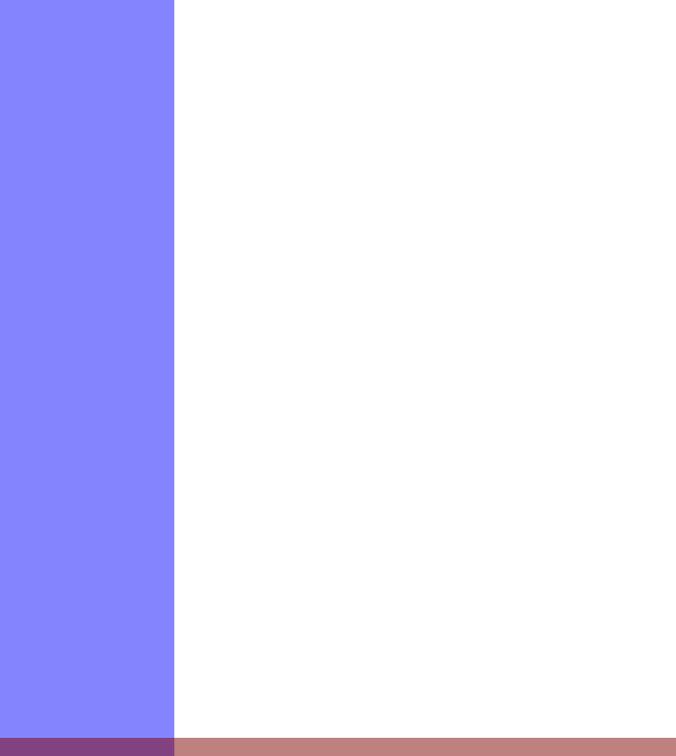


Dinamica del volo

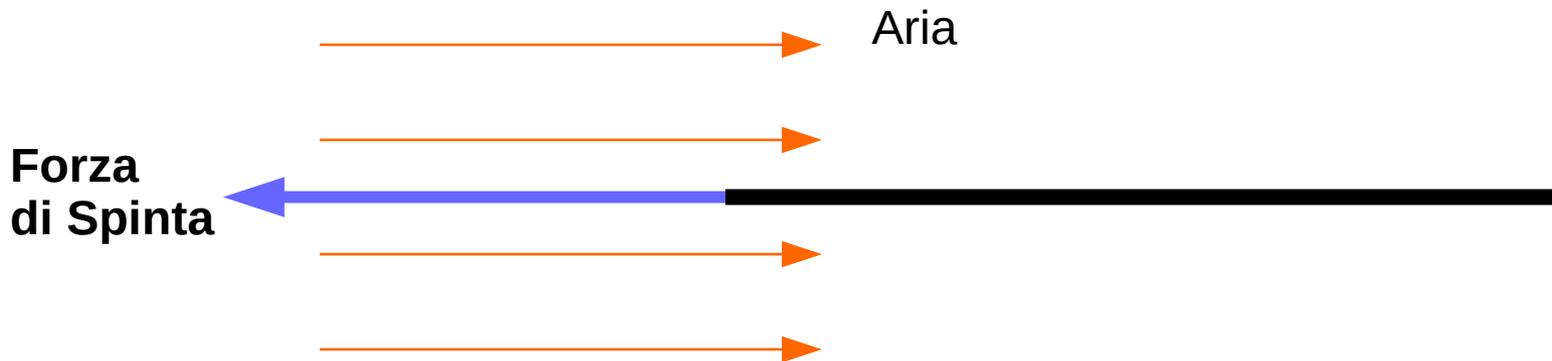
Corrado Santoro



Principio del volo e forze coinvolte

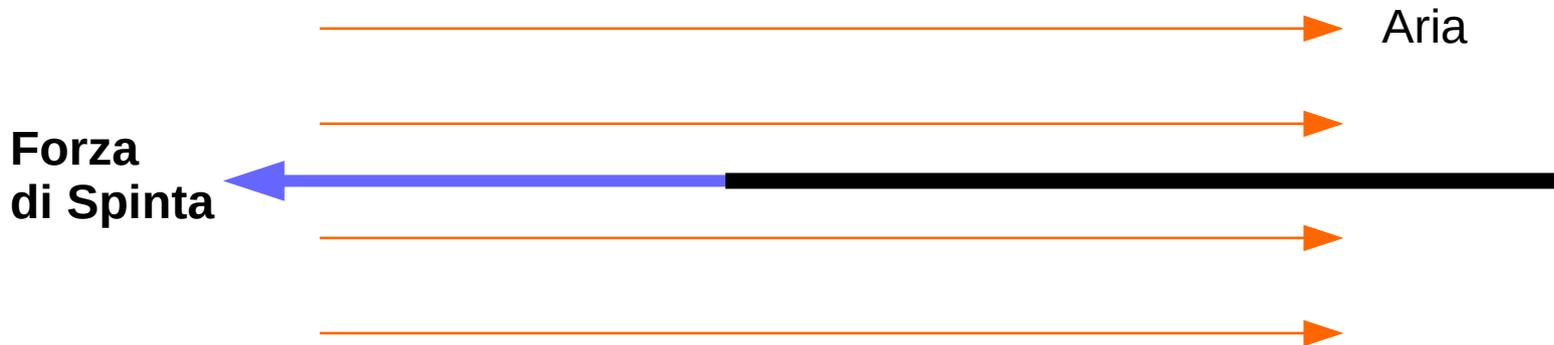
Aria e Spinta

- Consideriamo una tavoletta spinta orizzontalmente da un qualunque sistema di **propulsione**
- La propulsione imprime alla tavoletta una **forza di spinta**
- La tavoletta, durante il moto, è dunque investita da un flusso di aria con direzione opposta alla forza di spinta



