

STUDIO DEI PROFILI ALARI.

Ricordiamo che:

Si chiama **portanza** (la indichiamo con L) la componente della forza aerodinamica normale (perpendicolare) alla velocità indisturbata dell'aria.

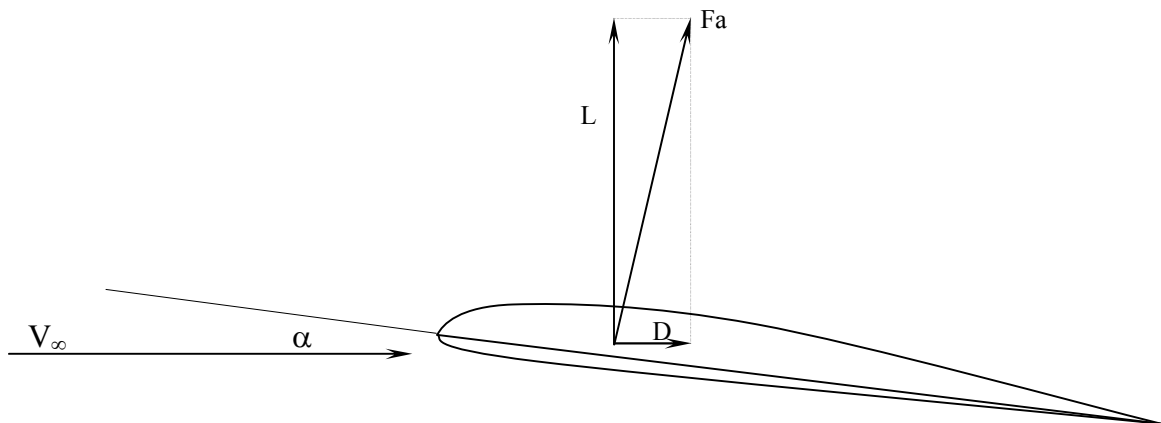
Si chiama **resistenza** (la indichiamo con D) la componente della forza aerodinamica parallela alla velocità indisturbata dell'aria.

Si chiama **momento aerodinamico** (lo indichiamo con M), rispetto ad un punto che va specificato a seconda dei casi, il momento risultante di tutte le forze aerodinamiche distribuite sulla superficie del corpo.

Si chiama **incidenza geometrica** (la indichiamo con α alfa) l'angolo fra la velocità indisturbata ed un asse geometrico solidale al corpo aerodinamico

Se consideriamo una “macchina volante” in volo rettilineo orizzontale con velocità costante, si comprende facilmente che la portanza va ed equilibrare il peso delle macchina mentre la sua resistenza deve essere equilibrata da una spinta fornita da un apparato propulsore.

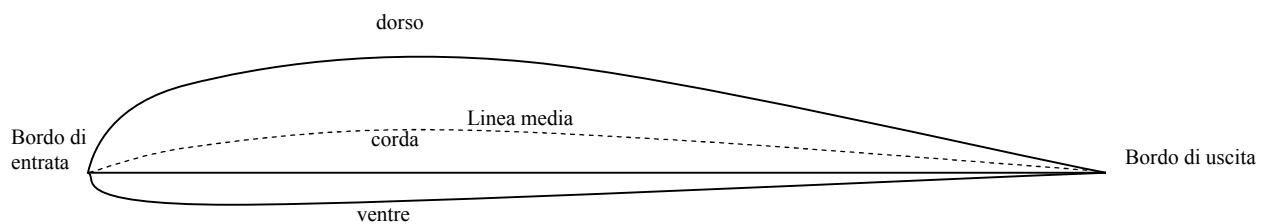
Come prima specificato, tutti i corpi , purché la loro velocità e la loro dimensione siano sufficienti, sono in grado di produrre la portanza desiderata, ma è ovvio che le forme adatte alla costruzione di una macchina volante sono quelle che, alla portanza desiderata, danno la minor resistenza.



Le forme impiegate per la costruzione della sezione trasversale delle ali delle macchine volanti si chiamano profili alari.

A seconda del contesto specificato, per **profilo alare** si può intendere sia la curva che si ottiene intersecando l'ala con un piano parallelo a quello di simmetria, sia un'ala larga 1 e che ha per profilo la suddetta curva. Quest'ala larga 1 la dobbiamo però sempre pensare come facente parte di un'ala che si estende all'infinito. Questo perché deve essere garantito il moto bidimensionale.

Nomenclatura delle parti di un profilo alare



La **corda** è il segmento che unisce bordo di entrata e bordo di uscita.

Il **dorso** è la linea, o superficie se parliamo di un'ala, posta a di sopra della corda (upper surface)

Il **ventre** è la linea, o superficie se parliamo di un'ala, posta a di sotto della corda (lower surface)

La **linea media del profilo** il luogo dei punti posti a metà strada (equidistanti) tra dorso e ventre.

La forma della linea media ha una importante proprietà che vedremo in seguito.

L'ordine con cui tracciare le varie parti per eseguire un buon disegno a mano libera è il seguente:
la corda, il dorso, il ventre.

