

## 7 Motore alternativo e elica

7.1	Motore a combustione interna alternativo
7.2	L'elica
	Bibliografia

Seguendo lo sviluppo storico della propulsione in campo aeronautico, vengono presentati in questo capitolo le caratteristiche del motore alternativo – potenza erogata in funzione delle grandezze tipiche di volo come quota, comando motore, ecc. tralasciando gli aspetti termodinamici –, e l'elica come strumento che trasforma potenza in trazione. Considerazioni finali illustreranno l'accoppiamento tra i due sistemi e con l'intero velivolo.

### 7.1 Motore a combustione interna alternativo

Il motore alternativo è stato per molti anni, dall'inizio dell'aviazione fino agli anni immediatamente successivi alla seconda guerra mondiale, in pratica l'unico sistema utilizzato in campo aeronautico. Al giorno d'oggi è essenzialmente utilizzato nel campo dell'aviazione generale e leggera.



Figura 7.1.1 Esempio di motore alternativo

La potenza erogata da tali motori dipende:

- dal numero di giri. Il numero di giri risulta in genere compreso tra i 2000 e 3000 giri al minuto. Con tale valore è possibile evitare l'uso di riduttori o, se necessario, l'impiego di riduttori di minime dimensioni e peso per ridurre il numero di giri della pala al fine di non incorrere in seri fenomeni di comprimibilità all'estremità della pala stessa. In corrispondenza di tale numero di giri si ha anche il minimo valore del consumo specifico. La potenza cresce all'aumentare del numero di giri.
- dalla pressione di alimentazione (manifold pressure) ovviamente funzione della valvola di regolazione dell'aria (*air throttle*), la farfalla. La pressione di alimentazione è di fatto legata alla quantità d'aria elaborata dal cilindro.
- dal rapporto ponderale aria-combustibile (il titolo della miscela: miscela ricca o miscela povera).
- dalla quota. La potenza diminuisce con la quota di volo per effetto della diminuita densità dell'aria. Una formula empirica porta a esprimere la potenza alla generica quota  $z$  come

$$\frac{P_z}{P_0} = 1,1325 \frac{\rho_z}{\rho_0} - 0,1325 \tag{7.1.1}$$

dove i pedici 0 e z si riferiscono ai valori a quota zero e alla quota generica z. Assumiamo che la densità relativa sia espressa nell'ambito del modello di atmosfera tipo internazionale.

- è sostanzialmente indipendente dalla velocità di volo

Il dato di potenza riportato si riferisce alla potenza all'albero motore (SHP *Shaft Horse Power* o BSHP *Brake Shaft Horse Power*) e si misura in kW nel sistema internazionale anche se molto spesso viene espressa in hp (1 hp= 0,7457 kW). Il consumo specifico (SFC *Specific Fuel Consumption* o BSFC *Brake Specific Fuel Consumption*) è la quantità di carburante consumata nell'unità di tempo e per unità di potenza erogata dal propulsore. Si misura in N/(W s) (o N/(kW h)) nel sistema internazionale o in gr/(hp h) (o lb/(hp h)) nel sistema inglese. Il consumo specifico si aggira intorno ai 250-280 gr/(hp h) per i regimi di piena potenza sino ai 210-220 gr/(hp h) per i regimi di crociera con miscele magre e si può considerare costante al variare della velocità di volo e della quota.

Le prestazioni di un motore aeronautico sono rappresentate attraverso le cosiddette curve di calibratura a livello del mare. Tali curve sono delle linee a numero di giri costante riportate in un diagramma avente in ascisse la pressione di alimentazione (la cui variazione è ottenuta agendo sulla farfalla) ed in ordinata la potenza del motore. Tali curve sono sensibilmente rettilinee, cioè a numero di giri costanti, la potenza varia circa linearmente con la pressione di alimentazione.

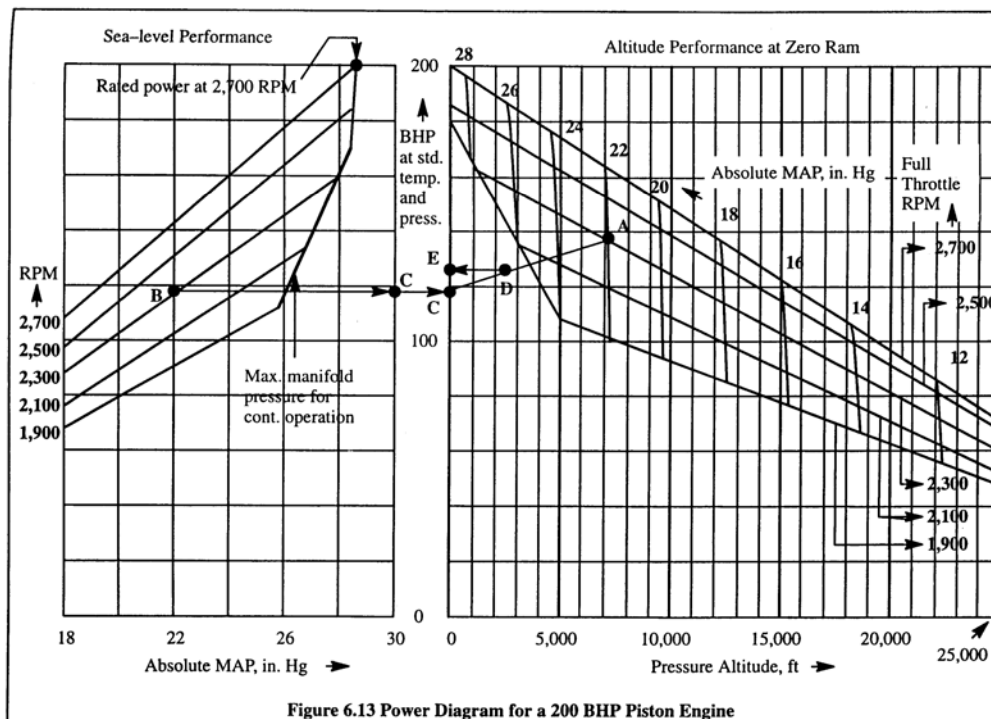


Figura 7.1.2 Legame tra potenza erogata, numero di giri e quota [1]