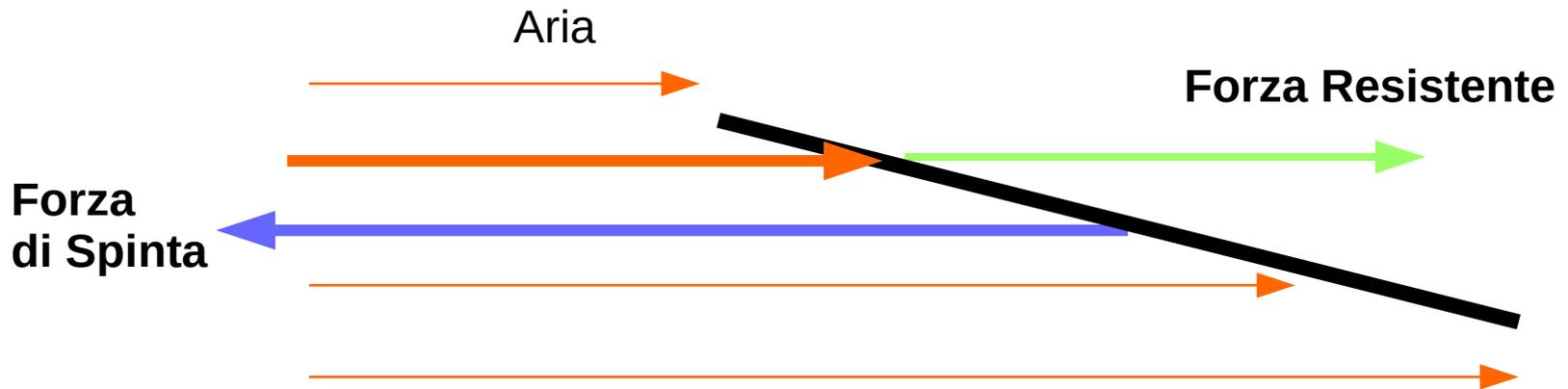
Aria e Spinta

- Se la tavoletta è perfettamente orizzontale (parallela alla forza di spinta), il flusso d'aria scorrerà liberamente sulle superfici superiore ed inferiore della tavoletta



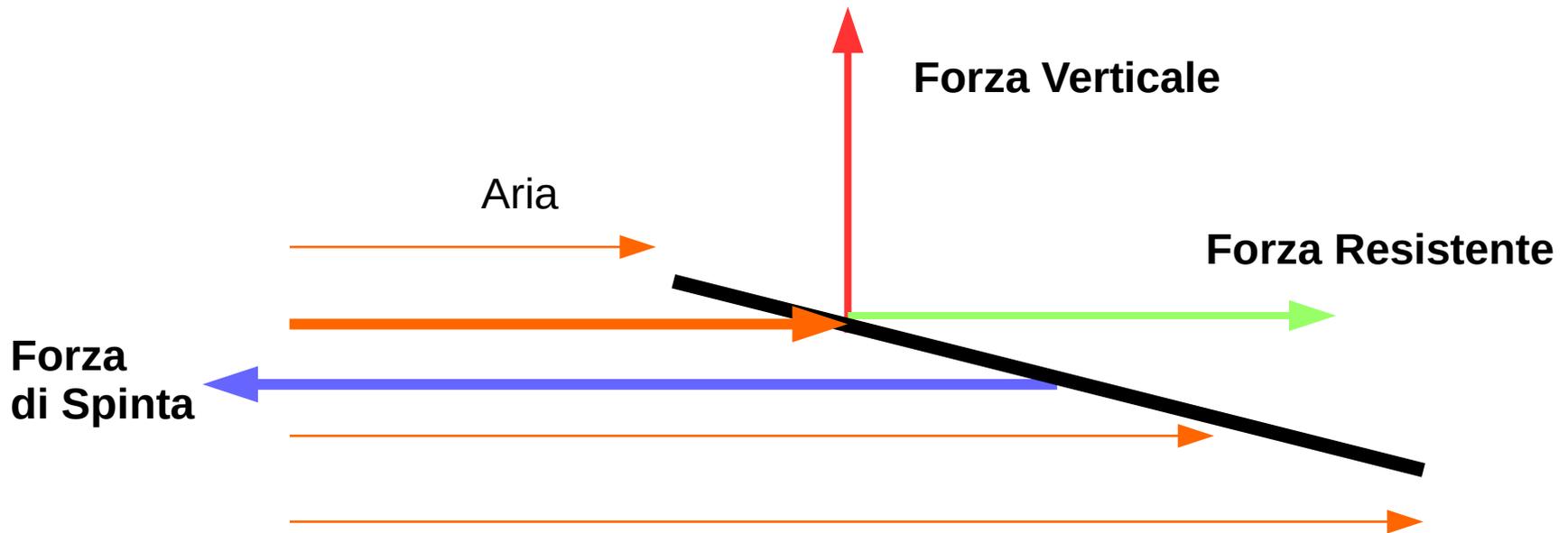
Aria e Spinta

- Se proviamo ad inclinare leggermente la tavoletta, il flusso d'aria che incide sulla superficie inferiore incontrerà un **ostacolo** e produrrà una **forza resistente** tendente a spingere la tavoletta nel verso opposto alla **forza di spinta**



