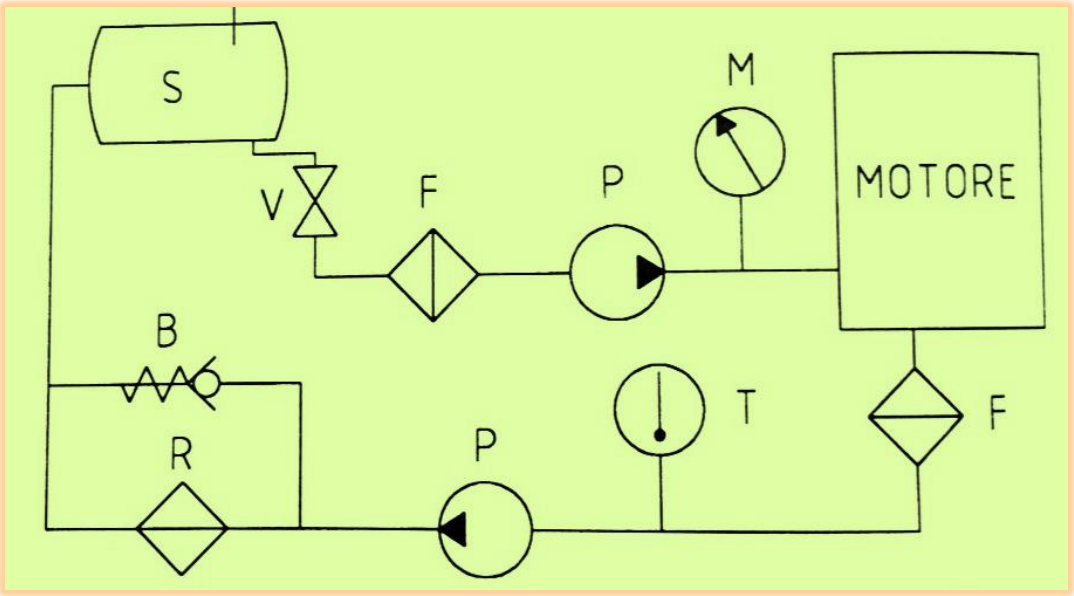


Fig. 7.1 - Schema dell'impianto di lubrificazione di un motore a quattro tempi

L'impianto di lubrificazione di un motore a quattro tempi per aeromobili, il cui schema di funzionamento è riportato in fig.7.1, è costituito essenzialmente dai seguenti componenti:

- un serbatoio dell'olio S;
- una valvola di intercettazione o shut off V;
- un filtro principale di mandata F;
- una pompa di mandata P;
- un manometro per il controllo della pressione M;
- un filtro di ritorno F;
- una pompa di recupero P;

- un termometro per il controllo della temperatura T;
- un radiatore R;
- una valvola di by pass B.

Il serbatoio del lubrificante, separato dal motore, è in genere sistemato dietro al motore stesso, tra questo e la paratia parafiamma; sulla parte superiore è posto un bocchettone, per il rifornimento a gravità, ed uno sfiato; da un lato è posta la tubazione di ritorno del lubrificante, mentre nella parte inferiore è posta la tubazione di mandata del lubrificante, nonché un foro per il drenaggio.

Per prima cosa sulla tubazione di mandata è posto un rubinetto o valvola di intercettazione (shut off), che serve ad interrompere il flusso di olio al motore in caso di incendio. Dopo questa valvola, l'olio viene filtrato da un apposito filtro, dopo di che arriva alla pompa di mandata, che ha la funzione di fornire all'olio la giusta pressione affinchè questo possa raggiungere tutti gli organi che devono essere lubrificati, nell'apposita quantità.

L'olio, dopo avere assolto al suo compito, viene raccolta in un apposito pozzetto o coppa, da dove mediante apposita pompa di recupero viene inviato al radiatore per il raffreddamento; generalmente, a monte della pompa di recupero è sistemato un altro filtro che serve a trattenere le eventuali impurità solide contenute nell'olio, che questo ha raccolto durante il suo ciclo di funzionamento all'interno del motore.

Nel radiatore l'olio viene raffreddato, prima di ritornare nel serbatoio. Per questa funzione il radiatore sfrutta il flusso di aria esterna che viene regolato in quantità mediante un flabello parzializzatore; tale flabello può essere comandato dalla cabina piloti mediante un comando il quale in genere assume tre posizioni: OPEN, CLOSED, AUTO: nella posizione AUTO il flabello è azionato da un sistema automatico che utilizza un termostato, il quale regola l'apertura del flabello per mantenere la temperatura del lubrificante entro appositi limiti: naturalmente le posizioni OPEN e CLOSED comandano il flabello in apertura totale o chiusura, rispettivamente.

Qualora l'olio lubrificante fosse troppo denso a causa della bassa temperatura, per diminuire la sua resistenza alla circolazione si apre la valvola di by pass ed al lubrificante viene evitato il passaggio nel radiatore, in questo modo si agevola il raggiungimento della temperatura di esercizio.

8.0 IL RAFFREDDAMENTO

8.1 Generalità

Il bilancio energetico per i motori a combustione interna mostra come solo una piccola percentuale dell'energia termica introdotta nel motore sotto forma di carburante, pari a circa il 20÷30% del totale, viene trasformata in energia utile alla propulsione; tutta la restante parte, quindi la maggior parte, viene dissipata con diversi meccanismi, attraverso i gas di scarico, attraverso attriti vari e sistema di raffreddamento.

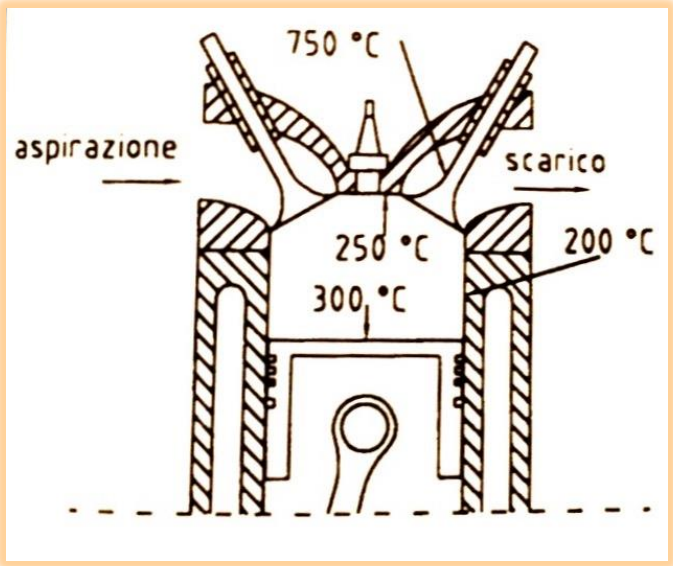


Fig.8.1 - Temperature tipiche di esercizio di un motore a quattro tempi

Più precisamente, il sistema di raffreddamento, nel dissipare il calore in eccesso, deve assicurare che i vari organi costituenti il motore operino alle appropriate temperature, dettate dei materiali costruttivi e dalle modalità di funzionamento, e deve evitare che in questi organi si superino le temperature massime di esercizio. In fig.8.1 è mostrata una sezione schematica di un tipico motore a pistoni a quattro tempi, con indicate le temperature tipiche di esercizio di alcuni tra gli organi principali del motore.

- *Cilindro*: max 150÷200 ° C. Temperature superiori causano cambiamenti nello stato fisico e chimico dell'olio lubrificante, usure anomale del cilindro e del pistone, formazione di depositi

carboniosi, tendenza delle fasce elastiche ad incollarsi alle sedi del pistone, grippaggio.

- *Pistone*: La temperatura non deve superare i 300° C. Per il cielo del pistone il raffreddamento in genere avviene per conduzione, verso le pareti del cilindro e verso l'olio lubrificante. Un eccessivo riscaldamento del pistone ne riduce la resistenza meccanica, ed in alcuni casi si può verificare addirittura la fusione con conseguente comparsa di buchi nel cielo stesso.
- *Camera di combustione:* 250° C circa; in queste condizioni si riesce ad asportare efficacemente il calore della candela , dalle sedi e dalle guide delle valvole. Il superamento di queste temperature può causare la formazione di punti caldi nella camera di combustione, i quali possono innescare fenomeni di detonazione e preaccensione.
- *Valvola di scarico:* max 700÷750° C. Temperature superiori riducono la resistenza meccanica; le modalità di raffreddamento sono solo per conduzione, mediante le guide e le sedi.

Naturalmente, per gran parte degli organi interni del motore, come ad esempio il manovellismo di spinta, gli organi della distribuzione ed il pistone con relativo spinotto, il fondamentale contributo al mantenimento della temperatura di esercizio è effettuato dall'olio lubrificante: in pratica il lubrificante, oltre a limitare gli attriti, ha il compito di asportare il calore in eccesso; così, tenendo sotto controllo la temperatura dell'olio, si garantisce l'appropriata temperatura di esercizio degli organi interni. Infatti la resistenza meccanica degli organi del motore diminuisce all'aumentare della temperatura; inoltre le caratteristiche del lubrificante peggiorano con il conseguente aumento degli attriti e diminuzione del rendimento meccanico. Quindi, uno dei principali indicatori della temperatura di esercizio di un motore, riguardo agli organi più interni, è l'indicatore della temperatura dell'olio lubrificante.

L'impianto di raffreddamento può essere ad aria e a liquido: in entrambe le soluzioni costruttive, la temperatura di esercizio del motore viene in pratica rilevata mediante la misura della temperatura teste cilindri (CHT, cylinder head temperature).

Naturalmente, oltre ai valori eccessivi, anche valori troppo bassi della temperatura di esercizio di un motore possono causare problemi funzionamento: infatti, a temperature troppo basse, il funzionamento del motore risulta irregolare in quanto la miscela aria carburante non è molto omogenea, ed i giochi di accoppiamento tra le varie parti in movimento, come ad esempio la tolleranza tra pistone e cilindro, risultano eccessivi in quanto calcolati per la normale temperatura di esercizio, e ciò compromette il buon funzionamento del motore.