Le curve che danno le prestazioni del motore al variare della quota sono in genere del tipo riportato in figura 7.1.2. Come si vede in ordinata si hanno la potenza e in ascissa la quota; sul diagramma sono poi riportate le linee che danno la variazione della potenza con la quota a numeri di giri costante. Nei diagrammi sono anche riportate le linee a pressione di alimentazione costante. Si noti che le curve del tipo sopra riportato si riferiscono alle cosiddette condizioni di piena emissione (cioè di farfalla del carburatore completamente aperta, in modo da fare entrare la maggiore quantità possibile di miscela); in queste condizioni la variazione della pressione di alimentazione è dovuta essenzialmente alla variazione di quota e di numero di giri, e non ad una diversa regolazione del motore.

In base alle formule precedentemente presentate è ad ogni modo possibile calcolare la potenza ad ogni quota di interesse. Interessa però senz'altro rilevare che l'andamento della potenza in funzione della densità relativa, da cui si risale immediatamente alla quota, è circa rettilineo, per cui una volta determinata la potenza a quota zero, si può risalire al suo andamento in funzione della quota.

Come esempio troviamo la potenza disponibile a 2300 RPM alla pressione di alimentazione di 22 inHg<sup>1</sup> alla quota di 2500 ft e ad una temperatura di 20° superiore alla temperatura standard ISA.

1. Individuare il punto A in corrispondenza della condizione di piena ammissione al numero di giri desiderato e alla pressione di alimentazione voluta
2. A livello del mare si individuano per gli stessi valori i punti B e C
3. Si collega il punto A con C
4. Si determina il punto D alla quota desiderata
5. Correzione per effetto della temperatura. I dati sono sempre forniti supponendo di operare in aria tipo. Nel caso di diversa temperatura rispetto alla temperatura  $T_{ISA}$  della quota in esame rispetto al modello standard di atmosfera, la potenza diventa

$$P_E = P_E^{ISA} \sqrt{\frac{T_{ISA}}{T}} = P_E^{ISA} \sqrt{\frac{T_{ISA}}{T_{ISA} + \Delta T}} \quad (7.1.2)$$

Per ovviare alla diminuita potenza con la quota sono stati sviluppati negli anni passati i motori turbocompressi.

## 7.2 L'elica

Le eliche sono costituite da un certo numero di pale collegate ad un mozzo, attraverso il quale il motore trasmette la coppia che tiene in rotazione la stessa elica. Con l'elica assistiamo ad un processo di conversione di potenza fornita dall'albero motore in trazione. Il meccanismo è in pratica lo stesso di un'ala, tanto da poter affermare che una pala di un'elica è sostanzialmente un'ala opportunamente svergolata posta in rotazione.

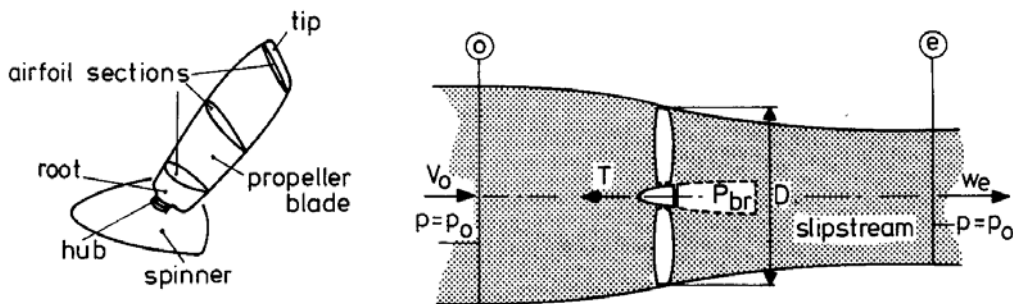


Figura 7.2.1 Il sistema propulsivo elica [2]

Nell'ipotesi che la potenza fornita dal motore sia indipendente dalla velocità di volo, e potendo anche ritenere il rendimento propulsivo circa costante, si ricava che

$$\eta_p = \frac{TV}{P} \Rightarrow T = \frac{\eta_p P}{V} \quad (7.2.1)$$

da cui emerge che la trazione diminuisce con la velocità di volo come si evince anche dalla figura 7.2.2. Notiamo pure che l'elica genera trazione a punto fisso, cioè a velocità nulla.

<sup>1</sup> Si ha che 1 bar è pari a 29.54 in. Hg

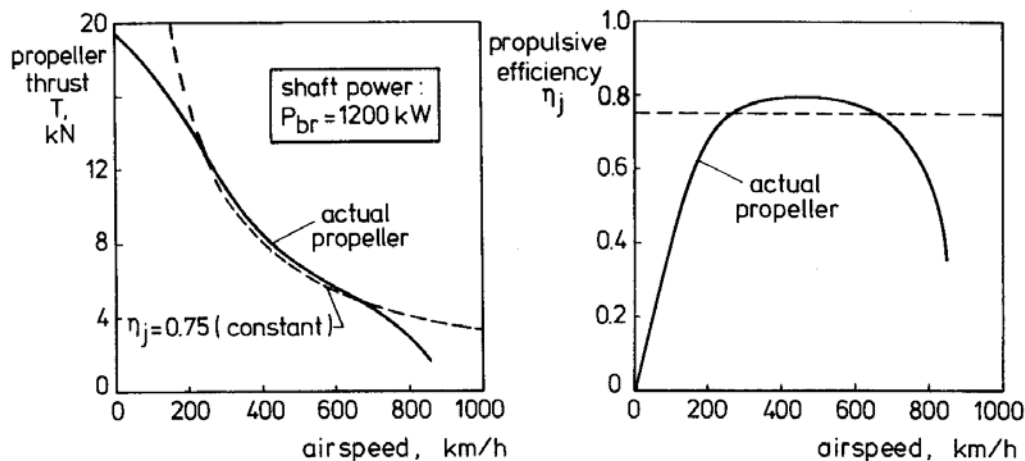


Figura 7.2.2 Trazione e rendimento dell'elica in funzione della velocità[2]