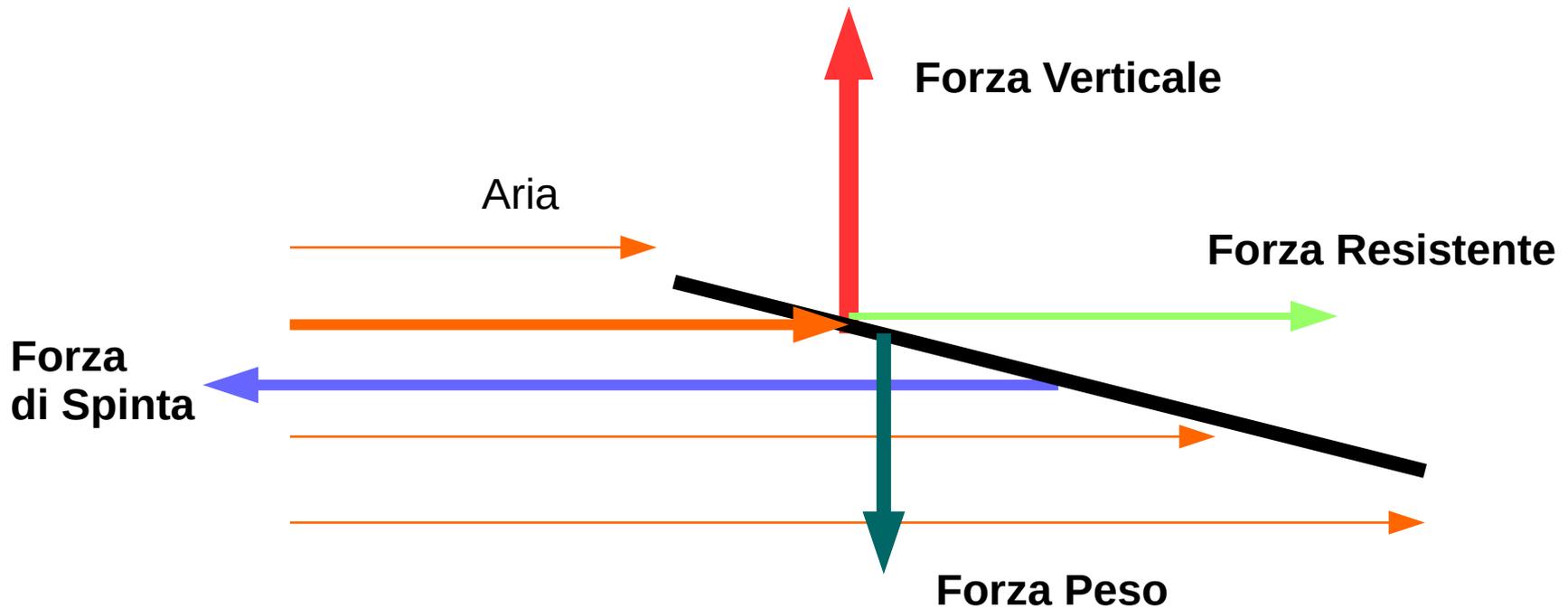
Aria e Spinta

- Tuttavia, data l'inclinazione della tavoletta, una parte della spinta dell'aria provocherà **forza verticale** tendente a spingere la tavoletta verso l'alto