8.2 Il raffreddamento ad aria

Attualmente, nella quasi totalità dei motori per aeromobili, il raffreddamento viene effettuato mediante aria ambiente; in particolare l'impianto di raffreddamento deve essere progettato in modo da soddisfare le seguenti esigenze:

- ciascun cilindro deve esporre al flusso d'aria una superficie sufficiente per garantire una adeguata cessione di calore;
- il flusso d'aria entrante deve essere diretto in maniera tale da raggiungere tutte le parti del motore che necessitano di raffreddamento;
- garantire, in ogni condizione ambientale ed in ogni condizione di funzionamento, una sufficiente quantità di aria di raffreddamento.

I cilindri e le testate dei motori raffreddati ad aria sono dotati di alettature esterne con lo scopo di aumentarne la loro superficie radiante. Le alettature possono essere ricavate sul cilindro stesso o riportate. La parte del motore non direttamente investita dal flusso d'aria sarebbe scarsamente raffreddata: a tale inconveniente si ovvia sistemando dei deflettori che hanno il compito di convogliare parte dell'aria di raffreddamento verso la parte posteriore del cilindro (fig.8.2).

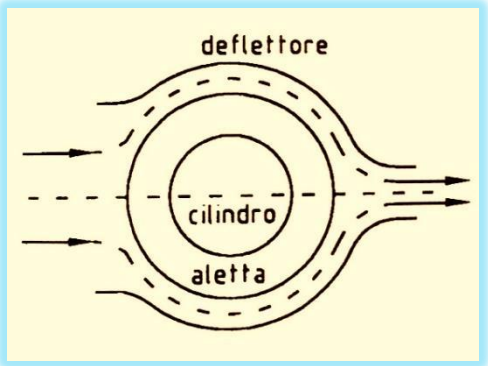


Fig.8.2 - Raffreddamento ad aria con deflettore

Per motivi aerodinamici, il motore è racchiuso in una opportuna cappottatura: parte della superficie anteriore della cappottatura, quella cioè perpendicolare al vento relativo, reca delle prese di aria mediante le quali entra l'aria necessaria al raffreddamento del motore. Questa, dopo avere lambito tutte le superfici da raffreddare, ha aumentato la propria temperatura e deve essere scaricata verso l'esterno, dalla parte posteriore o inferiore della cappottatura; la quantità di aria che entra nella cappottatura è funzione della potenza erogata dal motore, del numero di giri, della velocità relativa e della densità dell'aria e quindi della quota.

Poiché tutte queste grandezze sono variabili, anche al quantità di aria per il raffreddamento deve essere variabile; allo scopo di regolare la massa d'aria e quindi la temperatura di funzionamento del motore, l'area della sezione di scarico viene controllata mediante opportuni flabelli, il cui principio di funzionamento ricalca quello della normale valvola a farfalla dei carburatori (fig.8.3). Il campo di apertura dei flabelli è limitato dalle esigenze aerodinamiche: la resistenza aerodinamica aumenta all'aumentare dell'apertura dei flabelli i quali, al di sopra di certe velocità, possono manifestare intense vibrazioni.

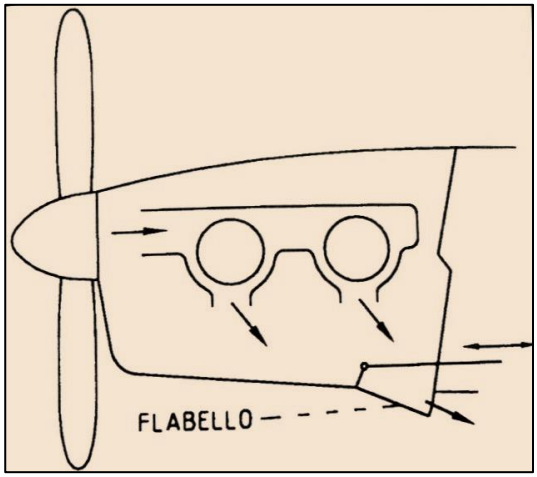


Fig.8.3 - Schema di funzionamento dei flabelli

Dal punto di vista pratico, si è verificato che occorre una quantità di aria di raffreddamento pari a circa 80 kg di aria per ogni kg di carburante.

9. L'ACCENSIONE

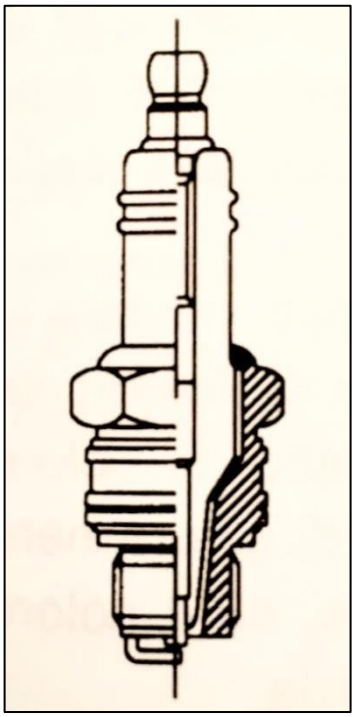
9.1 Generalità

Limitando l'esposizione al caso dei motori a pistoni aeronautici, per i quali è tuttora in uso l'accensione a magnete, sia a bassa tensione che ad alta tensione. Il ragionamento che sta alla base del funzionamento del generatore a magnete è il seguente: si considerino i due poli, nord e sud,

di una forte calamita o magnete permanente, detta induttore, e si ponga tra essi una spira di filo conduttore, detto indotto, i cui estremi vengono saldati su di un collettore di corrente.

Facendo ruotare la spira nel campo magnetico prodotto tra i poli nord e sud, si causa una differenza di potenziale ai capi della spira: se il circuito è chiuso circola nella spira una corrente elettrica. Su questo principio si basa il generatore a corrente alternata a magnete.

Per motivi di sicurezza, e anche per garantire una combustione più uniforme e, quindi prestazioni migliori, nei motori aeronautici vengono utilizzate due candele per ogni cilindro; ciascuna candela deve essere alimentata elettricamente da un impianto di accensione diverso da quello che alimenta l'altra; un motore aeronautico, quindi, è sempre equipaggiato da un doppio impianto di accensione, ed i due impianti sono distinto tra loro facendo riferimento al generatore che li alimenta; in genere, per i motori boxer, che sono la norma nei motori a pistoni per aeromobili, si ha il circuito destro e il circuito sinistro.



9.2 La candela di accensione

La candela di accensione è l'elemento del circuito di accensione che serve a portare la corrente elettrica fino all'interno della camera di combustione, nella quale genera una scintilla che scocca tra gli elettrodi ed accende la miscela aria combustibile.

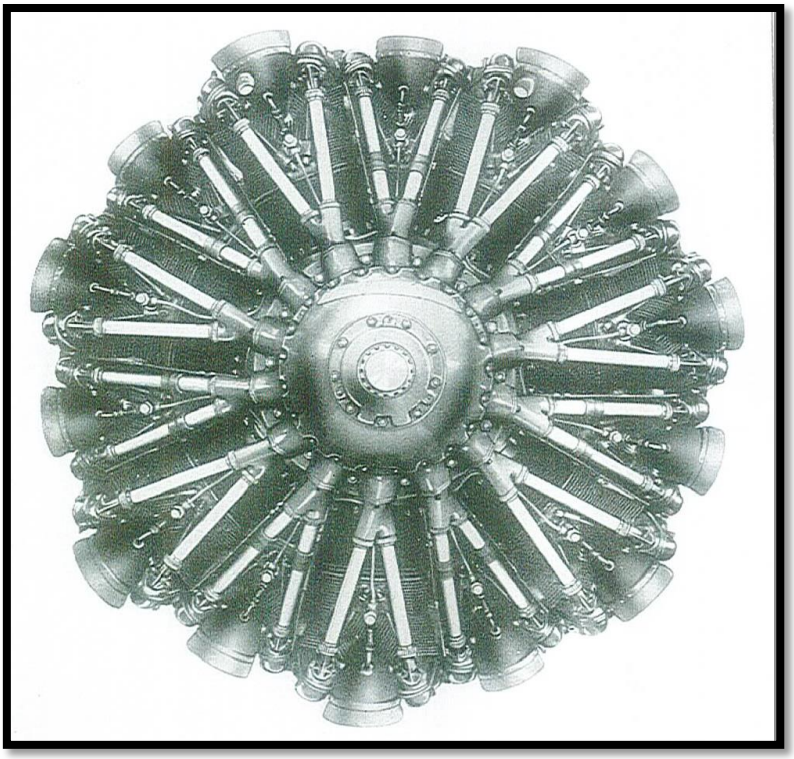
MOTORE RADIALE PIAGGIO PXI RC40

Il *P. XI RC* (14 cilindri) raffreddato ad aria da 610 CV, dotato di riduttore , compressore e con i cilindri (raffreddati ad aria) disposti radialmente sull'incastellatura in due stelle sfalsate: fu la versione iniziale ed entrò in produzione nel 1934. Nel 1938 la versione ***P.XI RC 40*** raggiunse la potenza di 1000 CV alla quota di ristabilimento di 4000 m.