Si può ipotizzare che la forma dei profili alari sia stata dedotta da quella delle ali degli uccelli e che in seguito, con lo sviluppo delle conoscenze dell'aerodinamica si sia concluso che quello è il tipo di forma più efficiente.

Spiegazione intuitiva della generazione della portanza

A tal proposito esistono due spiegazioni, vediamole.

Le traiettorie delle particelle, nell'ipotesi di moto permanente, si chiamano **“linee di corrente”**, la loro proprietà è di essere tangenti al vettore velocità in ogni loro punto. Vista questa proprietà, le particelle non attraversano le linee di corrente, pertanto, queste linee si comportano come le pareti di un tubo all'interno del quale scorre il fluido. Due linee di corrente delimitano uno spazio che si chiama **“tubo di flusso”**.

A notevole distanza davanti al profilo, le particelle di fluido hanno tutte la medesima velocità costante in modulo direzione e verso. Quando giungono in prossimità del profilo, le linee di corrente cominciano ad incurvarsi per passare sul dorso e sul ventre del profilo. Poiché le particelle fluide hanno una massa e quindi un'inerzia, nel deviare attorno al profilo si accostano le une alle altre facendo ridurre la sezione dei tubi di flusso di cui sono pareti. Dalle equazioni di continuità e di Bernoulli sappiamo che dove la sezione di un tubo si riduce, aumenta la velocità e diminuisce la pressione. Dove la pressione scende al di sotto del valore della corrente indisturbata si generano delle forze di pressione sulla superficie dirette verso l'esterno. In virtù di questi fatti, con opportuni angoli di incidenza ed opportune forme del profilo, la risultante delle forze di pressione produce la portanza, cioè la componente della forza aerodinamica perpendicolare alla velocità indisturbata e il cui verso è opposto al peso del velivolo.

L'altra spiegazione è la seguente:

Il profilo alare, in virtù della sua incidenza e della sua forma, devia una certa portata di aria, cioè ne varia la quantità di moto. Per l'omonima equazione, ad ogni variazione di quantità di moto corrisponde una forza. Quindi il profilo applica al fluido una forza che ne devia la traiettoria, per reazione il fluido applica una forza sulla superficie del profilo. In realtà le forze risultano distribuite sulla superficie del profilo.

Altre spiegazioni sulla resistenza.

Si è dimostrato che i corpi bidimensionali, come i profili alari, quando sono dotati di velocità relativa rispetto al fluido, in assenza di viscosità del fluido, sono sottoposti ad una distribuzione di pressione la cui risultante in direzione della velocità indisturbata (la resistenza) è uguale a zero. Questo fatto va sotto il nome di “paradosso di D'Alembert”. La viscosità del fluido genera lo strato limite e questo modifica la distribuzione di pressione in modo che la resistenza di pressione non sia zero. Oltre alla resistenza di pressione, lo strato limite genera anche resistenza di attrito a causa dello scorrimento degli strati di fluido al suo interno.

I valori di portanza, resistenza e momento aerodinamico di un profilo alare dipendono da:

- la densità del fluido ρ (si pronuncia rò)
- la velocità relativa V
- la superficie dell'ala S
- la geometria del profilo, cioè la forma e l'incidenza
- il numero di Reynolds Re (è un parametro che sarà spiegato prossimamente)

E' utile caratterizzare un dato profilo alare, non con la portanza e resistenza che esso produce ma con dei coefficienti che dipendono solo dalla geometria del profilo e dal Re . Tali coefficienti si chiamano :

- Coefficiente di portanza C_l
- Coefficiente di momento (rispetto ad un punto specificato) C_m
- Coefficiente di resistenza C_d

La loro definizione è la seguente:

- $C_l \equiv P / (1/2 \rho V^2 c l)$
- $C_d \equiv R / (1/2 \rho V^2 c l)$
- $C_m \equiv M / (1/2 \rho V^2 c l c)$

$C l$ (corda profilo moltiplicato uno) rappresenta la superficie in pianta dell'ala che ha il profilo in oggetto e larga l

Una volta ottenuti i coefficienti, o con prove in galleria del vento o con calcoli sofisticati su un profilo campione, per ottenere i valori di portanza e resistenza del profilo che ci interessa è sufficiente moltiplicare i coefficienti per le nostre $1/2 \rho V^2 c l$.

Il punto di applicazione della forza aerodinamica si chiama **centro di pressione**. Rispetto a questo punto il momento aerodinamico è zero. Sfortunatamente, tale punto si sposta al variare dell'incidenza, complicando le equazioni.