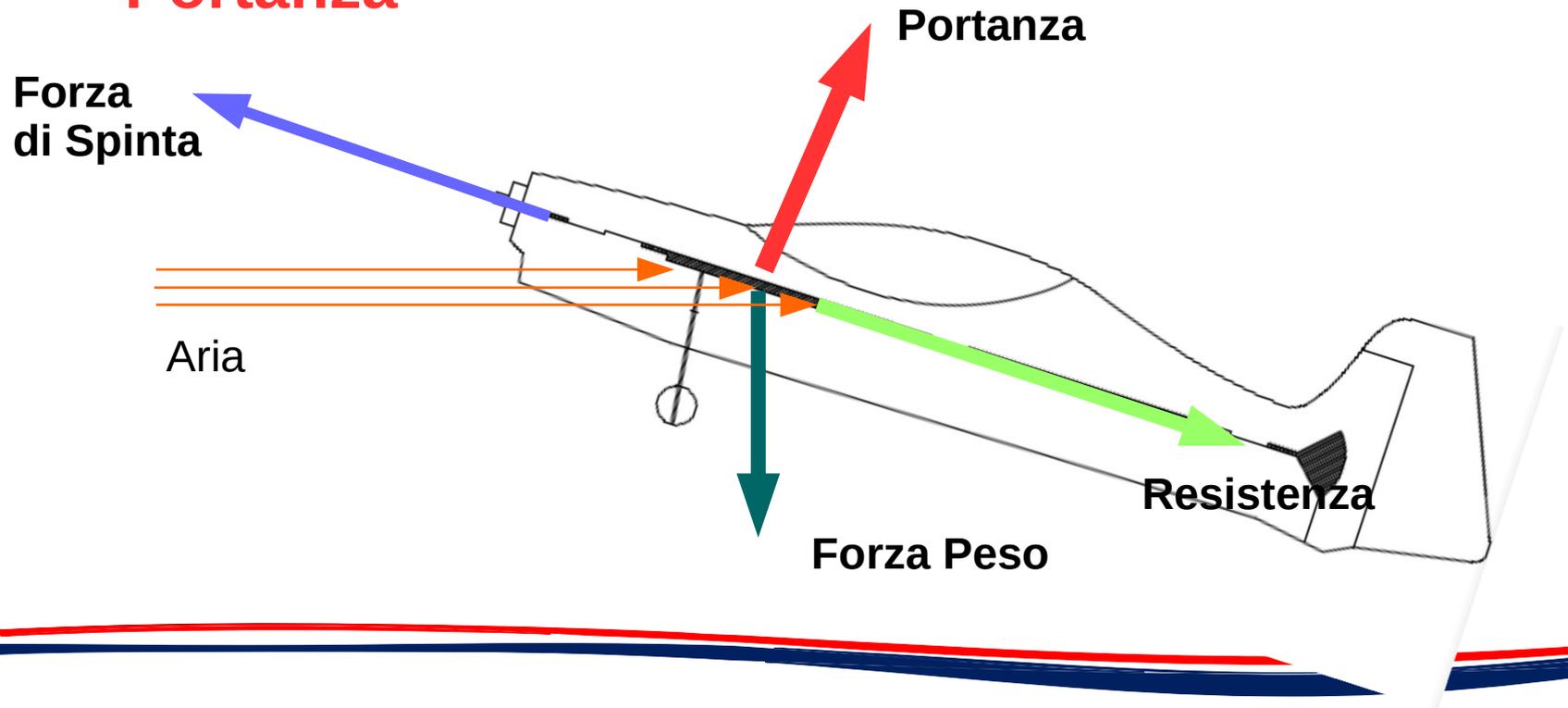
Aria e Spinta

- Se la spinta verso l'alto è tale da **contrastare la forza peso**, la tavoletta tende a stare a mezz'aria o (persino) a muoversi **verso l'alto**



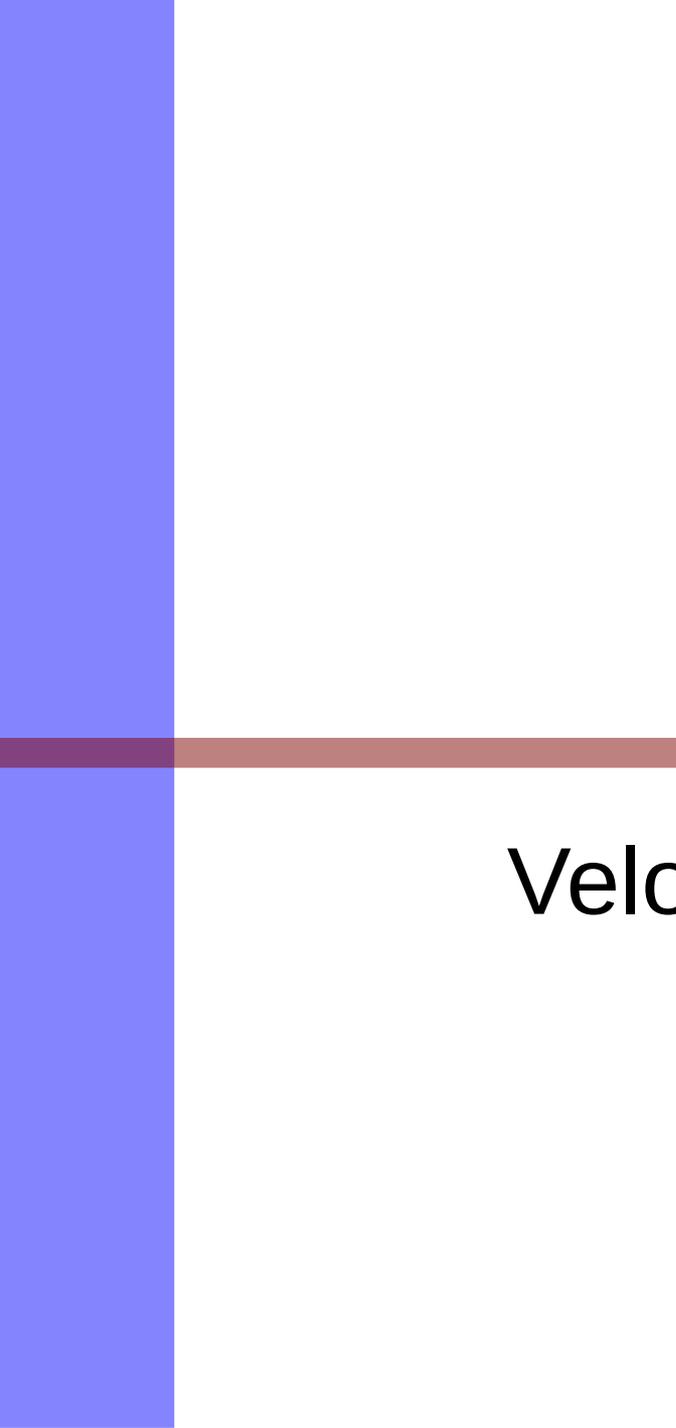
Le Quattro Forze

- **Spinta**
- **Resistenza**
- **Peso**
- **Portanza**



Aeroplani ad “ala piatta”