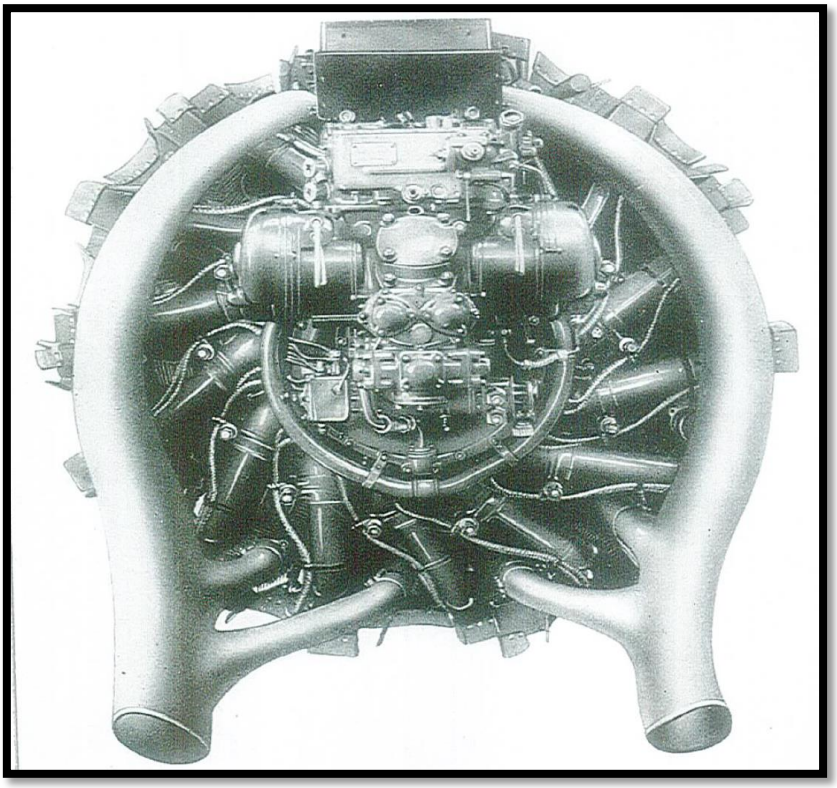
Fu impiegato per la motorizzazione del velivolo *Reggiane Re.2000*, aereo da caccia monomotore, denominato anche *"Falco"*, realizzato dalle Officine Meccaniche Reggiane sul finire degli anni trenta. Primo progetto realizzato in proprio dall'azienda emiliana, controllata dalla Caproni S.p.a., trovò impiego marginale nella Regia Aereonautica nella prima parte della Seconda Guerra Mondiale, ma ebbe successo soprattutto all'estero, in Svezia ed Ungheria.

Le caratteristiche del motore sono indicate nella tabella :

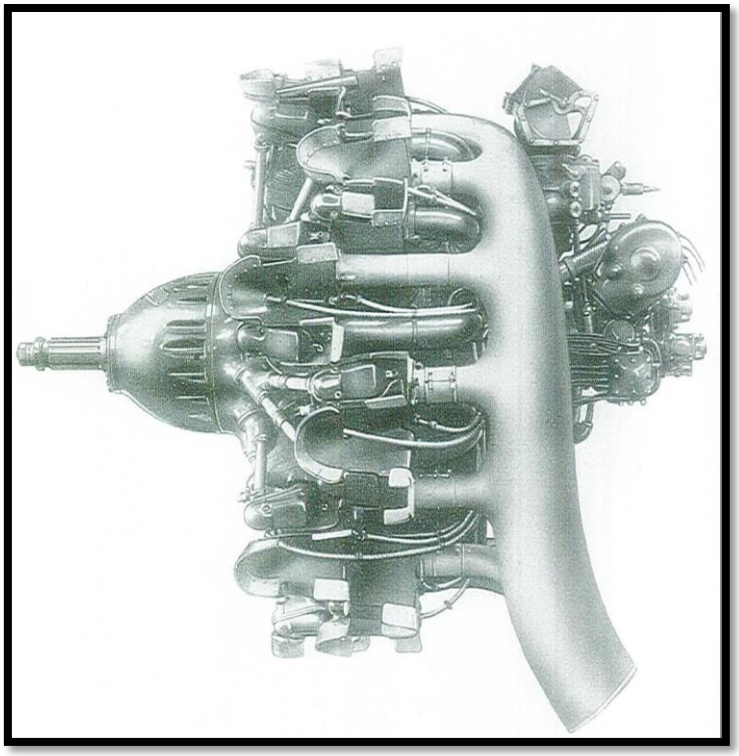
- Potenza normale a quota zero e a 2200 rpm alla pressione di alimentazione di mm Hg 860 : *870 CV*
- Potenza normale a quota normale (4000 m) a 2200 giri min. alla pressione di alimentazione di mm Hg 860 : *1000 CV*
- Numero dei giri normali : *2200 rpm*
- Quota normale : *4000 m*
- Pressione di alimentazione : *mm Hg 860 (rapporto 1 : 1,61)*
- Comando dell'elica : *demoltiplicato*
- Numero dei cilindri : *14*
- Alesaggio : *146 mm*
- Corsa : *165 mm*
- Cilindrata di un cilindro : *litri 2,762*
- Cilindrata totale del motore : *litri 38,600*
- Rapporto volumetrico di compressione : *6 : 1*
- Peso del motore destro a secco, completo degli accessori di dotazione normale : *kg 655 + 1%*
- Carburatore: Piaggio T 2 100
- Alimentazione del carburatore: una pompa Romec
- Tipo di magnete : Marelli MF 14
- Numero dei magneti : 2
- Numero delle candele : 2 per cilindro
- Sistema di lubrificazione: sottopressione
- Misure di ingombro: diam. esterno mm 1328 / lungh. tot. (senza mozzo e senza generatore) mm 1700