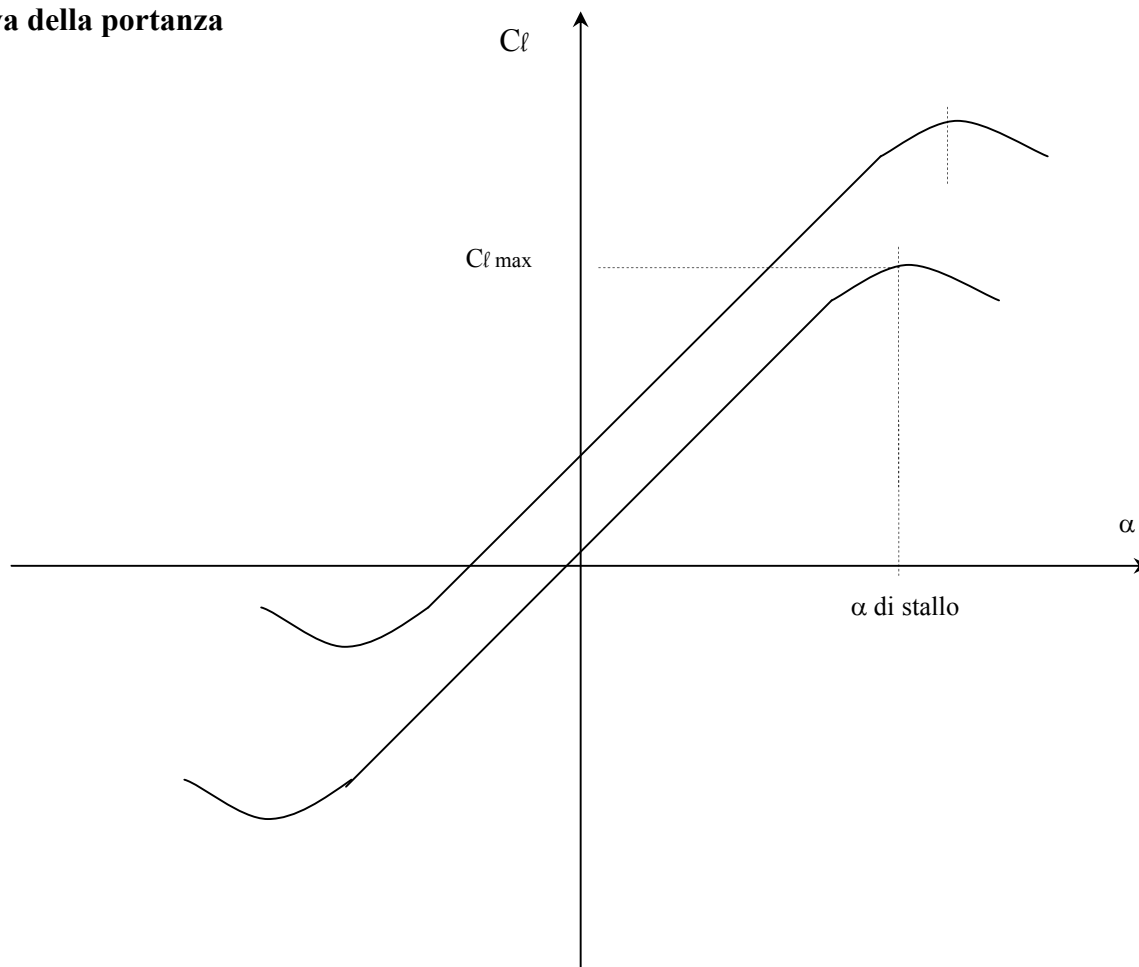
Il coefficiente di momento aerodinamico rispetto ad un punto qualsiasi varia al variare dell'incidenza. Ciò porta a delle complicazioni nella scrittura delle varie equazioni che esprimono i vari fenomeni. Fortunatamente, si è individuato un punto detto **fuoco o centro aerodinamico del profilo**, la cui proprietà è che, rispetto ad esso, il momento aerodinamico è costante (quasi) al variare dell'incidenza. Il C_m è quindi valutato rispetto al centro aerodinamico; questo punto giace al 25% della corda a partire dal bordo di entrata. Poiché il 25% della corda è $1/4$ un quarto della corda, il suddetto punto si chiama anche **quarto anteriore del profilo**, anteriore perché la sua distanza si misura dal bordo anteriore del profilo.

Le caratteristiche di portanza, momento e resistenza dei profili alari si riportano su tre tipi di grafico
Le **curve di portanza e momento** riportano C_l e C_m (in ordinate) in funzione di α (in ascisse).
Il **grafico polare** riporta C_d in ascisse e C_l in ordinate.

Queste curve servono per confrontare le prestazioni di diversi profili per decidere quali di essi è il più adatto per l'aeroplano che si intende costruire.

La forma qualitativa dei suddetti grafici è la seguente:

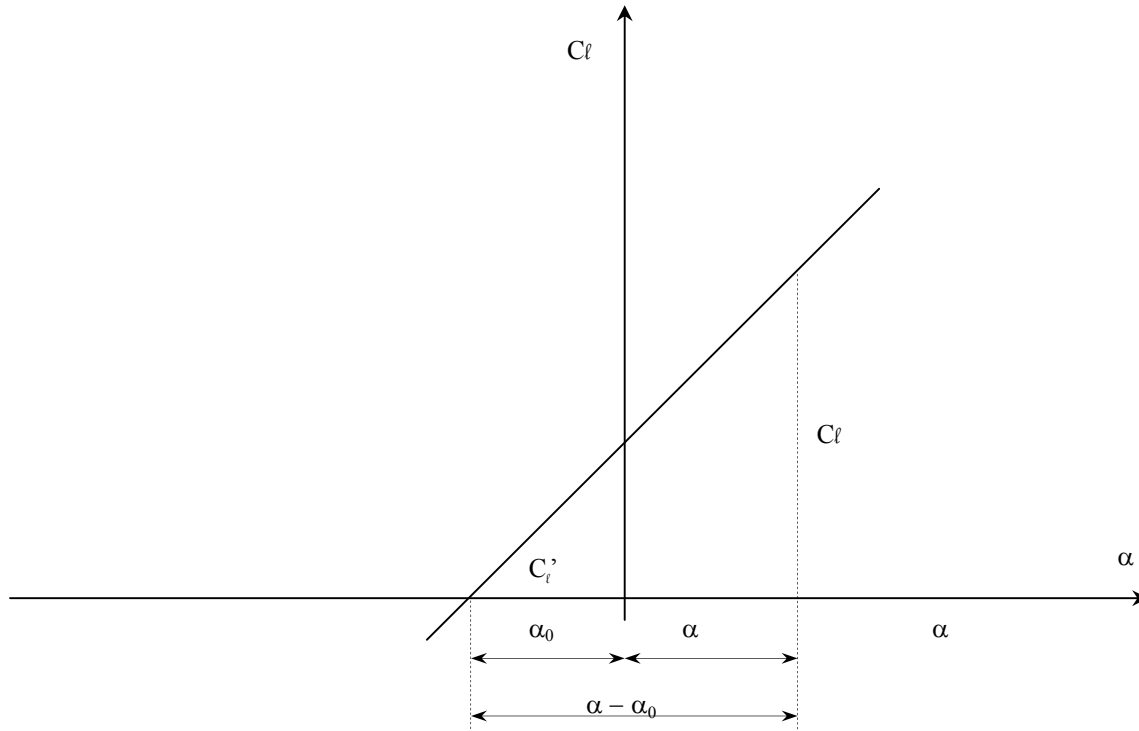
Curva della portanza



La curva presenta un tratto quasi rettilineo, poi, all'aumentare dell'incidenza il C_l cresce sempre meno rapidamente fino addirittura a diminuire al di sopra di un certo valore detto di stallo. In genere l'incidenza di stallo per un profilo da aeronautica generale è 10° , 16° . Stesso fenomeno si ha se l'incidenza diventa negativa oltre un certo valore.

La curva più in basso rappresenta le caratteristiche di un profilo simmetrico rispetto alla corda, questo vuol dire che il dorso ed il ventre sono lo specchio uno dell'altro, quindi la linea media coincide con la corda ed è un segmento ed in quanto tale non è curvo. Il profilo simmetrico, ad incidenza $\alpha=0$ darà $C_l = 0$ perché per ogni componente verticale di forza sul dorso, sul ventre vi sarà la componente uguale e contraria, pertanto la risultante in direzione normale al moto, cioè la portanza è zero. La portanza del profilo ad esempio a 5° è uguale e contraria a quella a -5° , quindi il grafico è antisimmetrico rispetto all'asse del C_l . Se si aumenta la curvatura della linea media del profilo, cioè per profili diciamo piegati a banana, la curva di portanza sale sempre di più. Tutto ciò fino ad un certo limite che sarà spiegato in una successiva fase di approfondimento. Ricapitolando, indipendentemente dallo spessore (quasi), a parità di incidenza, più è curva la linea media maggiore è il C_l e quindi maggiore è la sua portanza. L'inclinazione del tratto rettilineo non cambia (quasi) al variare della curvatura della linea media del profilo.

All'aumentare le numero di Reynolds il tratto rettilineo si estende verso C_l maggiori ed aumenta sia il $C_{l \max}$ che α di stallo



Per poter eseguire dei calcoli di aerotecnica, occorre determinare una espressione matematica (una formula) fra C_l ed α . Vediamo come si ricava questa relazione.

Per semplicità, la relazione è valida solo nella parte dove la curva di portanza è una retta.

Il parametro α_0 rappresenta il valore di α al quale la portanza è uguale a zero, si chiama “incidenza di portanza nulla” e, per un profilo a linea media convessa, ha segno negativo perché si trova a sinistra dell’origine degli assi.