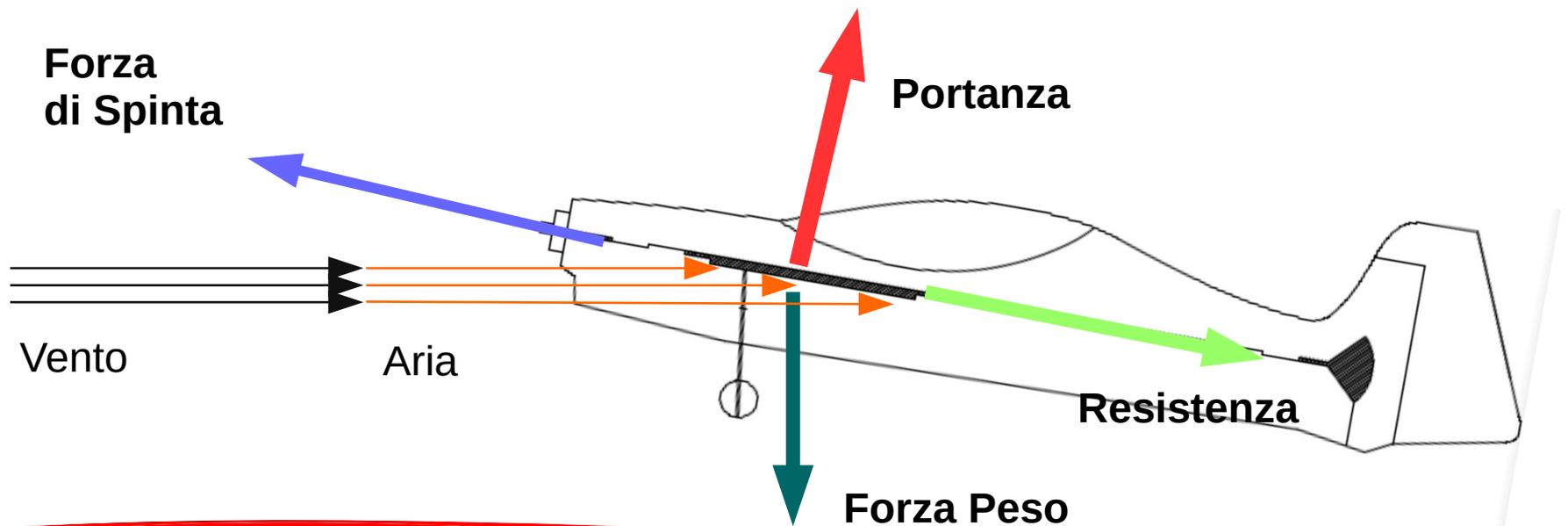




Velocità relativa dell'aria

Spinta, Aria e Velocità relativa

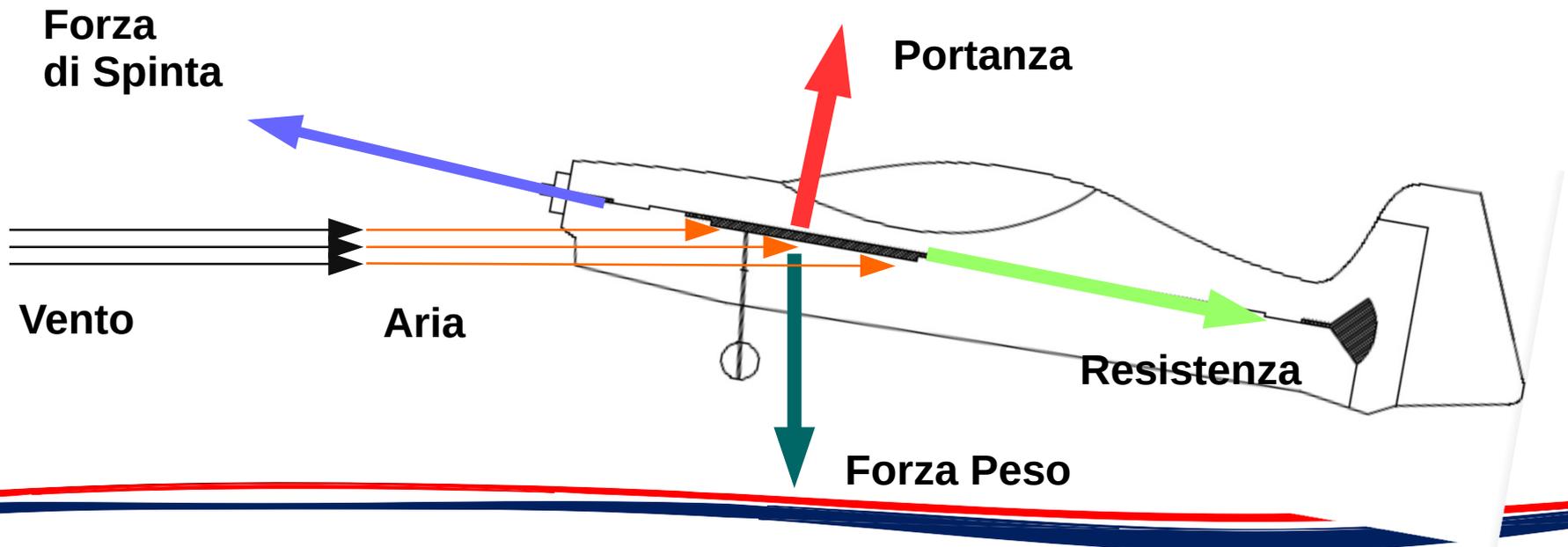
- **Resistenza e Portanza** sono l'effetto dell'incidenza dell'aria sulla superficie alare
- *“Più aria c'è, maggiore è la spinta sull'ala”*
- **Più l'aria è veloce, maggiore è la spinta**