L'ipotesi di rendimento costante non diventa quando si raggiungono velocità di volo di 600-700 Km/h. Ciò si deve imputare al fatto che in prossimità dell'estremità delle pale si manifestano significativi fenomeni di comprimibilità. Poniamoci in corrispondenza dell'estremità della pala di un elica di diametro  $D$ , che ruota a  $n$  giri al secondo su un aereo in volo alla velocità  $V$ , a una quota dove la velocità del suono risulti  $a$ . Nella trattazione si ammetterà che l'asse di rotazione dell'elica sia sempre diretto come il vettore velocità di avanzamento, e cioè che l'elica funzioni in corrente assiale. La velocità periferica  $V_t$  all'estremità della pala risulta

$$V_t = \sqrt{V^2 + (\omega R)^2} = \sqrt{V^2 + (\pi n D)^2} \quad (7.2.2)$$

e il numero di Mach

$$M_t = \frac{V_t}{a} = \frac{\sqrt{V^2 + (\pi n D)^2}}{a} \quad (7.2.3)$$

che può facilmente raggiungere valori vicino all'unità<sup>2</sup>.

La formazione di onde d'urto sulle estremità delle pale, oltre a determinare fenomeni vibratorici che possono essere pericolosi per l'integrità dell'elica e del motore, comporta di regola cospicui incrementi della resistenza aerodinamica che dette sezioni incontrano nel loro moto, con indubbi incrementi della coppia frenante fornita dall'elica, diminuzione della trazione ottenibile, ed in definitiva sensibili cali di rendimento.

I profili lungo la pala e la stessa geometria della pala sono progettati in modo tale da ridurre o ritardare tali effetti, che tuttavia costituiscono un limite del sistema propulsivo ad elica che una attenta progettazione della pala cerca di superare ma che comunque porta a rendere fattibile l'impiego dei sistemi propulsivi ad elica fino a numeri di Mach di volo di circa 0,6-0,7.

Per determinare le caratteristiche dall'elica possiamo basarci sul bilancio globale utilizzando il teorema della quantità di moto oppure analizzare il comportamento aerodinamico delle singole pale a partire dalla generica sezione utilizzando la teoria dell'elemento di pala. Dal primo approccio possiamo trarre conclusioni generali in merito al comportamento globale dell'elica, mentre il secondo, più complesso ed articolato consente di meglio sviscerare il comportamento della pala e diventa anche strumento di progetto. Sarà così possibile introdurre i diagrammi relativi alle prestazioni delle eliche in termini di trazione, coppia e potenza assorbita.

<sup>2</sup> Consideriamo un velivolo in moto alla velocità di 120 m/s, l'elica ha diametro di 2.2 m e la velocità di rotazione è 40 giri al secondo. Si ricava  $V_t = \sqrt{120^2 + (3.14 * 2 * 40 * 1.1)^2} = 301.5 \text{ m/s}$  che, a quota zero metri, porta a un numero di Mach di circa 0,88.

## 7.2.2 Teoria del disco attuatore

Un'interessante rappresentazione del fenomeno propulsivo dell'elica può essere fornita dal teorema di Froude. Siamo in condizioni stazionarie, l'elica si suppone funzionare in corrente assiale, avere un numero infinito di pale di resistenza passiva nulla, non essere causa di fenomeni dissipativi di origine viscosa né oggetto di fenomeni di comprimibilità. La teoria si basa sull'espressione della trazione ottenuta sia sfruttando il principio della variazione di quantità di moto determinata dall'elica nella corrente fluida interessata, sia considerando la differenza di pressione che si stabilisce tra le due facce del disco dell'elica stessa. E' lo schema noto in letteratura col termine di disco attuatore.

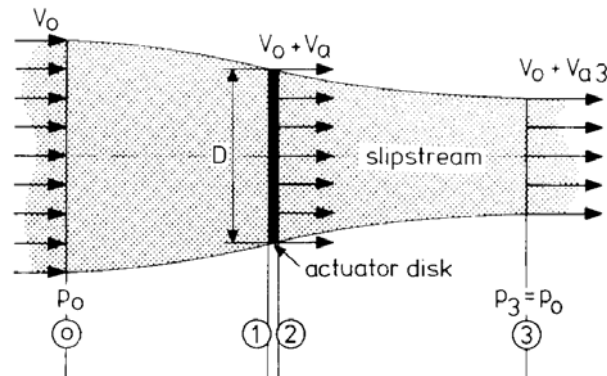


Figura 7.2.3 Tubo di flusso [2]

Considerando allora il disco dell'elica come una sezione del tubo di flusso costituito dall'aria interessata dall'elica stessa, disposta tra le sezioni indicate come 1 e 2, ed indicando come 0 e 3 le sezioni del tubo di flusso rispettivamente all'infinito a monte ed all'infinito a valle, la conservazione della massa dell'aria, di densità  $\rho$ , che fluisce nel tubo citato, si esprime come

$$\rho_0 A_0 V_0 = \rho_1 A_1 V_1 = \rho_2 A_2 V_2 = \rho_3 A_3 V_3 \quad (7.2.4)$$

e dato che la densità dell'aria è per ipotesi costante, anche come

$$A_0 V_0 = A_1 V_1 = A_2 V_2 = A_3 V_3 \quad (7.2.5)$$

Non potendosi d'altronde ammettere che tra le due sezioni 1 e 2 del tubo di flusso, infinitamente vicine, possa esservi una variazione finita di velocità (che comporterebbe una variazione pure finita della sezione del tubo di flusso) si ha poi

$$V_1 = V_2 \quad (7.2.6)$$

Nel tronco del tubo di flusso che va dall'infinito a monte sino alla faccia anteriore del disco dell'elica è poi applicabile il teorema di Bernoulli (la sezione corrispondente al disco dell'elica, attraverso la quale viene immessa energia nella corrente deve essere esclusa dal campo di validità dell'espressione), che, può scriversi nella forma