Vista di fronte

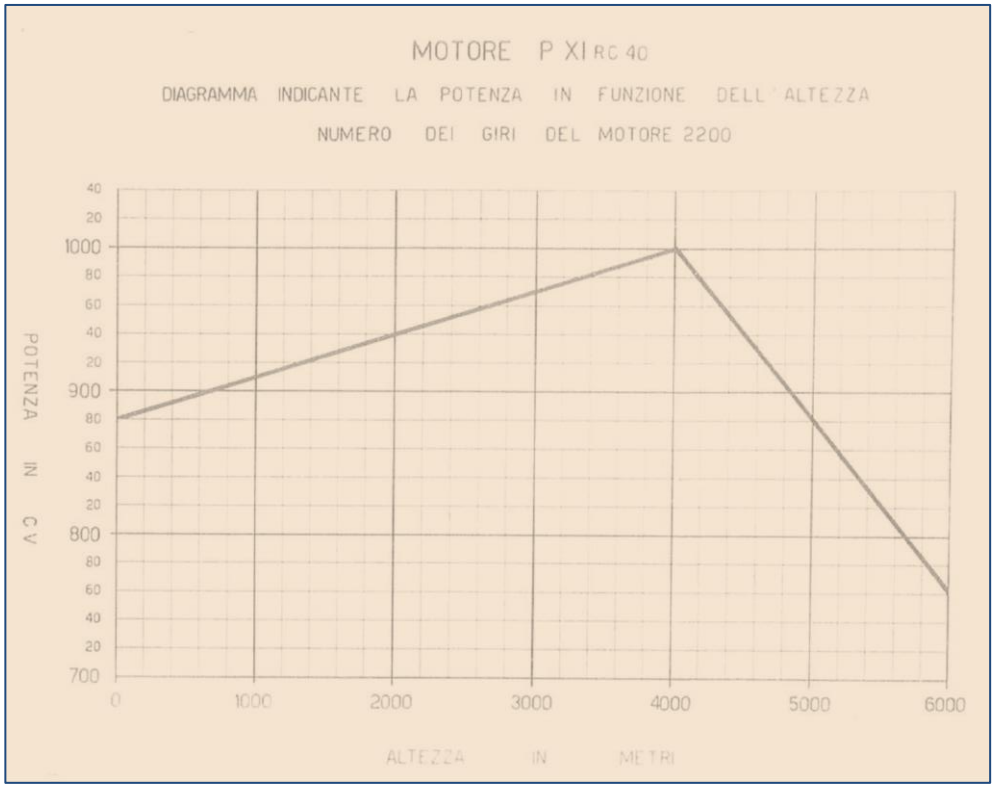


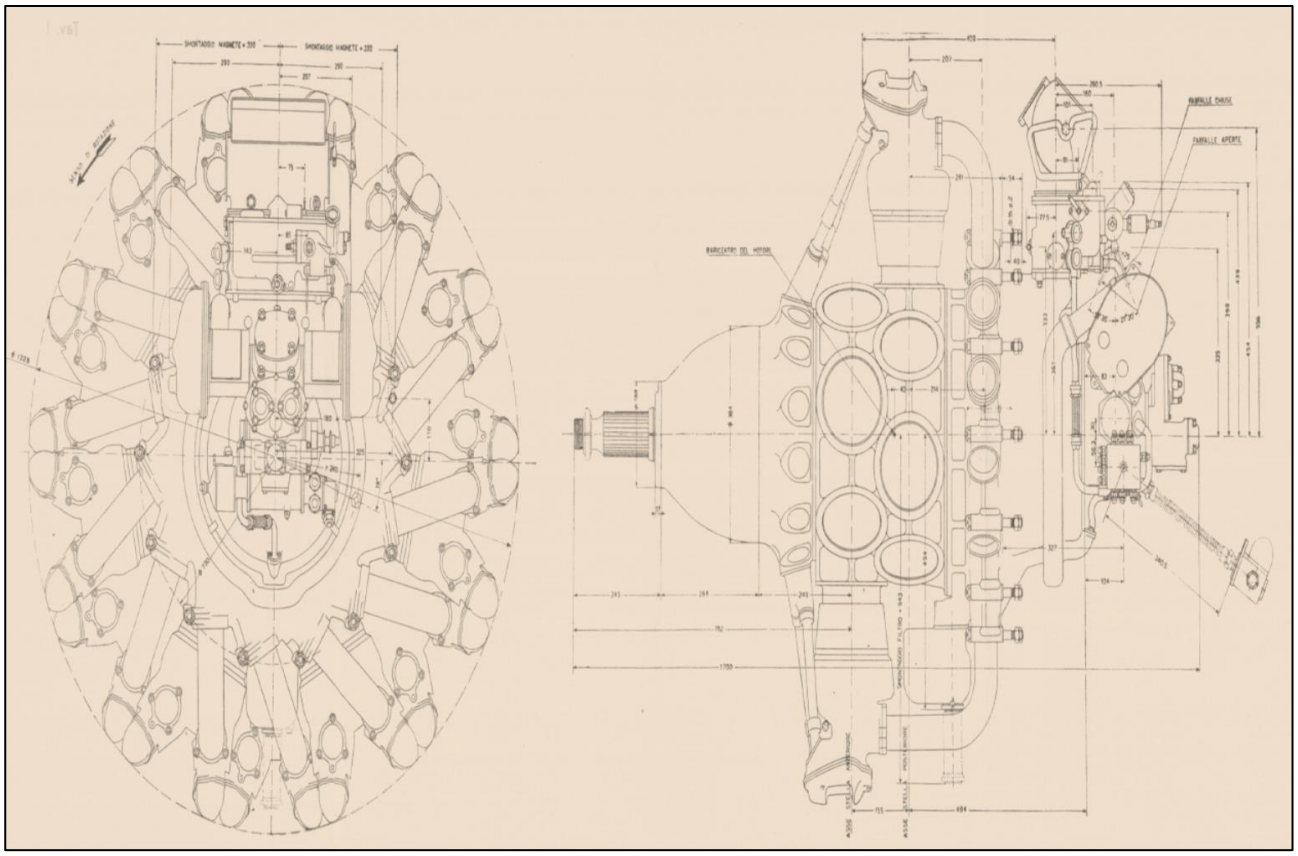
Vista posteriore



Vista laterale

Il grafico seguente riporta la curva di potenza in funzione dell' altezza:





Incastellatura

L'incastellatura, di duralluminio, è in un sol pezzo fucinato. All'intorno, disposti su due stelle sfalsate, sono ricavati 14 alloggiamenti con flangia, per i cilindri.

Cilindri

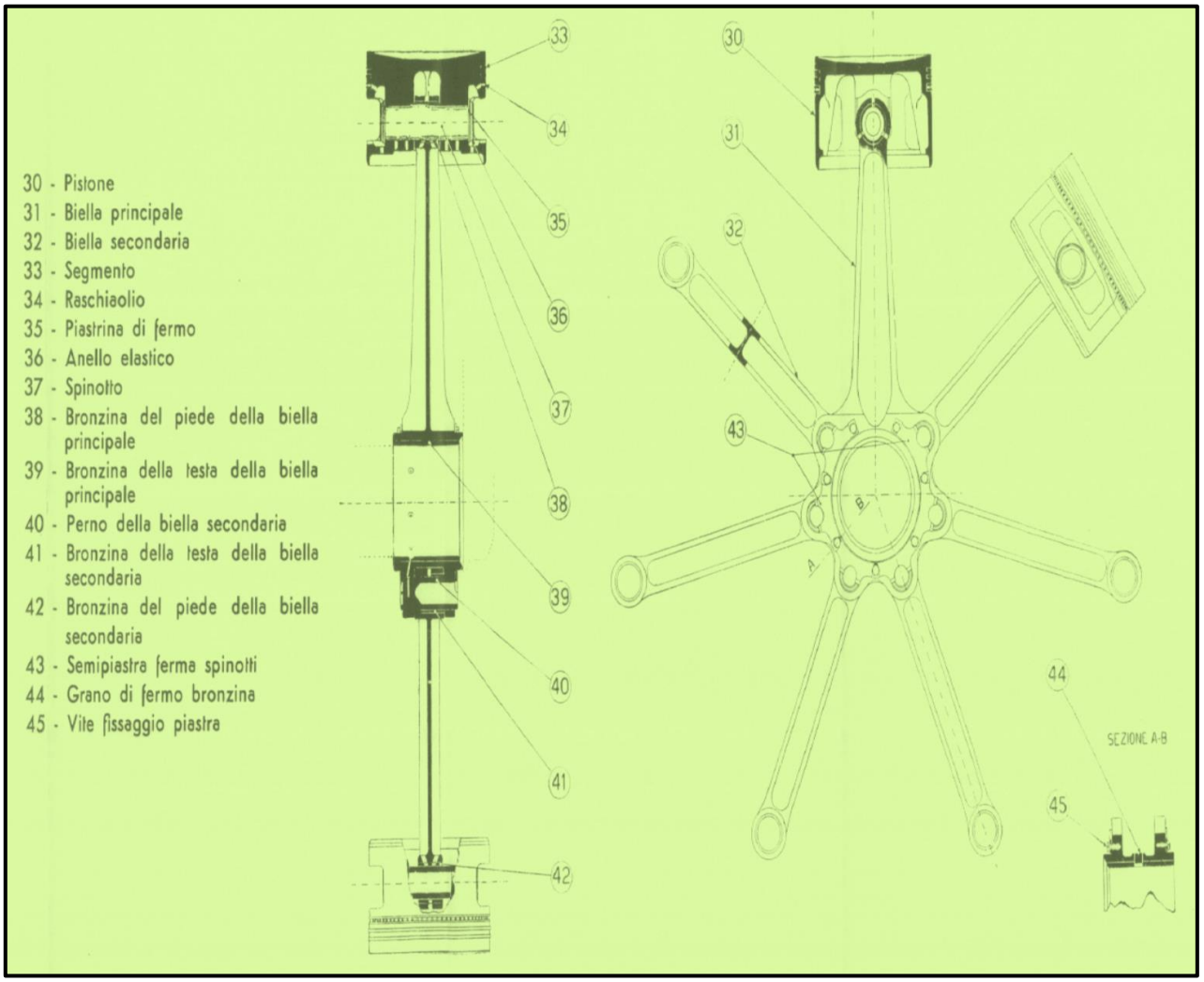
Ogni cilindro è fissato alla flangia circolare dell'incastellatura mediante 10 prigionieri ed è composto da due parti: la canna in acciaio al nichel cromo è aperta alle estremità ed è munita di alette di raffreddamento e di una flangia circolare nella parte inferiore per il fissaggio all'incastellatura.

La testa è in lega speciale di allumino ad alta resistenza, all'esterno ha una serie di alettature per avere un raffreddamento uniforme.

Stantuffo

Lo stantuffo è in lega speciale di alluminio forgiato e trattato termicamente con testa leggermente concava e porta tre gole, nelle quali sono alloggiati due segmenti di tenuta ed uno raschiaolio.

Sistema di bielle

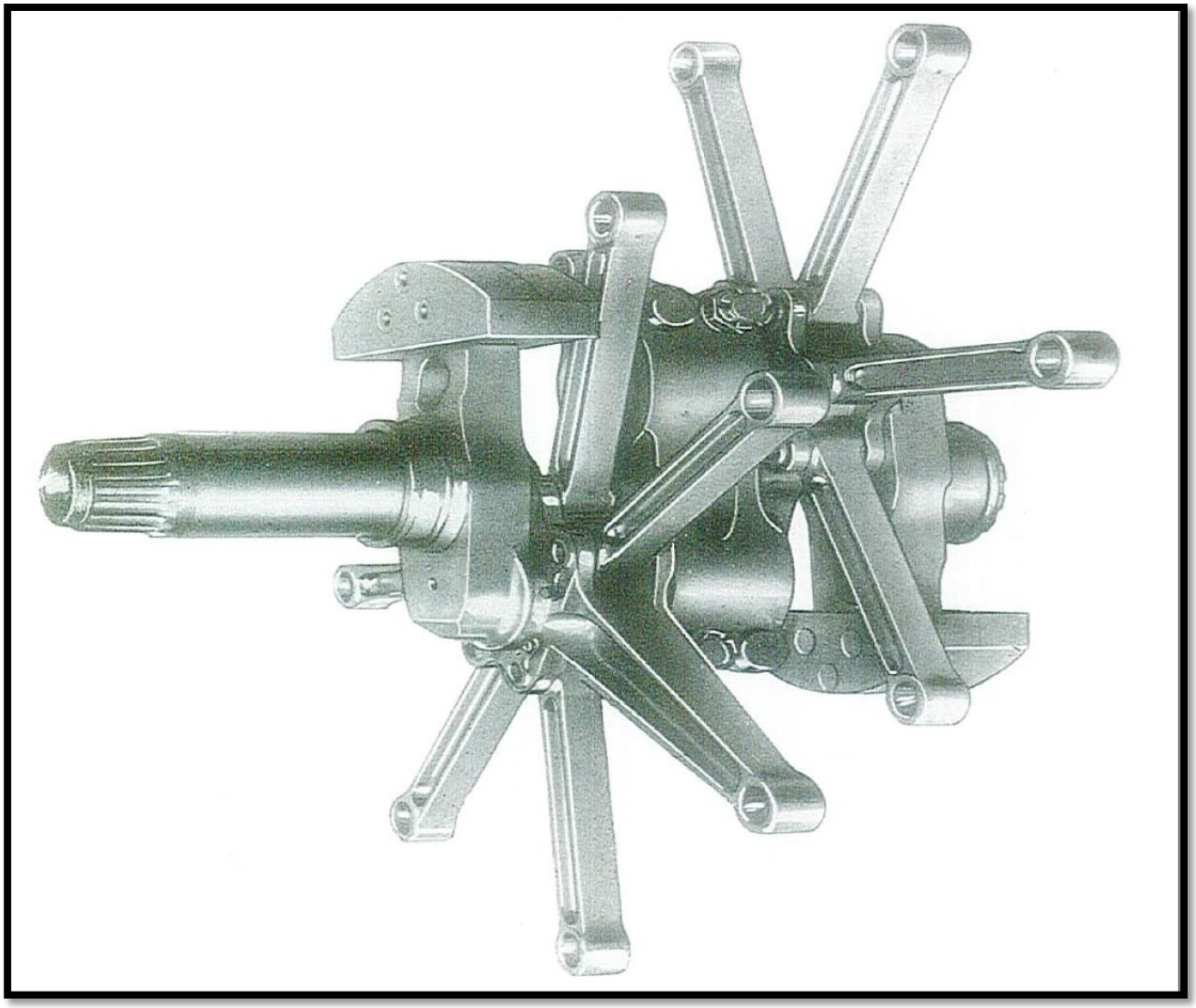


Il biellaggio si compone di due bielle principali, una per ogni stella, e di 12 bielle secondarie, 6 per ogni stella.