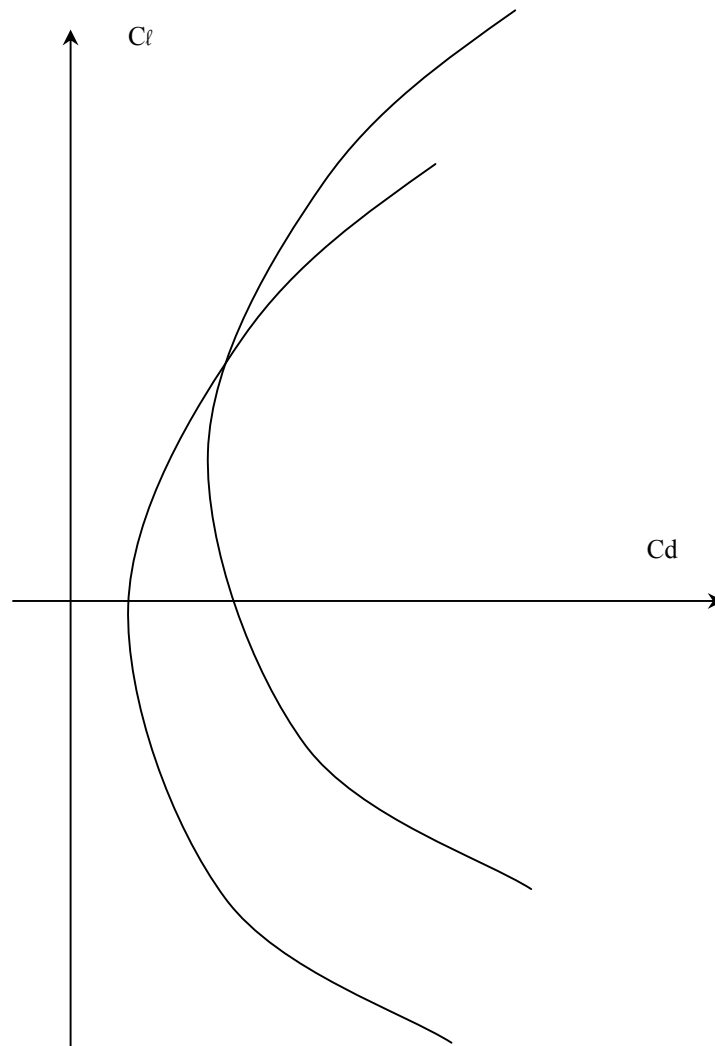
Il parametro C_l' è la tangente trigonometrica dell’angolo che la retta di portanza forma con l’asse delle α . Nel linguaggio della geometria analitica, un simile parametro si chiama coefficiente angolare della retta, poiché la retta in esame rappresenta la portanza, nel gergo aeronautico, C_l' si chiama coefficiente angolare di portanza. Qualunque sia la forma del profilo, C_l' assume valori compresi in campo molto piccolo $5,6 - 5,8$ 1/rad.

L’espressione $C_l(\alpha)$ significa che C_l dipende da α , si dice che C_l è una funzione di α .

Utilizzando la semplice relazione trigonometrica, si vede che:

$$C_l(\alpha) = C_l'(\alpha - \alpha_0)$$

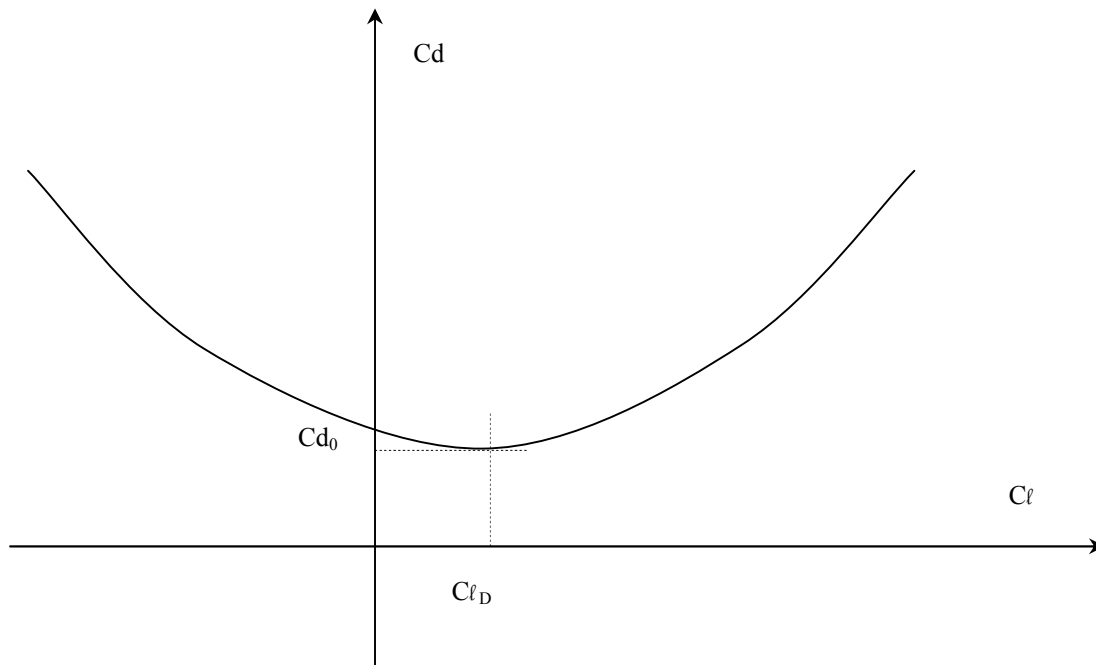
Grafico polare



La curva simmetrica rispetto all'asse orizzontale è relativa ad un profilo simmetrico, aumentando la curvatura della linea media la curva si sposta verso C_l maggiori aumentando leggermente il C_d minimo. Per profili da aviazione comune il C_d varia parabolicamente (quasi) col C_l (cioè col quadrato del C_l); tale fatto consente di ottenere delle relazioni semplificate utilizzate in meccanica del volo.

All'aumentare del numero di Reynolds, la polare si sposta verso sinistra cioè verso valori di C_d più bassi migliorando l'efficienza del profilo. Inoltre si estende verso C_l più elevati.