$$p_0 + \frac{1}{2} \rho V_0^2 = p_1 + \frac{1}{2} \rho V_1^2 \quad (7.2.7)$$

mentre analogamente, nel tronco di tubo di flusso che va dalla sezione 2 alla sezione 3, si ha

$$p_2 + \frac{1}{2} \rho V_2^2 = p_3 + \frac{1}{2} \rho V_3^2 \quad (7.2.8)$$

Assumendo come sezioni asintotiche del tubo di flusso quelle in cui la pressione assume identico valore

$$p_0 = p_3 \quad (7.2.9)$$

la trazione fornita dall'elica può venire espressa in base alla variazione della quantità di moto della portata d'aria interessata dall'elica stessa, valutata appunto tra l'infinito a monte e l'infinito a valle. Risulta perciò, esprimendo la portata in massa  $\dot{m}$  elaborata dal disco dell'elica in base ai parametri relativi alla sezione 1 del tubo di flusso

$$T = \dot{m}(V_3 - V_0) = \rho A_1 V_1 (V_3 - V_0) \quad (7.2.10)$$

mentre è anche evidente che la medesima trazione può considerarsi ottenuta, in base alla differenza tra le pressioni che agiscono sulle due facce del disco dell'elica (con  $A_1$  coincidente con  $A_2$ ), dalla

$$T = A_1 (p_2 - p_1) \quad (7.2.11)$$

e con  $T/A$  che prende il nome di carico sul disco. D'altra parte, dalle 7.2.7 e 7.2.8 si ottiene

$$p_1 = p_0 + \frac{1}{2} \rho (V_0^2 - V_1^2) \quad (7.2.12)$$

$$p_2 = p_3 + \frac{1}{2} \rho (V_3^2 - V_2^2) \quad (7.2.13)$$

e quindi, sostituendo nella 7.2.11, si ha

$$T = A_1 \frac{1}{2} \rho (V_3^2 - V_0^2) \quad (7.2.14)$$

ricordando la 7.2.9 e la 7.2.7. Uguagliando allora la 7.2.10 e la 7.2.14, si ottiene

$$T = \dot{m}(V_3 - V_0) = \rho A_1 V_1 (V_3 - V_0) = A_1 \frac{1}{2} \rho (V_3 - V_0)(V_3 + V_0) \quad (7.2.15)$$

e quindi, semplificando

$$V_1 = \frac{V_3 + V_0}{2} \quad (7.2.16)$$

che esprime come la variazione di velocità assiale  $\Delta V$  impressa dalla elica all'aria che scorre nel tubo di flusso da essa interessato si manifesti per metà dall'infinito a monte al disco dell'elica, e per metà dal disco dell'elica all'infinito a valle. Si può rilevare che, nella pratica, condizioni ragionevolmente prossime a quelle asintotiche possono riscontrarsi a distanze relativamente modeste dal disco attuatore (indicativamente due diametri a monte e quattro a valle), ciò che può consentire, per esempio, una valutazione sbrigativa degli effetti del soffio dell'elica sui piani di coda di un aereo. Il risultato trovato vale, ovviamente, anche nell'ipotesi in cui la velocità asintotica a monte  $V_0$  sia nulla, cioè nel caso di elica funzionante a punto fisso. Può essere infine interessante esaminare l'andamento dei diagrammi delle velocità e delle pressioni lungo il tubo di flusso, potendosi rilevare che, mentre la velocità costantemente aumenta procedendo dall'infinito a monte verso quello a valle, la pressione corrispondentemente decresce, presentando però una discontinuità in corrispondenza della sezione in cui è disposto il disco attuatore.

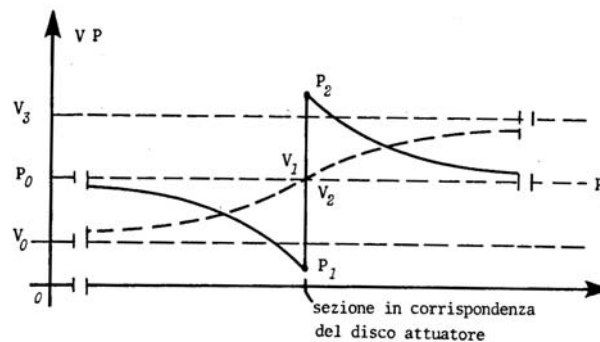


Figura 7.2.4 Trazione e rendimento dell'elica in funzione della velocità

Il rendimento propulsivo diventa

$$\eta_P = \frac{P_A}{P} = \frac{\dot{m}_1(V_3 - V_0)V_0}{\frac{1}{2}\dot{m}_1(V_3^2 - V_0^2)} = \frac{\dot{m}_1(V_3 - V_0)V_0}{\frac{1}{2}\dot{m}_1(V_3 - V_0)(V_3 + V_0)} = \frac{2V_0}{(V_3 + V_0)} = \frac{V_0}{V_1} = \frac{V_0}{V_0 + \Delta V/2} \quad (7.2.17)$$

Questa è una stima ottimistica dell'efficienza, poiché non tiene conto delle perdite di natura viscosa, della quantità di energia sottratta per i moti vorticosi della scia e poiché la trazione non è mai uniformemente distribuita sul disco dell'elica.