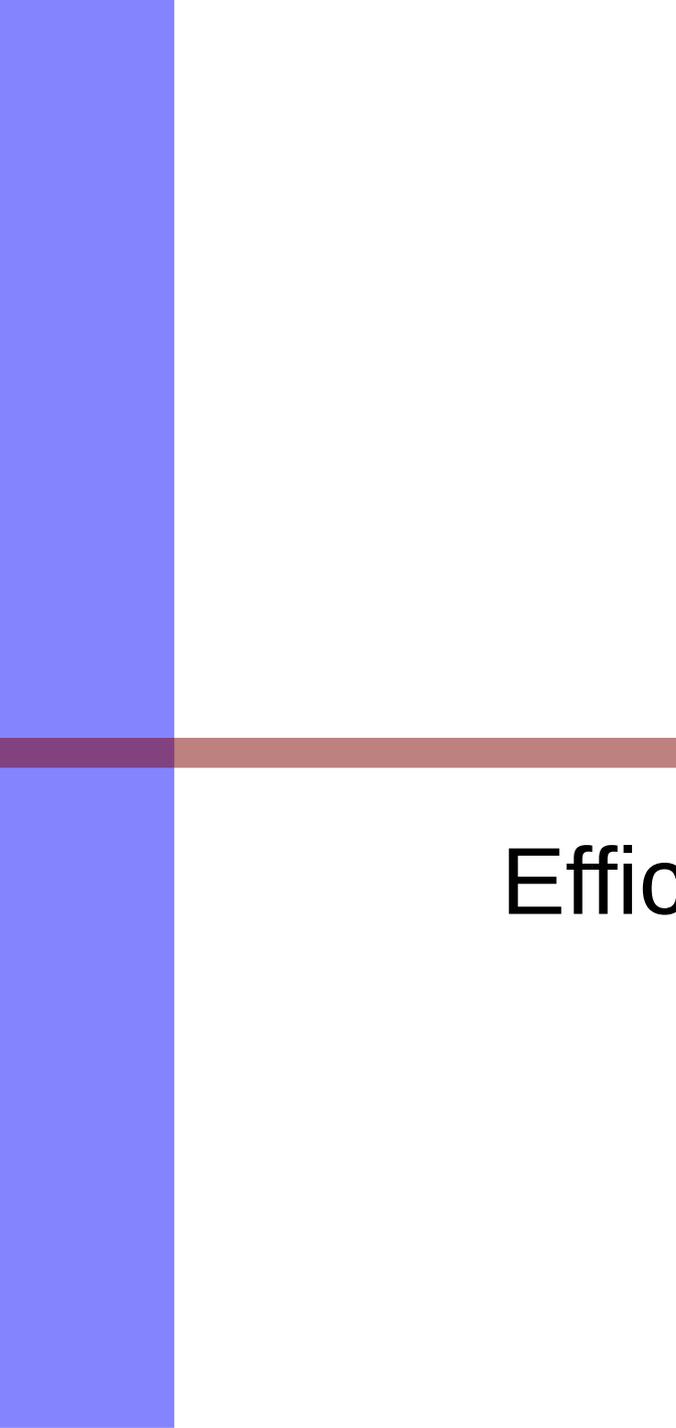


Spinta, Aria e Velocità relativa

- Più l'aria è veloce, maggiore è la spinta
- La velocità dell'aria incidente sull'ala dipende:
 - Dalla spinta del propulsore
 - Dalla eventuale presenza di vento

- La velocità dell'aria incidente (velocità relativa) è dunque la somma tra velocità del propulsore e velocità del vento