Anche nel caso della polare, per poter eseguire dei calcoli di aerotecnica sulle prestazioni dell'aeroplano, occorre determinare una espressione matematica (una formula) fra C_l ed C_d . Vediamo questa relazione. Innanzitutto conviene mettere C_d in funzione di C_l e non viceversa, pertanto tracciamo la polare con l'asse dei C_d orizzontale.



C_{d0} è il valore minimo del C_d .

C_{lD} è il coefficiente di portanza corrispondente al C_{d0} , rappresenta il coefficiente di portanza di progetto del profilo, perché in condizioni di progetto, il profilo conviene che lavori in condizioni di C_d minimo.

L'espressione della parabola che rappresenta la polare del profilo è:

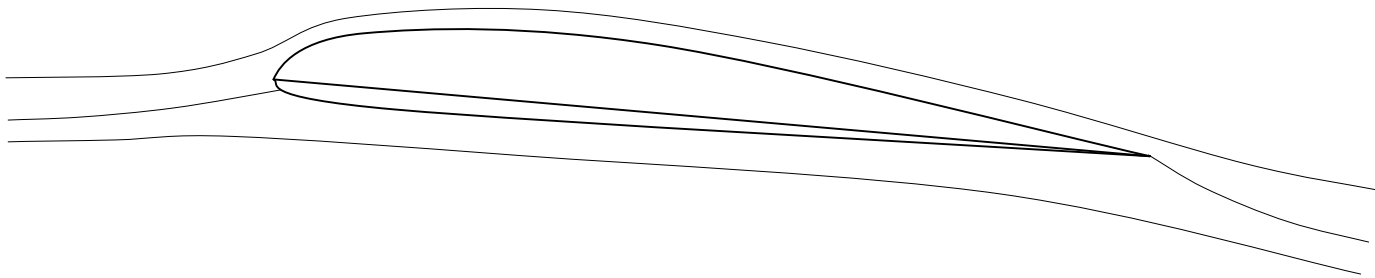
$$C_d = C_{d0} + k (C_l - C_{lD})^2$$

k è una costante, maggiore è il suo valore più la parabola risulta impennata, quindi il C_d aumenta più rapidamente all'aumentare di C_l ; questo vuol dire che il profilo è peggiore.

Questa relazione non si adopera nei calcoli di aerotecnica, si adopera per ricavare l'espressione della polare dell'intero velivolo. Non è opportuno scegliere il profilo con cui costruire l'ala di un aeroplano in base alla polare dei soli profili, occorre determinare la polare dell'intero aeroplano e poi risalire alle specifiche del profilo. Vedremo come si procede dopo aver completato lo studio dell'aerodinamica dell'ala.

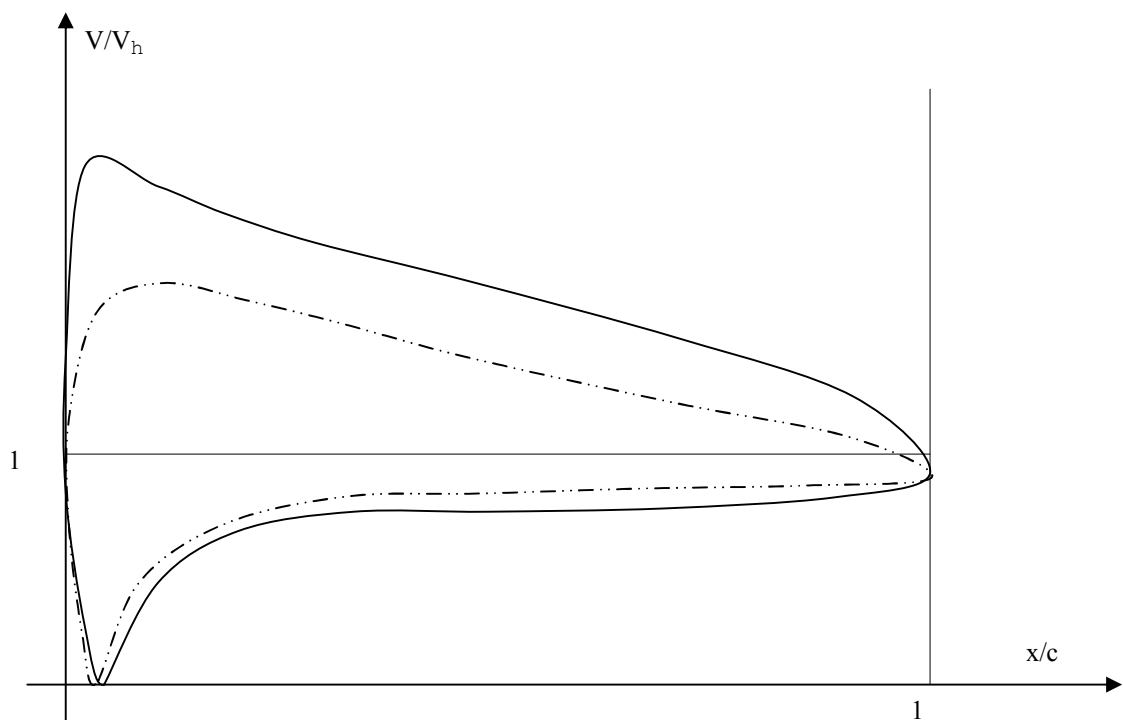
Distribuzione di velocità e di pressione su un profilo alare

Vediamo come si distribuiscono la velocità e la pressione sulla superficie del profilo alare.