### 7.2.3 Teoria dell'elemento di pala

Per una conoscenza completa delle caratteristiche dell'elica, è necessario, a questo scopo, poter valutare le forze aerodinamiche che, sezione per sezione, si manifestano su un'elica in conseguenza del suo movimento. Se, per una generica sezione, si traccia il triangolo delle velocità, ove  $\omega r$  è la velocità dovuta alla rotazione che varia con legge lineare lungo la pala,  $V_0$  quella di avanzamento (identica per tutte le sezioni dell'elica) e  $V_r$  la velocità risultante dalla somma vettoriale delle due, si ha

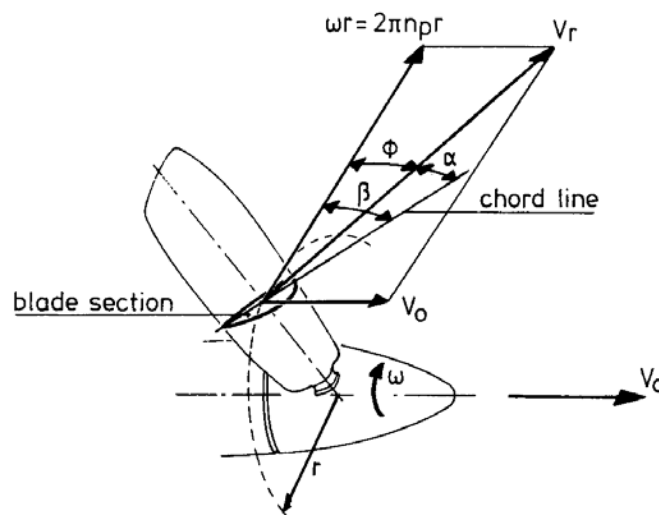


Figura 7.2.5 Triangolo delle velocità in una generica sezione della pala [2]

$$V_r = \sqrt{V_0^2 + (\omega r)^2} = \sqrt{V_0^2 + (2\pi n_p r)^2} \quad (7.2.18)$$

L'angolo  $\beta$ , compreso tra una direzione di riferimento del profilo in corrispondenza della generica sezione della pala ed il piano di rotazione dell'elica è una caratteristica geometrica della pala.

L'angolo  $\phi$  si ricava dalla relazione

$$\tan \phi = \frac{V}{2\pi n_p r} \quad (7.2.19)$$

e ovviamente varia lungo la pala. Si indica con  $n_p$  il numero di giri al secondo dell'elica.

L'angolo di incidenza  $\alpha$  risulta

$$\alpha = \beta - \phi \quad (7.2.20)$$

e da esso dipenderanno le caratteristiche aerodinamiche, e di fatto la forza aerodinamica, in corrispondenza della generica sezione della pala. La forza aerodinamica in una generica sezione dipenderà inoltre dalla velocità relativa e dalla corda locale<sup>3</sup>.

Si può allora constatare che, per un'elica assegnata, l'incidenza cui una sezione si trova a funzionare viene a dipendere esclusivamente dall'angolo  $\phi$ , e cioè dal rapporto  $V/(2\pi n_p r)$ , dal quale vengono a dipendere i coefficienti adimensionali che individuano le caratteristiche aerodinamiche della sezione stessa.

Poiché detto rapporto può venire trascritto

$$\frac{V}{2\pi n_p r} = \frac{V}{n_p D} \frac{D}{2r\pi} \quad (7.2.21)$$

si può constatare che, sezione per sezione (cioè per i diversi valori di  $D/(2r)$ ), le caratteristiche aerodinamiche dell'elica risultano funzione del rapporto

$$J = \frac{V}{n_p D} \quad (7.2.22)$$

noto come rapporto di funzionamento dell'elica ( $J = \text{advance ratio}$ ).

Dopo una rivoluzione della pala, l'elica è avanzata di una certa distanza in direzione del moto,

$$p = 2\pi r \tan \beta \quad (7.2.23)$$

che prende il nome di passo. Il passo  $p$  è il segmento definito su una generatrice del cilindro di raggio  $r$  dalla linea elicoidale tracciata sulla superficie cilindrica dall'elica geometrica di raggio  $r$ .

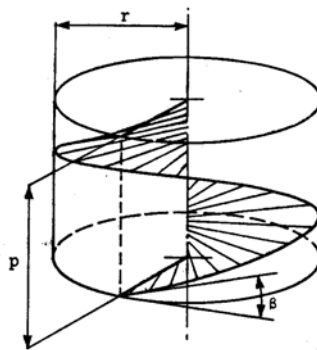


Figura 7.2.6 Legame passo, raggio,  $\beta$

Poiché emerge chiaramente che, per effetto della velocità di rotazione che varia con la posizione della sezione lungo la pala, risulta che l'incidenza varia da sezione a sezione, per ottenere un adeguato comportamento aerodinamico occorre svergolare la pala lungo la sua lunghezza, andando, di fatto, a variarne anche il passo.

Si definisce perciò convenzionalmente come passo il passo della sezione della pala al 70% (convenzione generalmente adottata in Italia) o al 75% (convenzione generalmente seguita negli Stati Uniti) del raggio della pala. L'angolo  $\beta$  della sezione assunta come riferimento per il passo viene solitamente denominato angolo di calettamento.

Si può infine precisare che solitamente le sezioni di una pala di elica sono costituite da profili piano convessi, salvo che in prossimità del mozzo dove per motivi costruttivi questi si evolvono verso profili biconvessi ad elevato spessore relativo. Si può inoltre aggiungere che i valori di  $\beta$  di norma diminuiscono andando dalla radice all'estremità della pala, e che pure decrescente lungo il raggio è lo spessore relativo della pala, sia per evidenti motivi costruttivi, sia per motivi aerodinamici. Un'elica,

<sup>3</sup> In questa presentazione non viene preso in esame l'effetto della velocità indotta dalla scia dell'elica in corrispondenza della pala, in analogia al caso dell'ala e della sua scia. L'obiettivo è, infatti, introdurre i concetti fondamentali lasciando ad altri corsi l'approfondimento delle problematiche connesse alle pale.



disposta sulla prua di un aereo, viene detta destra se il pilota la vede girare in senso orario, e sinistra nel caso di rotazione antioraria; in entrambi i casi l'elica mostra al pilota la superficie del ventre delle pale.