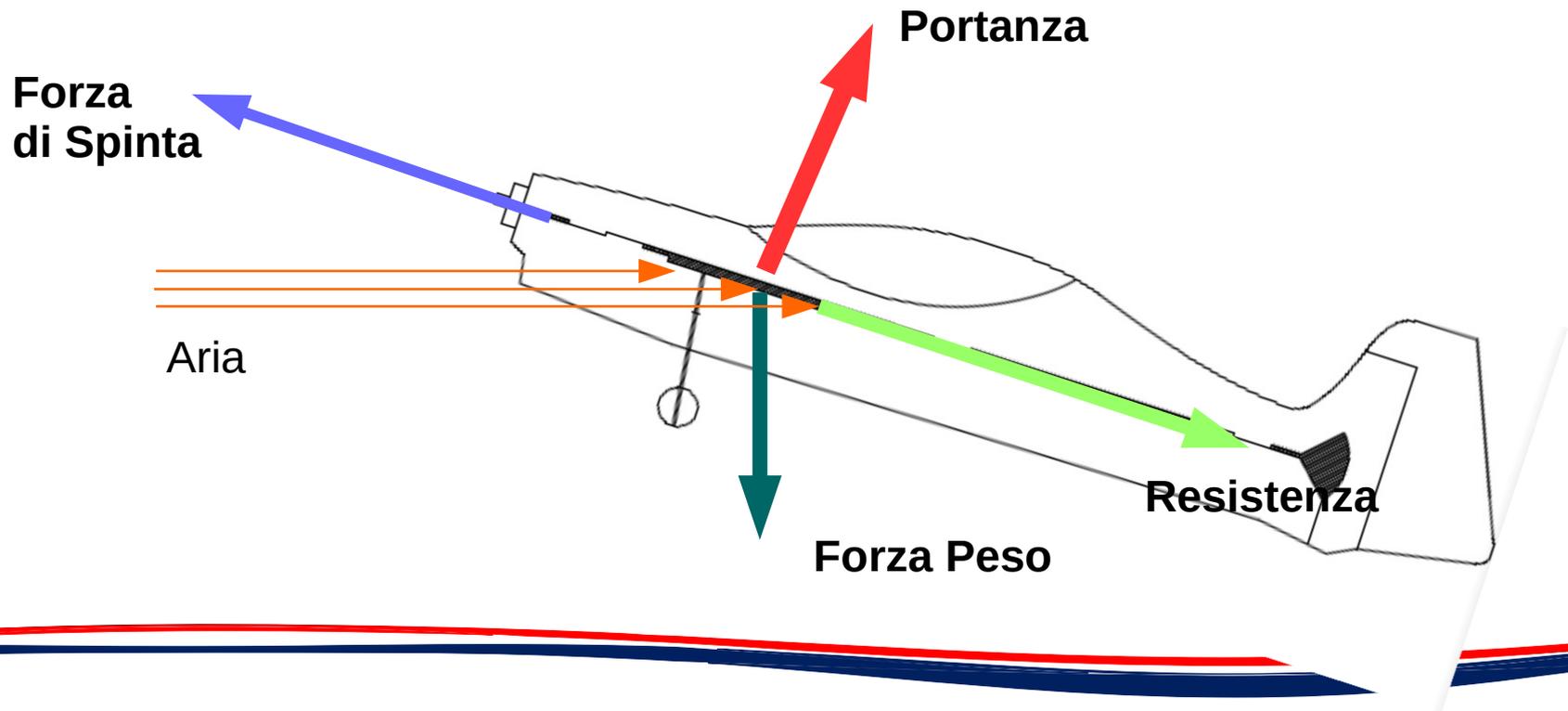




Efficienza e Profilo Alare

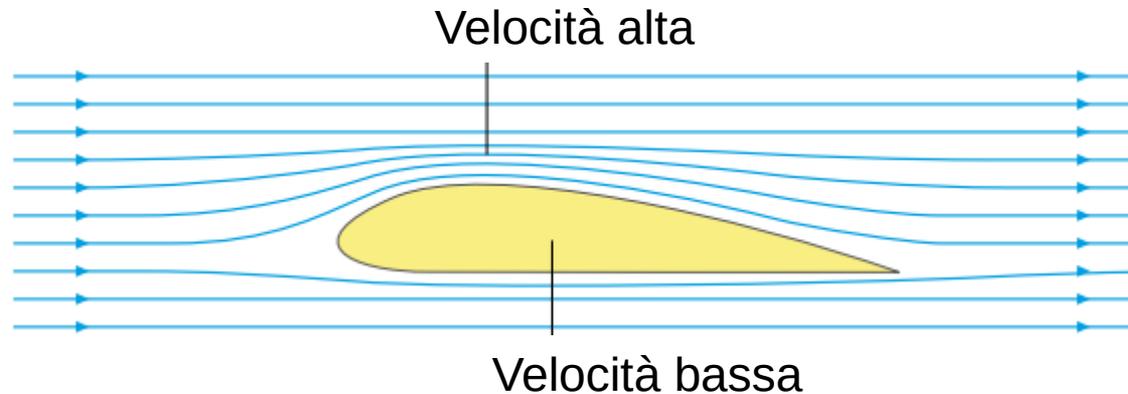
Efficienza

- Al fine di migliorare l'efficienza occorre che
 - La **Resistenza** sia **più piccola possibile** (altrimenti ho bisogno di tanta propulsione)
 - La **Portanza** sia **più grande possibile** (altrimenti per “volare” ho bisogno di peso molto basso)