Le bielle principali, in acciaio al nichel-cromo stampato, sono in un sol pezzo.

Albero motore

L'albero motore è in acciaio al nichel-cromo stampato: è in tre pezzi ed ha due perni di manovella disposti a 180°. Il serraggio dei tre pezzi è fatto a mezzo di 4 robusti bulloni applicati al braccio centrale.



Smontaggio dell'albero motore

L'estremità anteriore dell'albero motore, che è cavo in tutta la sua lunghezza, esternamente è filettata per ricevere la ghiera di bloccaggio del mozzo dentato del riduttore.

Distribuzione

Tutti gli organi della distribuzione sono contenuti nel coperchio anteriore della distribuzione, fissato alla coppa del riduttore.

Il coperchio anteriore della distribuzione è montato tra l'incastellatura e la coppa del riduttore.

Le valvole sono in acciaio speciale e sono 2 per cilindro, una di ammissione e una di scarico(quest'ultima è del tipo raffreddato al sodio).

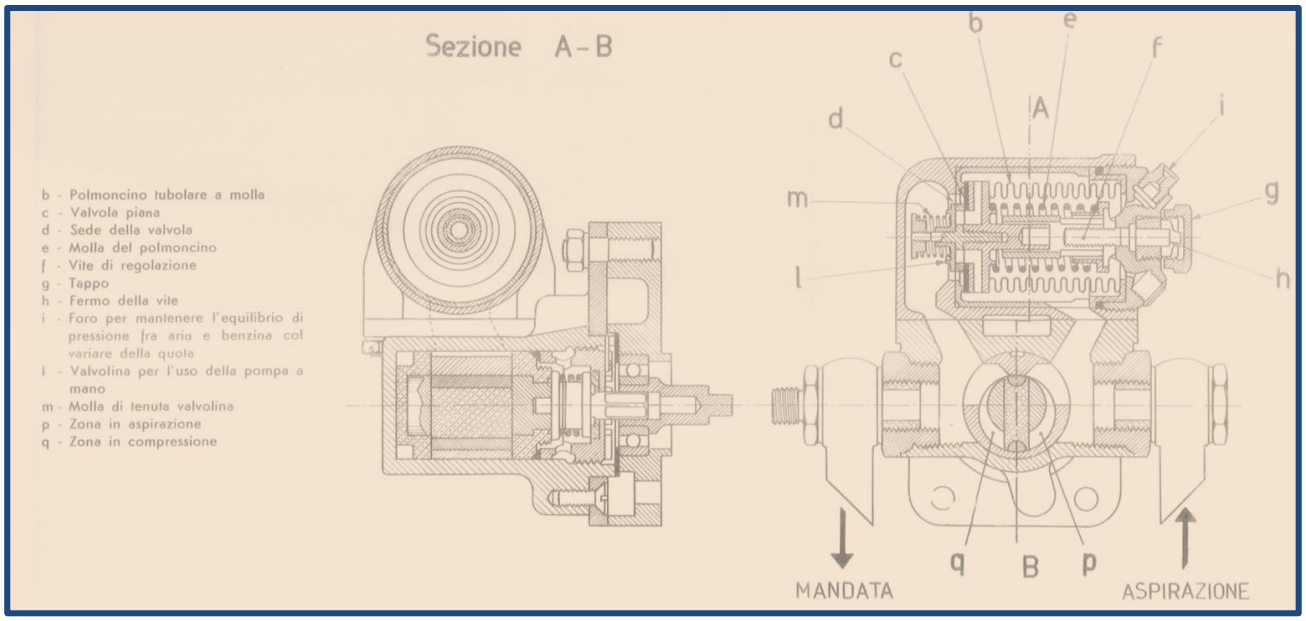
Poiché il motore PXI RC 40 è un motore a 4 tempi, ogni cilindro dovrà compiere il suo ciclo in due giri di rotazione dell'albero motore, cioè in 720°.

Essendo 14 i cilindri, due momenti identici dei cicli di due cilindri consecutivi (per esempio il cilindro 4 posteriore e il 9 anteriore) si succedono in un intervallo di:

$$\frac{720°}{14} = 51°\ 4'\ circa$$

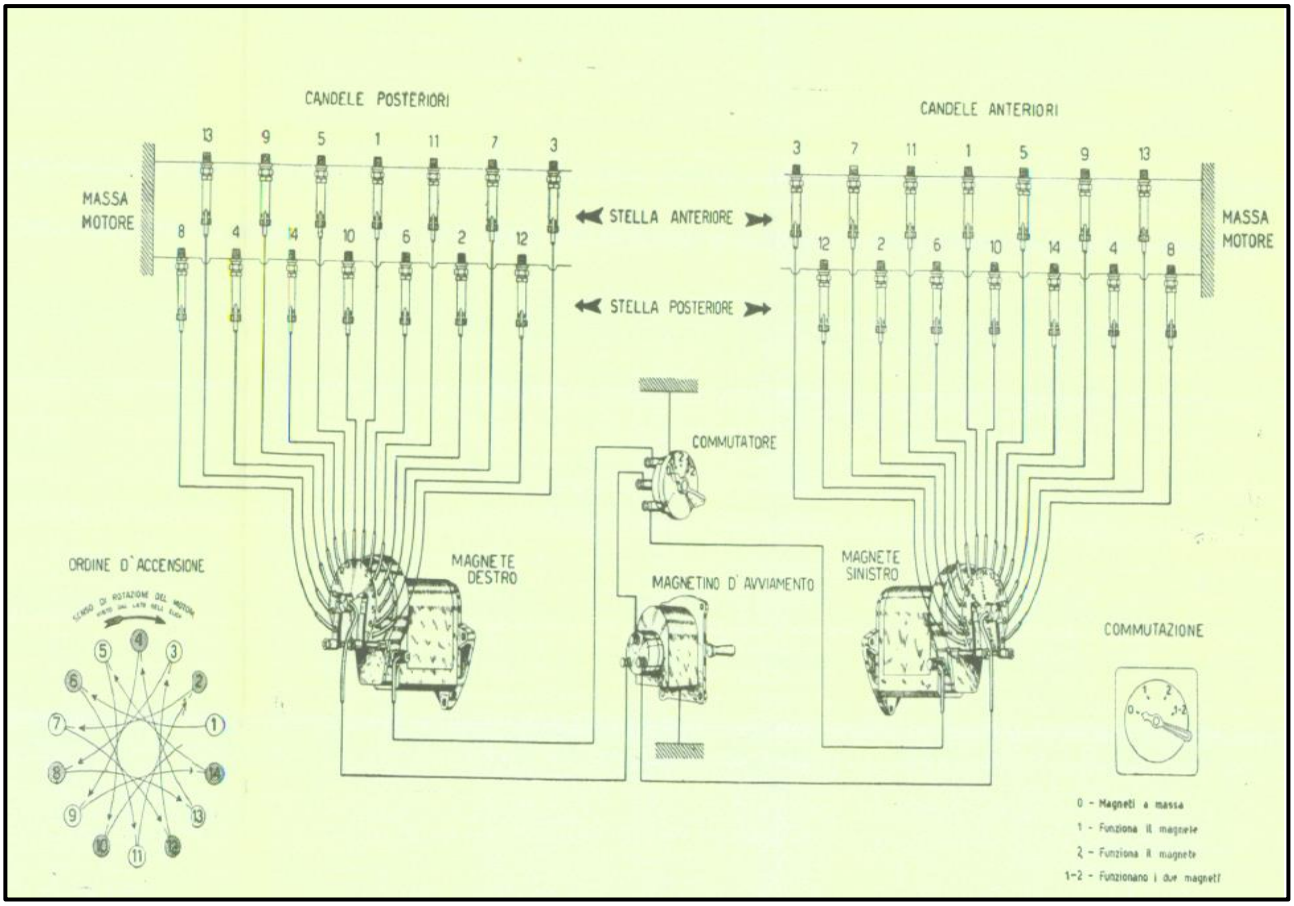
Alimentazione

Il motore PXI RC40 è alimentato da un carburatore Piaggio T 2/100/C munito di limitatore di pressione tipo I. La benzina è inviata al carburatore a mezzo di una pompa Romec tipo R_7 e l'aria è aspirata attraverso una presa d'aria ricavata di fusione, la quale consente l'applicazione di bocche di presa d'aria calda o fredda a seconda delle esigenze d' impiego.



La miscela è aspirata da un compressore centrifugo che la invia nella camera anulare del toro, e da questa viene convogliata nelle tubazioni di ammissione ai cilindri.

Accensione



L’accensione è comandata da due magneti fissati sul coperchio posteriore che assicurano la doppia accensione.

I magneti a 14 prese di corrente sono del tipo Marelli MF 14 a 4 scintille per giro.

Il ciclo del motore si compie in due giri di rotazione dell’albero motore durante i quali si deve dare successivamente l’accensione ai 14 cilindri del motore.

Le candele, in numero di due per cilindro, sono avvitate in bussole di bronzo avvitate a caldo e ribadite sulla testa.

Le candele sono situate sul piano longitudinale del cilindro, una anteriore e l’altra posteriore, sono inclinate e convergono al centro della camera di scoppio.