La forza aerodinamica elementare  $dR$  che viene a prodursi su un elemento di pala d'elica, secondo le classiche leggi dell'aerodinamica, risulta proporzionale alla densità dell'aria  $\rho$ , alla superficie dell'elemento di pala di corda  $c$  e di apertura  $dr$ , ed al quadrato della velocità  $V_r$  relativa aria-elemento di pala, oltre che dipendere da un coefficiente caratteristico adimensionale  $C$

$$dR = \frac{1}{2} \rho V_r^2 c dr C \quad (7.2.24)$$

Il coefficiente dipende, come nel caso dell'ala, dalla forma del profilo dell'elemento di pala in esame, dalla sua incidenza e quindi, per un'elica assegnata, esclusivamente dal rapporto di funzionamento, e ovviamente dal numero di Reynolds e del numero di Mach

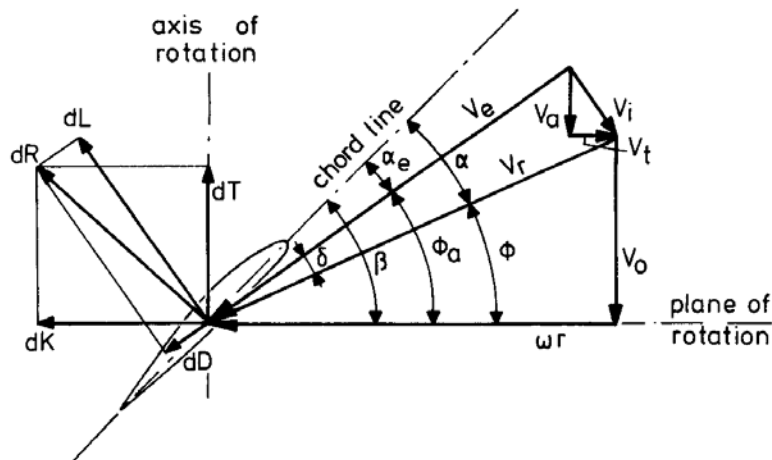


Figura 7.2.7 Forze aerodinamiche in una generica sezione di pala [2]

Se della forza aerodinamica consideriamo la sua componente ortogonale al piano di rotazione,  $dT$ , e la integriamo lungo tutta la pala otteniamo la trazione mentre la componente  $dK$  nel piano, moltiplicata per la distanza  $r$  dall'asse di rotazione ed integrata lungo le pali, fornisce la coppia resistente complessiva.

Queste grandezze vengono usualmente espresse attraverso le formule di Renard. La trazione si esprime come

$$T = C_T \rho n_p^2 D^4 \quad (7.2.25)$$

la coppia come

$$Q = C_Q \rho n_p^2 D^5 \quad (7.2.26)$$

e la potenza

$$P = C_P \rho n_p^3 D^5 \quad (7.2.27)$$

con il rendimento che risulta

$$\eta = \frac{P_A}{P} = \frac{TV}{P} = \frac{C_T \rho n_p^2 D^4 V}{C_P \rho n_p^3 D^5} = \frac{C_T}{C_P} J = \frac{C_T}{2\pi C_Q} J \quad (7.2.28)$$

Diagrammi che riportano l'andamento dei coefficienti al variare del rapporto di funzionamento sono disponibili per varie eliche. I dati sono spesso di natura sperimentale o numerica.

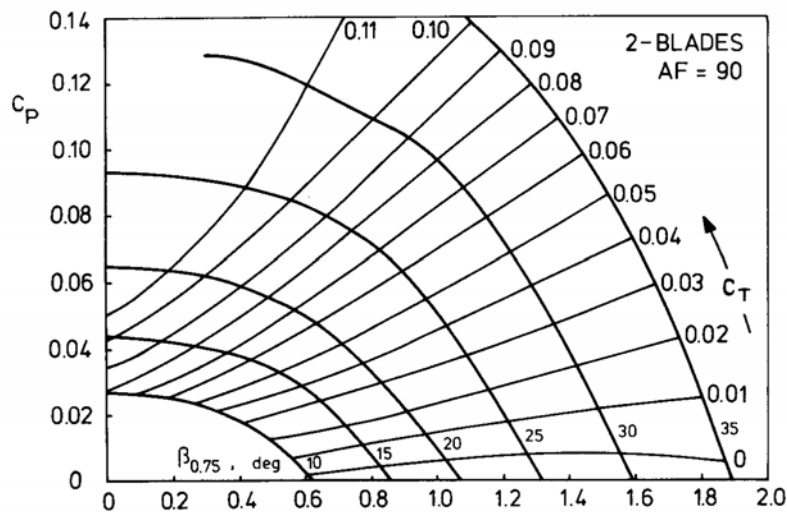


Figura 7.2.8 Legame  $C_p$ ,  $C_T$  e  $J$  [2]

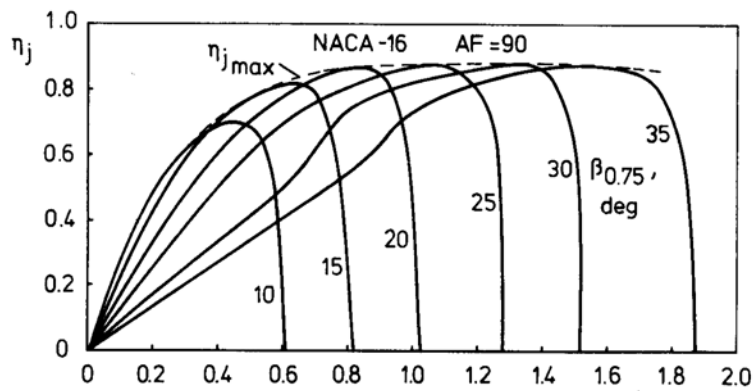


Figura 7.2.9 Rendimento propulsivo in funzione di  $\beta$  e  $J$  [2]

Nelle figure 7.2.8 e 7.2.9 sono riportati, a titolo di esempio, i diagrammi che rappresentano  $C_p$ ,  $C_T$  e il rendimento in funzione del parametro di avanzamento  $J$ . Tutte le curve dei rendimenti passano per l'origine e poiché ciascuna di essa taglia l'asse delle ascisse per i medesimi valori di  $J$  che determinano l'annullarsi del  $C_T$  i punti di massimo delle varie curve si trovano a valori di  $J$  tanto più elevati quanto maggiore è l'angolo di calettamento. Osserviamo anche che per ottenere valori di rendimento elevati per diverse condizioni di volo, cioè per diversi valori di  $J$ , occorre variare il passo in funzione della velocità. Questo si ottiene con l'elica a passo variabile che è un'elica le cui pale possono essere fatte ruotare rigidamente attorno al proprio asse di un angolo opportuno.