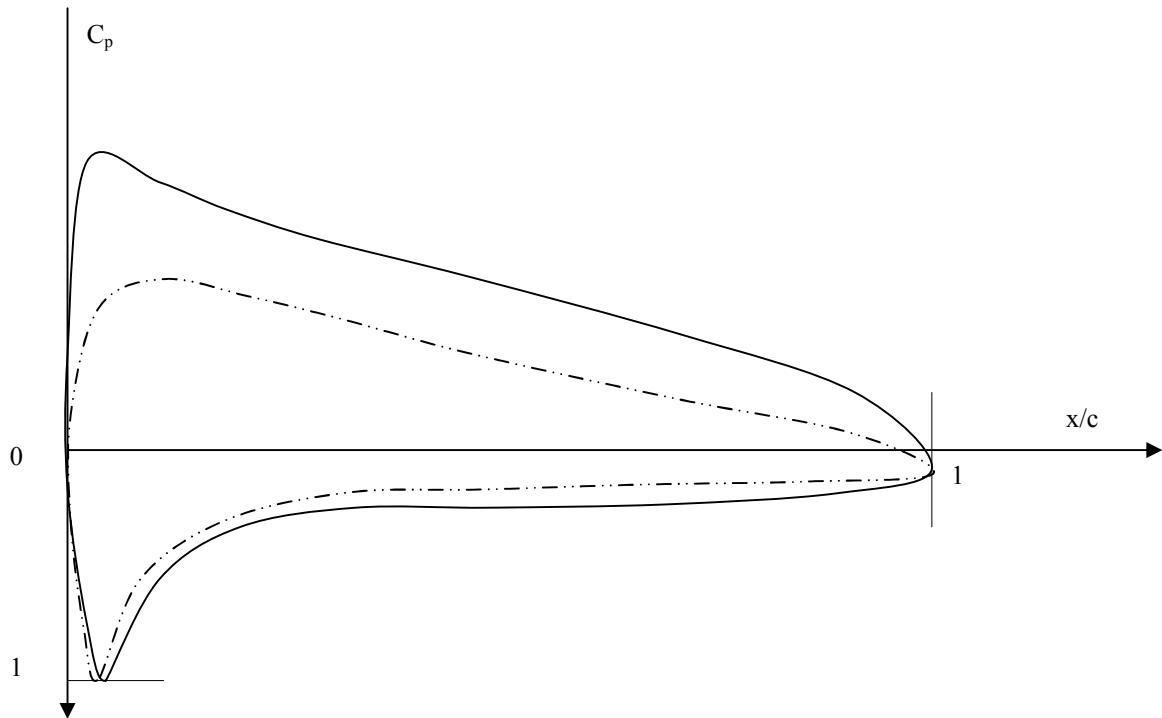


Le linee di corrente che passano sul dorso sono divise da quelle che passano sul ventre da una particolare linea di corrente che termina sul profilo in un punto che per il profilo della figura, all'incidenza fissata di trova appena sotto il bordo di entrata. Le particelle che percorrono questa linea di corrente vanno a fermarsi sul profilo trasformando tutta la loro energia in pressione. In questo punto la pressione raggiunge il valore di arresto (la pressione totale o pressione di arresto). Il punto in esame si chiama "punto di arresto". Partendo da questo punto, le particelle ferme cominciano ad accelerare man mano che scorrono sul dorso e sul ventre. La loro velocità aumenta mentre la loro pressione diminuisce secondo il teorema di Bernoulli. Oltrepassata una certa posizione, la velocità comincia nuovamente a scendere fino a ritornare al valore che aveva nella corrente indisturbata, in una posizione dietro il bordo di uscita ad una distanza superiore alla corda del profilo stesso.

I diagrammi che danno l'andamento della velocità e della pressione lungo la corda, sia sul dorso che sul ventre sono i seguenti:



La linea continua si riferisce al profilo posto ad una incidenza maggiore rispetto a quanto rappresentato dalla linea tratteggiata.



In ascisse viene riportato il coefficiente di pressione definito come:

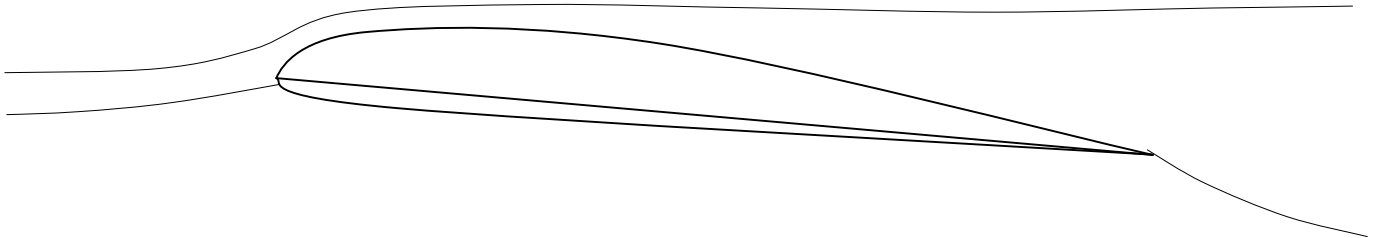
$$C_p = (p - p_h) / (1/2 \rho V_h^2)$$

Non si riporta la pressione statica p poiché essa dipende dalla pressione dinamica $1/2 \rho V_h^2$, invece, il coefficiente di pressione dipende solo dalla forma e dall'incidenza del profilo. Inoltre, l'asse delle ordinate riporta i valori positivi verso il basso anziché verso l'alto. Con questi accorgimenti, il grafico della distribuzione di velocità è simile a quello della pressione, infatti le due grandezze sono legate dal teorema di Bernoulli.

Comportamento al variare del Numero di Reynolds

Partiamo da un valore del numero di Reynolds molto basso, ordine del migliaio

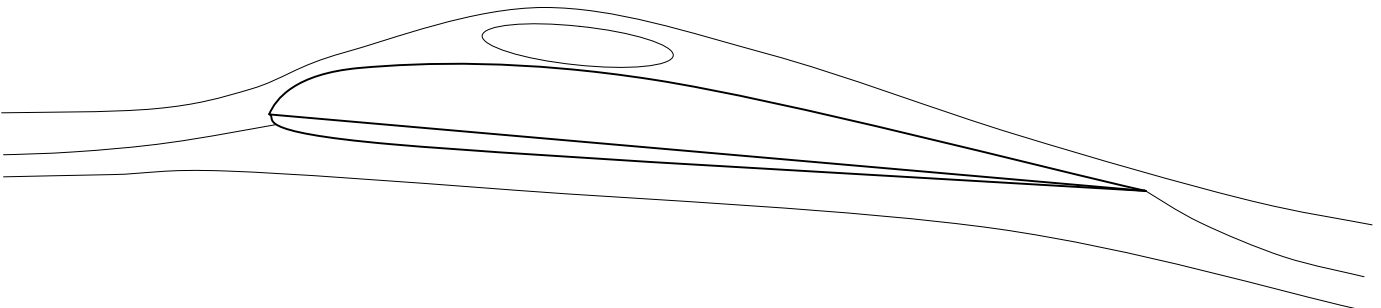
$Re \approx 1000$



Partendo dal punto di arresto, il fluido accelera e questo, come già detto stabilizza lo strato limite laminare, quando la velocità del fluido comincia a diminuire, lo strato limite non riesce a subire la transizione, pertanto si ha una separazione laminare completa fino al bordo di uscita. La distribuzione di pressione che risulta produce una bassa portanza ed una elevata resistenza.

Consideriamo un valore del numero di Reynolds dell'ordine delle decine e centinaia di migliaia

$Re \approx 10000 - 100000$



Partendo dal punto di arresto, il fluido accelera e questo, come già detto stabilizza lo strato limite laminare, quando la velocità del fluido comincia a diminuire, lo strato limite non riesce a subire la transizione, pertanto si ha una separazione laminare, ma rispetto al caso precedente la transizione a strato limite turbolento avviene prima del bordo di uscita. La transizione favorisce il riattacco dello strato limite che procede turbolento sulla restante parte del profilo. La zona interessata dalla separazione laminare al riattacco turbolento si chiama "bolla di separazione laminare". La bolla di separazione abbassa l'efficienza del profilo ma non la distrugge completamente. Aumentando l'incidenza, la bolla si sposta verso il bordo di entrata e si accorcia, la resistenza aumenta. In questo campo di Re , al suo aumentare, a parità di ogni altra condizione, la resistenza tende sempre a diminuire. L'aerodinamica del profilo è sempre migliore.

Consideriamo un valore del numero di Reynolds superiore al milione.

$Re > 10^6$

Partendo dal punto di arresto, il fluido accelera e questo, come già detto stabilizza lo strato limite laminare, quando la velocità del fluido comincia a diminuire, lo strato limite subisce la transizione e procede turbolento fino al bordo di uscita. Al crescere del numero di Reynolds, il punto di transizione si sposta verso il bordo di entrata aumentando la regione sul profilo su cui lo strato limite è turbolento, perciò aumenta la resistenza. Fissato il numero di Reynolds, aumentando l'incidenza, il punto di transizione si sposta verso il bordo di uscita. Continuando ad aumentare l'incidenza, comincia a comparire la separazione dello strato limite turbolento al bordo di uscita. Aumentando ancora, la separazione turbolenta si sposta verso il bordo di entrata fino a che la portanza comincia a diminuire all'aumentare dell'incidenza; Questa situazione è quella chiamata stallo.

Superfici di manovra del profilo

La modifica della curvatura di un'ala rigida, di alluminio o altri materiali di impiego aeronautico, è possibile dotando il profilo di parti mobili incernierate in vari modi. La modifica della curvatura a comando del pilota gli consente di variare le forze agenti sull'aeroplano in modo che questi compia le manovre desiderate.