Lubrificazione

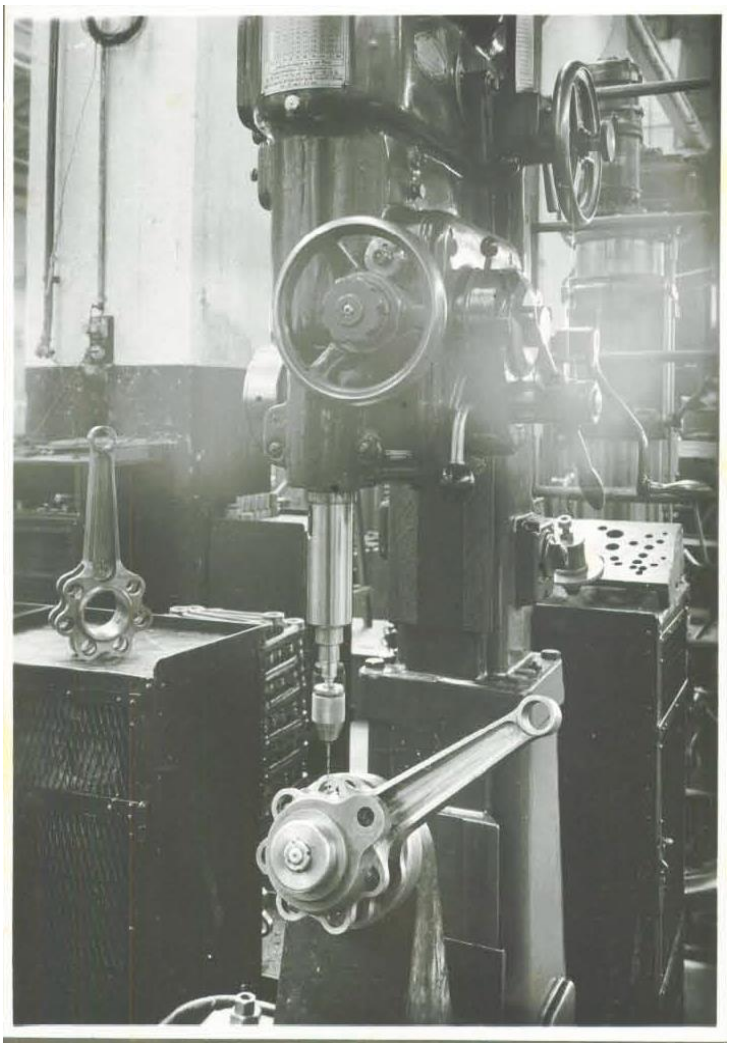
La lubrificazione del motore è a pressione ed è assicurata mediante due pompe ad ingranaggi, una di mandata ed una di recupero.

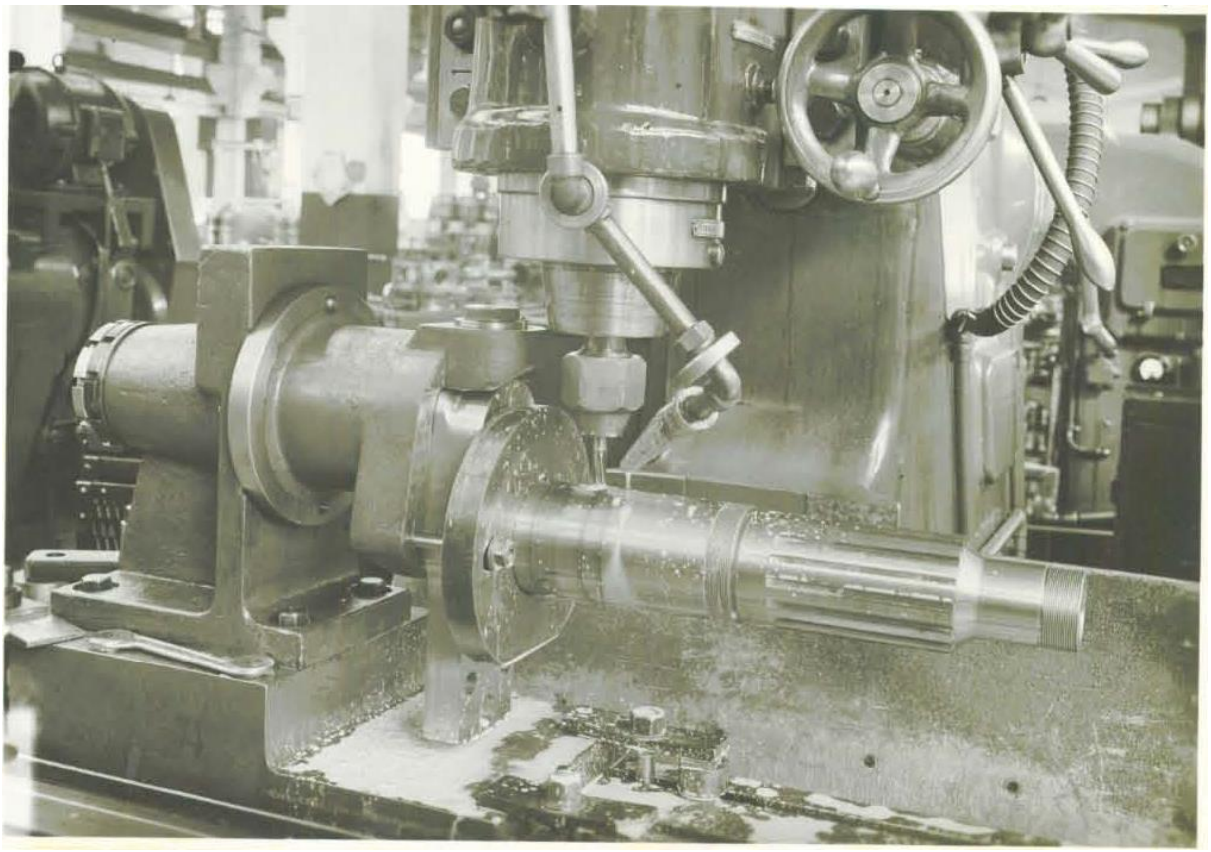
Tali pompe con corpo di alluminio, sono fissate al coperchio posteriore, applicato al toro. Sono simmetriche ed imperniate sullo stesso albero, il quale riceve il movimento dall’albero inclinato, a sua volta ingranato sull’albero intermedio.

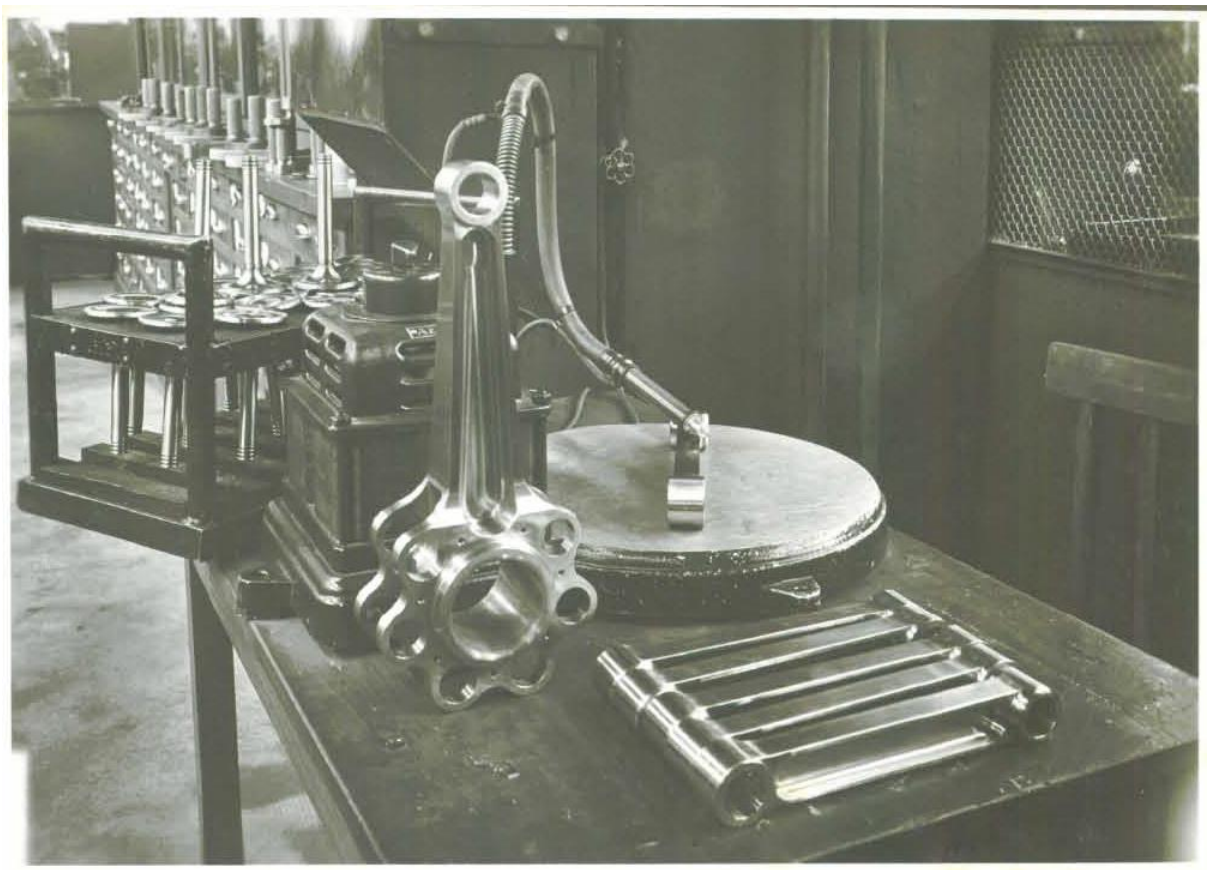
DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA Reggiane OMI