Altri elementi che caratterizzano una elica sono la solidità (*solidity ratio*), definita come il rapporto tra l'area delle pale e l'area del disco del rotore e il fattore di attività (*activity factor*), un parametro dipendente dalla geometria della pala come si può evidenziare dalla figura 7.2.10 e definito come

$$AF = \frac{10000}{D^5} \int_{0.2R}^R c r^3 dr \quad (7.2.29)$$

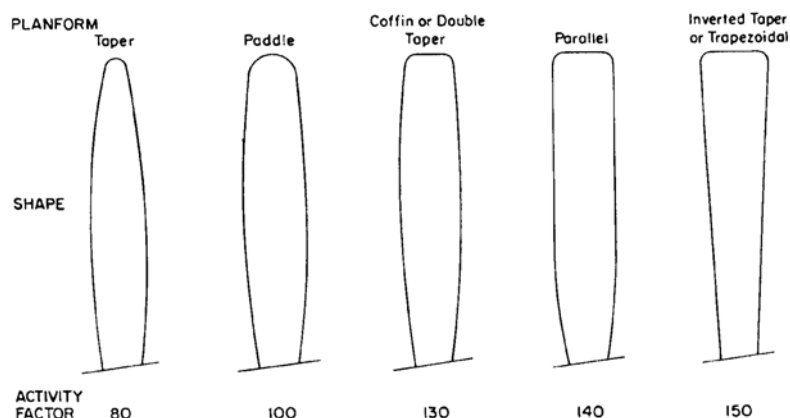


Figura 7.2.10 Fattore di attività e geometria della pala

La soluzione quasi sempre adottata, eccetto nei motori di bassa potenza, è l'elica a numero di giri costanti che adotta un sistema che consente di mantenere costante il numero di giri dell'elica, e tramite il riduttore il numero di giri del motore, variando automaticamente l'angolo di calettamento in conseguenza di ogni variazione di velocità rispetto a quella impostata dal pilota.

#### 7.2.4 Campi e condizioni di funzionamento delle eliche

Le caratteristiche aerodinamiche di un'elica (e cioè la trazione fornita e la coppia, o la potenza necessaria per azionarla) dipendono in maniera essenziale, oltre che dalla densità del fluido in cui essa opera, dalle sue dimensioni, dal numero di giri medesimi, dai coefficienti adimensionali di trazione e di coppia (o di potenza), che per un'elica di caratteristiche geometriche assegnate sono funzione del rapporto di funzionamento  $J$ .

Questo risultato è del resto facilmente intuibile, poiché il rapporto di funzionamento definisce l'angolo che il vento relativo (risultante della velocità di traslazione e di quella di rotazione) forma con le sezioni delle pale dell'elica, ed ha quindi un ruolo in tutto paragonabile a quello dell'angolo di incidenza nel caso di un profilo o di un'ala.

Al variare di  $J$ , nel caso di un'elica a passo fisso, si passa attraverso ad un'ampia gamma di incidenze delle sezioni delle pale dell'elica, la quale può conseguentemente presentare caratteristiche molto diverse, passando attraverso diversi "stadi" o condizioni di funzionamento, definiti ciascuno da particolari valori del rapporto di funzionamento  $J$ , del coefficiente di trazione  $C_T$  e di quello della coppia  $C_Q$ . Passando da valori negativi del rapporto di funzionamento a valori positivi, ed assumendo che il senso di rotazione dell'elica sia sempre il medesimo, si possono, infatti, definire le condizioni di funzionamento sotto elencate

	$V$	$J$	$C_T$	$C_Q$
Elica freno	$<0$	$<0$	$>0$	$>0$
Elica a punto fisso	$0$	$0$	$>0$	$>0$
Elica traente	$>0$	$0 < J < J_1$	$>0$	$>0$
Elica a trazione nulla	$>0$	$J_1$	$=0$	$>0$
Elica frenante	$>0$	$J_1 < J < J_2$	$<0$	$>0$
Elica autorotante	$>0$	$J_2$	$<0$	$=0$
Elica motrice	$>0$	$J > J_2$	$<0$	$<0$
Elica bloccata	$>0$	$\infty$	$<0$	$\infty/0$

dove  $J_1$  è il parametro di avanzamento per  $C_T=0$  e  $J_2$  quello per  $C_P=0$ .

Esaminando più in dettaglio le condizioni di funzionamento della elica riportate nella tabella, e ricordando che si è convenuto trattarsi di elica a passo fisso, si può osservare che

- elica freno non è fisicamente ottenibile su un aereo in volo (non è possibile volare all'indietro), e potrebbe ottenersi solo se l'aereo a terra, con motore in moto, venisse rimorchiato all'indietro. La condizione di funzionamento in oggetto è peraltro ottenibile, nel caso di elica a passo variabile, con l'inversione del passo, che permette di ottenere cospicue trazioni negative, e quindi energiche forze frenanti.
- elica a punto fisso, che si realizza ogni volta che l'aereo è fermo a terra con motore in moto, è caratterizzato come si è già visto da rendimento nullo, ed in genere dai massimi valori del rapporto fra trazione fornita dall'elica e potenza motrice da questa assorbita.
- elica traente è quello delle normali condizioni d'impiego dell'elica, ed è caratterizzato da rendimenti positivi e da rapporti trazione/potenza assorbita decrescenti al crescere della velocità.
- elica a trazione nulla, caratterizzato ovviamente da rendimento nullo, è quello in cui la velocità di volo è tale da portare complessivamente le pale ad incidenze tali da non fornire complessivamente trazione; l'elica richiede peraltro sempre una certa potenza al motore per essere mantenuta in rotazione, e detta potenza va completamente spesa per vincere le resistenze che si oppongono alla rotazione delle pale.
- elica frenante è quello per cui l'elica assorbe una certa potenza dal motore, potenza che viene spesa e per vincere le resistenze che si oppongono alla rotazione delle pale e per rallentare la corrente d'aria che passa attraverso il disco dell'elica. La condizione di funzionamento in oggetto si riscontra o volando su traiettoria poco discendente con potenza ridotta, o in affondata anche con forte potenza.
- elica autoruotante si verifica nel volo di discesa, quando l'elica assorbe dalla corrente d'aria che ne attraversa il disco, rallentandola, una potenza uguale a quella necessaria per vincere le resistenze che si oppongono alla rotazione delle pale.
- funzionamento a mulinello, o di elica motrice, è sostanzialmente quello del mulino a vento, che assorbe potenza dalla corrente d'aria che attraversa il disco dell'elica, rallentandola, e che utilizza detta potenza in parte per vincere le resistenze che si oppongono alla rotazione delle pale, ed in parte per fornire potenza meccanica sull'albero. Questa condizione di funzionamento viene normalmente evitata in qualsiasi gruppo motopropulsore (salvo ove si intenda utilizzarla per porre in moto un motore accidentalmente arrestatosi), poiché può danneggiare gravemente il motore; è invece tipica dell'elica utilizzata per porre in moto generatori elettrici, pompe, ecc.
- elica bloccata si verifica quando, per un qualsiasi motivo, il motore cessa di funzionare impedendo all'elica qualsiasi rotazione dovuta alle azioni aerodinamiche che il vento relativo esercita sulle pale. Mentre nel caso più generale l'elica bloccata è soggetta ad una coppia che tende a far la ruotare (e che è quindi definita da valori infiniti del coefficiente di coppia), un caso particolare di notevole interesse è quello dell'elica in bandiera, per cui la coppia succitata risulta nulla. La quasi totalità delle moderne eliche a passo variabile è munita di dispositivo per la messa in bandiera, che determinando una rotazione delle pale tale che le loro sezioni si pongano approssimativamente nel letto del vento, consente di evitare i possibili inconvenienti dovuti alla rotazione di un'elica applicata ad un motore inefficiente, sia di ridurre considerevolmente la resistenza aerodinamica della elica ferma, che in caso contrario andrebbe ad incrementare il momento imbarcante dovuto all'eccentricità della trazione complessiva.

### 7.3 Accoppiamento elica - motore alternativo

Per basse potenze si adottano le eliche a passo fisso. Le eliche a passo fisso sono imbullonate direttamente all'albero motore e compiono pertanto sempre lo stesso numero di giri del motore. Un'elica a passo fisso è in un certo senso un organo di trasmissione con una sola marcia. Questa configurazione compensa la minore efficienza con la sua grande semplicità di azionamento. L'unico strumento di misura da controllare è il tachimetro. Con le eliche a passo fisso la regolazione della potenza è semplice. Spingendo avanti la manetta il numero di giri e la potenza aumentano. Tirando a

sé la manetta il numero di giri diminuisce. Quello che occorre verificare è che il numero di giri resti entro i limiti prefissati.

Le eliche a numero di giri costante (*constant speed propeller*) sono dotate di un regolatore che modifica l'angolo delle pale in modo da mantenere il numero di giri impostato. Questo tipo di elica utilizza in modo molto più efficiente la potenza del motore. Se, infatti, il numero di giri tende ad aumentare il regolatore fa aumentare il passo che, incrementando la coppia resistente, induce il motore a rallentare. Il fenomeno inverso si verifica quando il numero di giri tende a diminuire. Quando le eliche hanno un simile comportamento il pilota dispone sempre della stessa potenza nominale del motore (variabile solo in funzione della posizione della manetta), evitando gli inconvenienti connessi con le eliche a passo fisso che richiederebbero un continuo intervento sulla manetta del gas del motore.

Prendiamo in esame alcune tipiche condizioni di funzionamento per alcune tipiche situazioni di volo:

- Condizione al decollo. Il motore si trova nella condizione di esercizio di massima potenza con le eliche che si trovano a bassi valori dell'angolo di calettamento in modo tale da sviluppare la massima trazione
- Volo in salita. Di solito in questa situazione ci si trova col motore che eroga il 75% della potenza disponibile mentre in crociera si trova usualmente ad erogare il 45-60% della potenza in modo tale da ridurre i consumi ed aumentare l'autonomia. L'angolo di calettamento è aumentato.

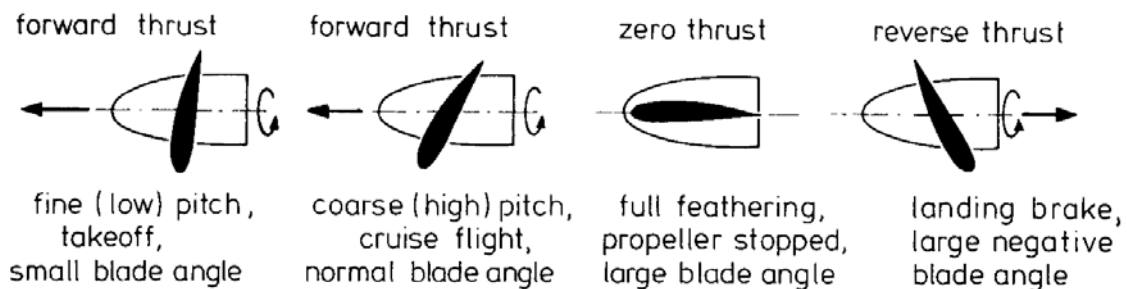


Figura 7.2.11 Condizioni di volo e relativi calettamenti della pala

## Bibliografia

- [1] Roskam, J Chuan-Tau Edward Lan , *Airplane aerodynamics and performance*, Lawrence, DARcorporation, 1997, cap. 6.
- [2] Ruijgrok G.J.J., *Elements of airplane performance*, Delft, Delft University press, 1990. cap.6