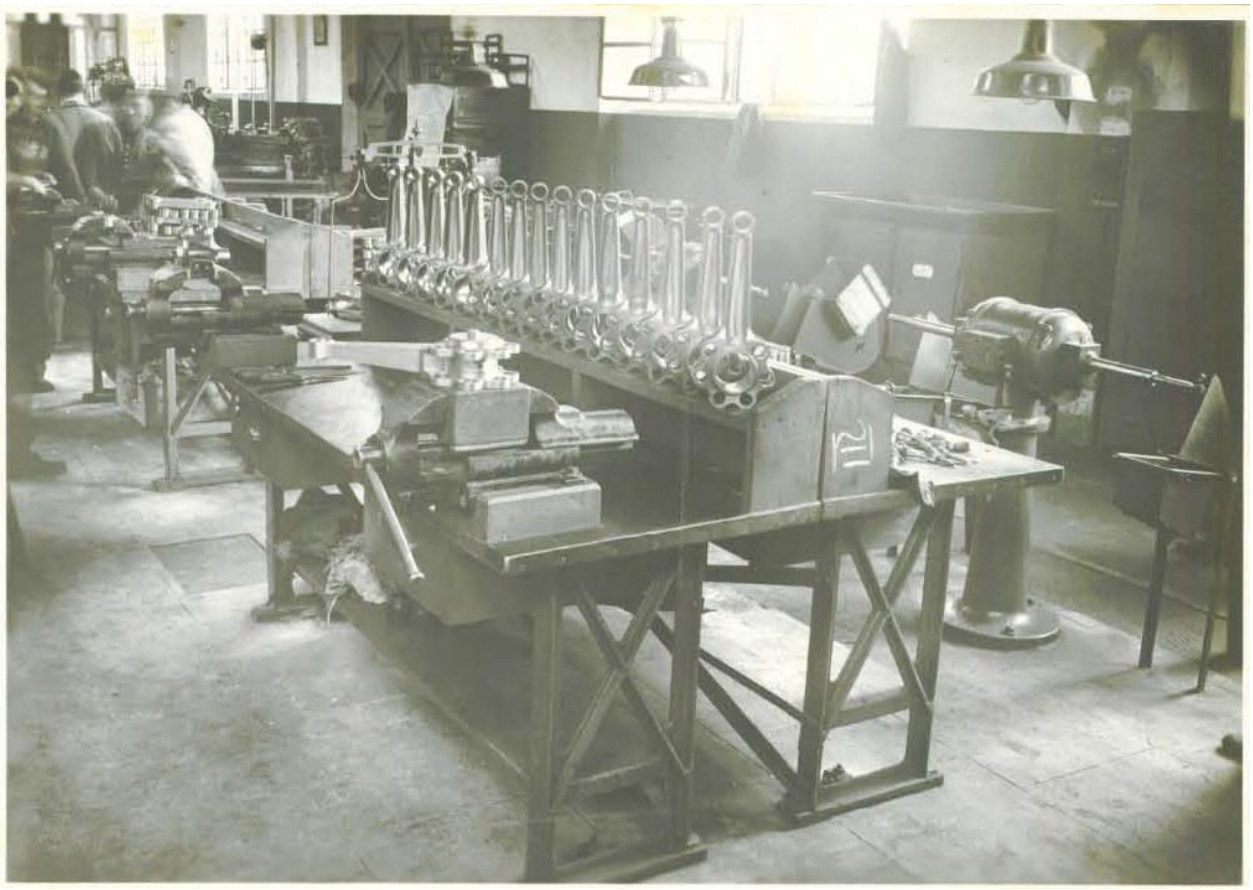
Le OMI Reggiane hanno rappresentato sul finire degli anni 30' la principale azienda italiana per la costruzione di aerei da guerra. La divisione aeronautica delle Reggiane cesserà di esistere solo nel 1945. Nelle foto sotto riportate sono rappresentate varie fasi di lavorazione e controlli di componenti speciali del motore, quali la biella madre e le biellette, i pistoni e l'albero motore .

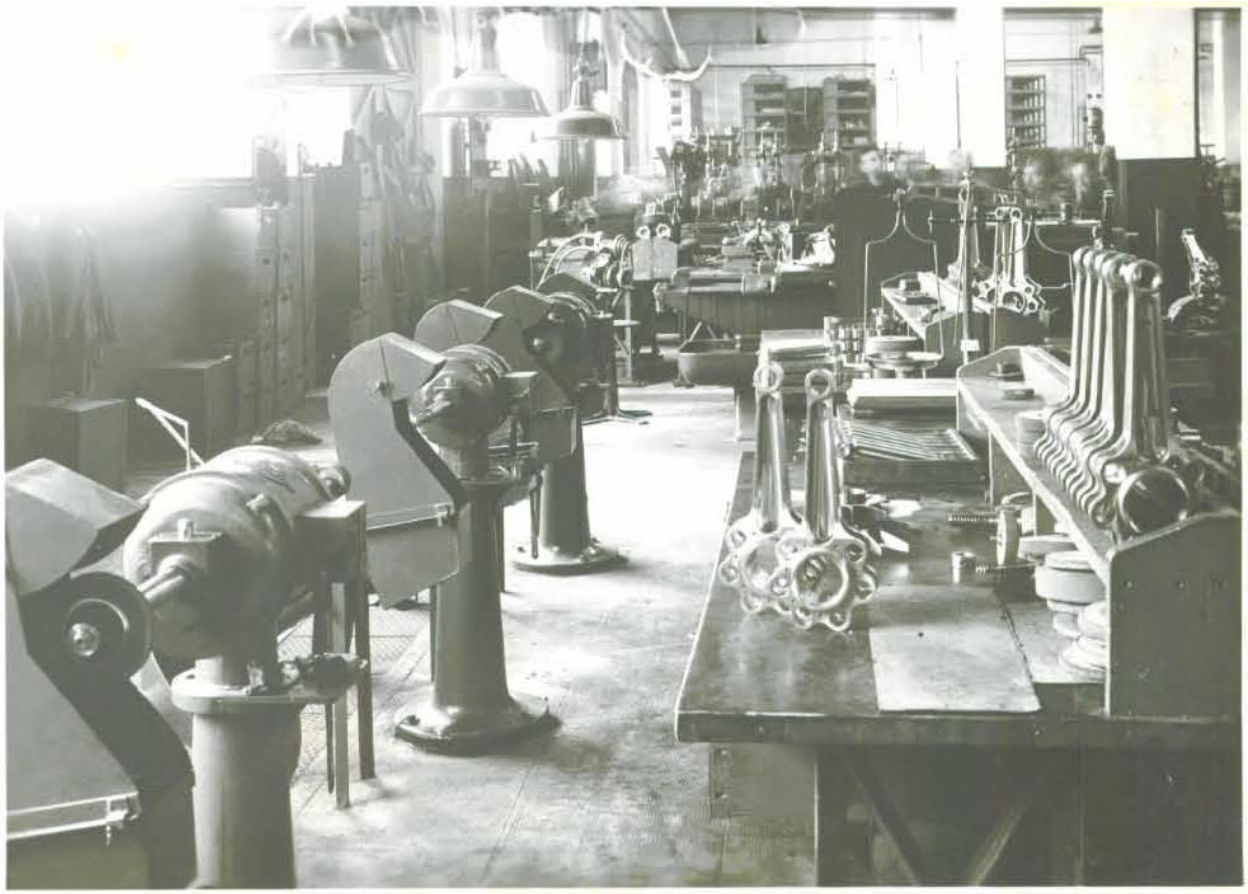
Esecuzione di fori trasversali per passaggio olio testa nella biella



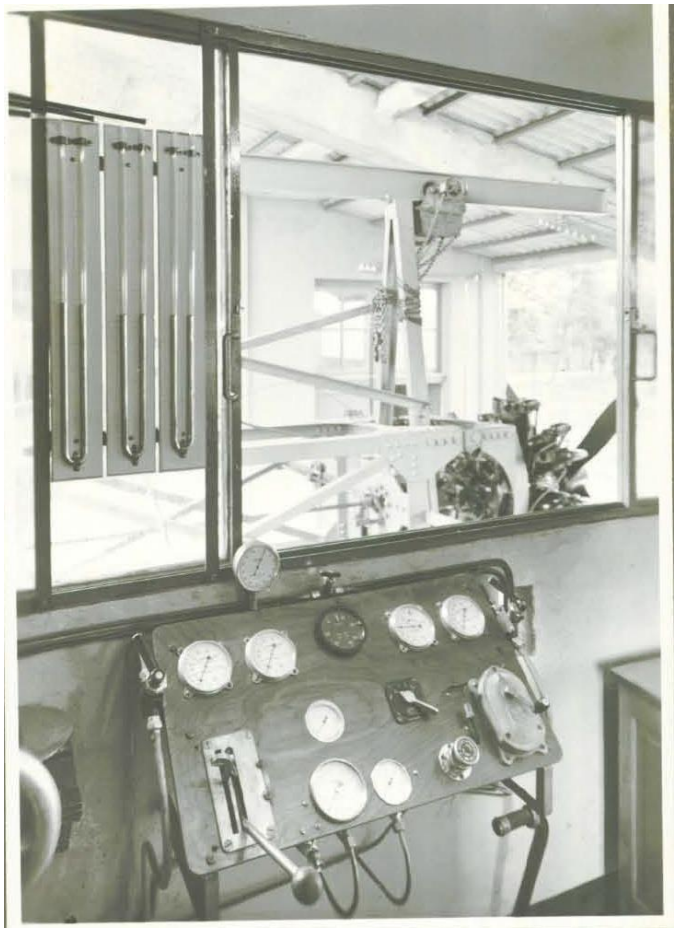




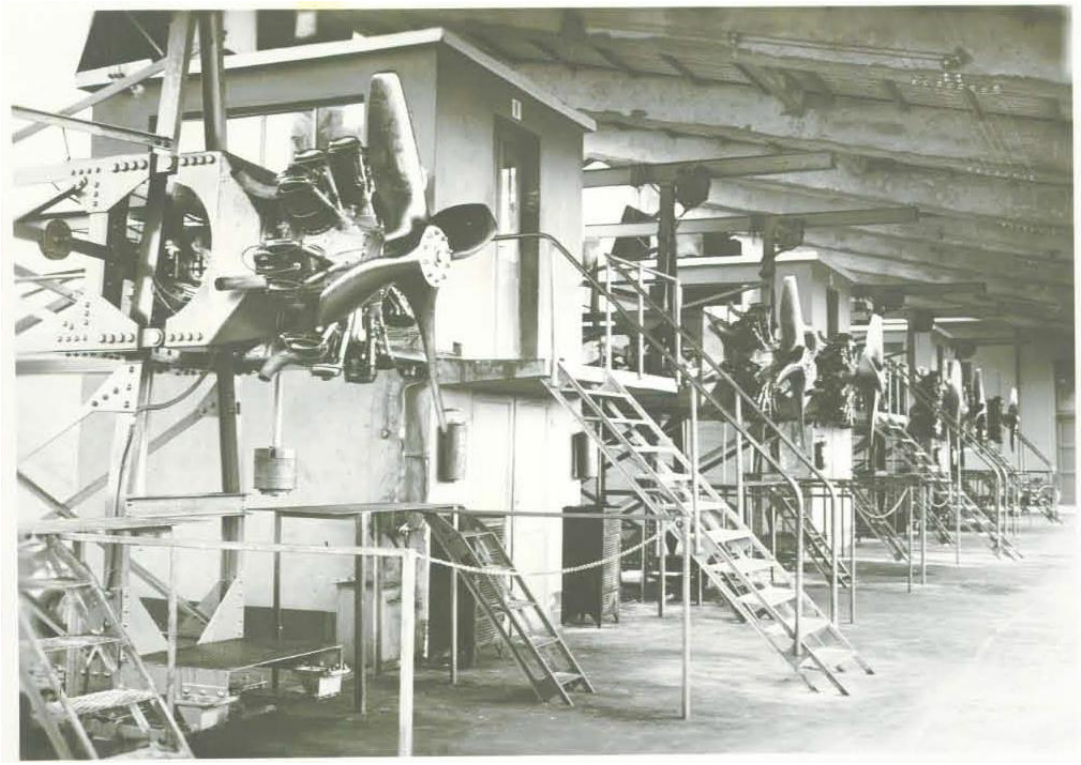




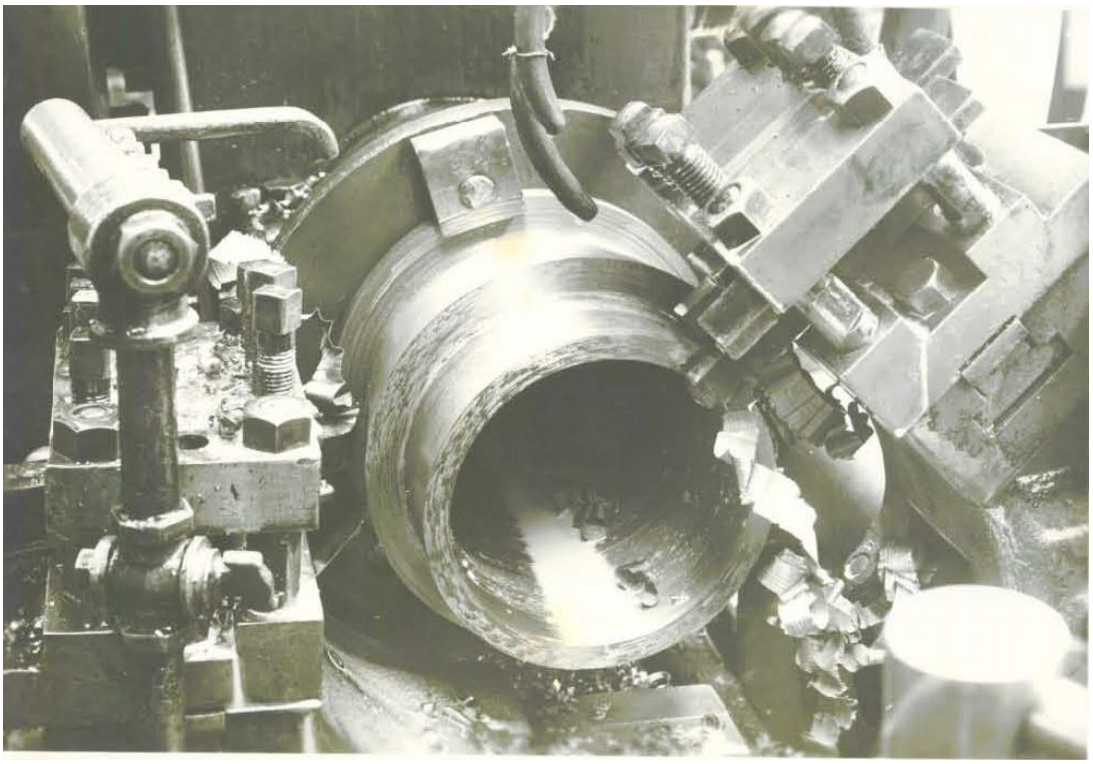
Alesatura fori per sedi cilindri sul corpo del motore



Cabina di comando e banco prova



Veduta generale della Sala Prova Motori



Tornitura esterna di sgrossatura del cilindro

CONCLUSIONI

Durante gli anni trenta si sviluppò un grande dibattito tecnico su quale delle due tipologie di motore, radiale o in linea, fosse migliore. Inizialmente il vantaggio sembrava andare al motore stellare, che divenne il principale motore utilizzato su molti veicoli civili e militari proprio grazie alla sua affidabilità, valore importante durante i voli su grandi superfici e per la sua leggerezza. In seguito soprattutto per i velivoli militari da caccia, e con la disponibilità di motori a V quali il Daimler-Benz DB 601 o il Rolls-Royce Merlin, sembrò che il motore ideale fosse costituito dal motore in linea, che permetteva di ottenere velivoli con linee aerodinamiche molto pulite.

Subito dopo il conflitto per breve tempo i caccia continuarono ad adottare un motore in linea, mentre i grossi velivoli lo stellare.

In campo aeronautico il motore stellare presenta non pochi **vantaggi**. Il raffreddamento del motore avviene utilizzando direttamente l'aria generata dal movimento del velivolo o dell'elica. Quindi non si rendono necessari sistemi di raffreddamento a liquido, con un notevole risparmio di peso. Un altro vantaggio sta nella modularità del progetto. Ad un certo punto del suo sviluppo, invece di incrementarne la potenza aumentando le dimensioni si preferì aggiungere file supplementari di cilindri. Questo permetteva di mantenere una certa facilità progettuale che si ripercuoteva anche in quella produttiva. Il poter realizzare un minor numero di componenti era economicamente vantaggioso e si rivelerà assai utile nella manutenzione dei velivoli impiegati nei conflitti.

La mancanza di un sistema di raffreddamento a liquido rende il motore radiale più semplice da costruire e mantenere, rispetto ad un motore in linea o a V. Questa sua semplicità lo rese più affidabile e, in combattimento, meno sensibile agli eventuali danneggiamenti. Nel caso che venga direttamente colpito un cilindro di una stella del motore radiale, sarà solo questo a perdere potenza, mentre in un motore in linea

o a V, caratterizzati da uno o più blocchi di cilindri, perderà potenza l'intero blocco. Questi vantaggi - leggerezza ed affidabilità – ne facilitarono e ne consigliarono l'uso sui velivoli.

Il motore stellare però presenta anche due grandi **svantaggi**. Il primo è dato dalla maggiore resistenza aerodinamica che genera in quanto necessita, a causa della sua forma, di una sezione frontale maggiore di quella di un equivalente motore in linea. Inoltre nel caso si voglia adottare la sovralimentazione, l'aria compressa, dopo il passaggio nel compressore o nella turbina, dovrà essere portata ad ogni singolo cilindro, mentre nel motore in linea o a V sarà necessario un solo condotto per un intero blocco di cilindri.
Il più grande motore radiale aeronautico mai realizzato in serie, come si è già accennato, fu lo statunitense Pratt & Whitney R-4360 Wasp Major. Il motore, che era dotato di 28 cilindri disposti su quattro stelle e poteva fornire una potenza di 3.500 hp (2.610 kW), venne utilizzato sui più grandi velivoli, militari prima e civili poi, dell'ultimo periodo dei velivoli a motore a pistoni.

Concludendo, la Seconda Guerra Mondiale dimostrò che non esisteva un tipo di motore migliore in assoluto, ma uno più adatto di un altro in base al tipo di impiego del velivolo: infatti spesso gli aerei da assalto (o attacco al suolo) e i bombardieri adottavano motori stellari per il carico utile e la robustezza ai colpi del nemico ed anche per l'affidabilità nei voli a lungo raggio; i caccia, invece, privilegiavano le velocità e, quindi, preferivano motori in linea.
Tuttavia in pochi anni lo sviluppo dei motori a getto, introdotti dagli ingegneri tedeschi con lo Junkers Jumo 004 che equipaggiava il Messerschmitt Me 262, pose definitivamente fine allo sviluppo dei grandi motori a scoppio per l'aeronautica.

Bibliografia

(testo) "*Motore per aeromobili*", Bibbo A. R.

(testo) "*Motori per aeromobili*", Ghezzi U.

(testo) "*Macchine*", Cantore G.

(testo) "*Disegno di macchine*", Speluzzi M. e Tessarotto M.

(testo) "*Dall'elica al getto – Breve storia dei propulsori aeronautici*", Filippi F.

(documento) "Manuale nomenclatore RE 2000 serie 0"

(documento) "Manuale uso e manutenzione motore Piaggio PXI RC 40 D-S 1938"

(documento) " Album fotografico Motori stellari Reggiane 1940 "