Il Profilo alare

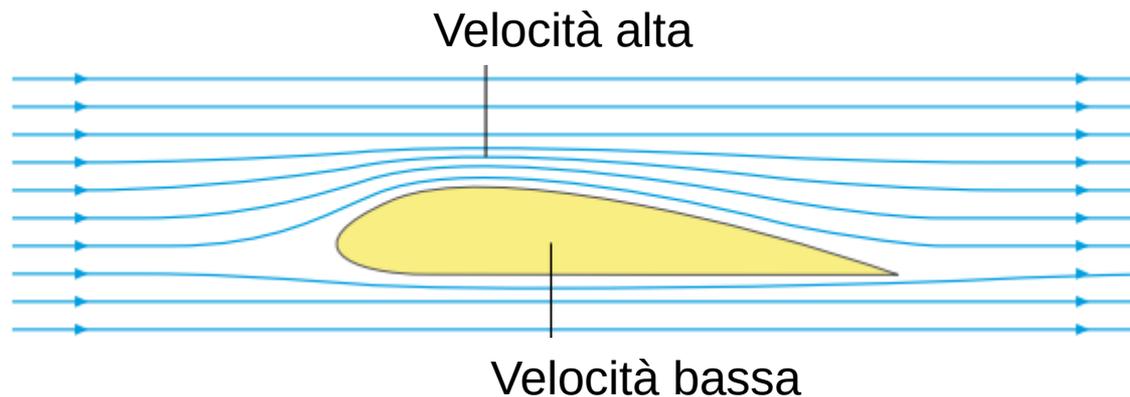
- Supponiamo che la nostra “tavoletta” abbia una sezione (profilo) come quello in figura



- I “filetti” d'aria scorrono sia sopra che sotto la superficie alare
- Ma in alto c'è una “strozzatura” dovuta al profilo alare
- Per il principio di **conservazione della massa** accade che
- **Velocità superficie superiore > Velocità superficie inferiore**

Il Profilo alare e teorema di Bernoulli

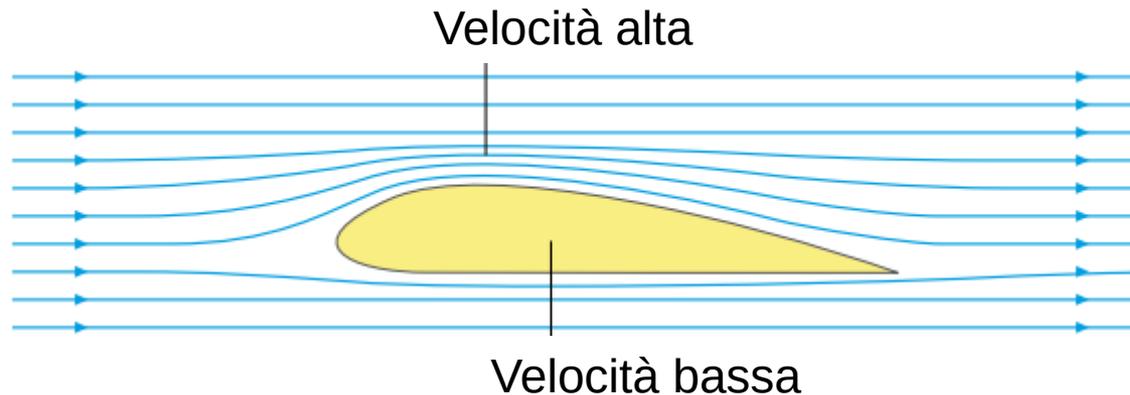
- Il teorema di Bernoulli dice che:
 - In un fluido, **la somma della pressione statica e della pressione dinamica è costante** in qualunque punto del fluido



- **Pressione dinamica:** la forza esercitata dall'aria in movimento, è direttamente proporzionale alla velocità dell'aria

Il Profilo alare e teorema di Bernoulli

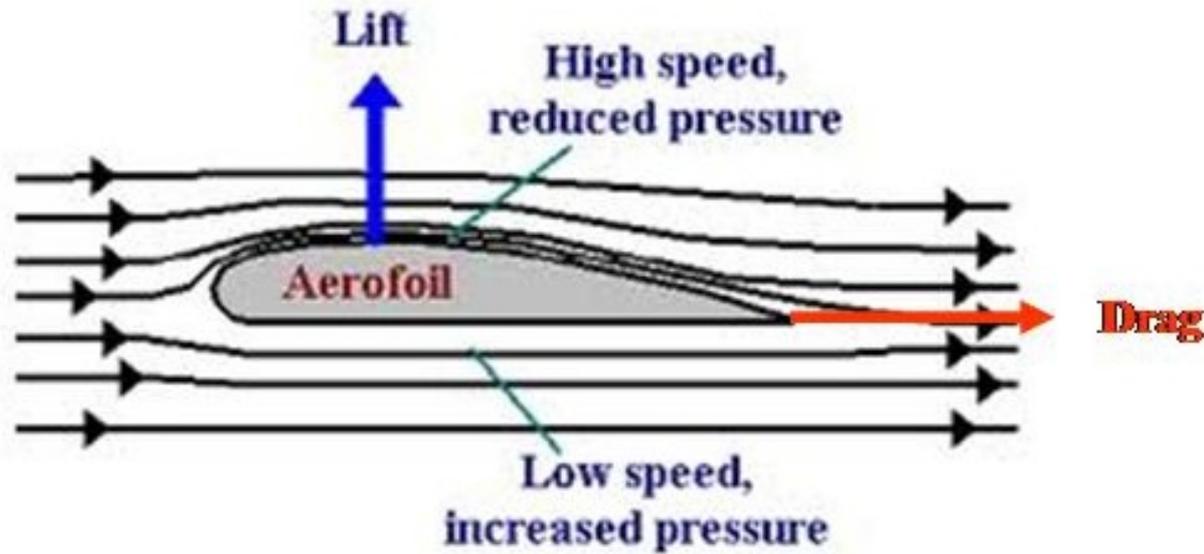
- **Pressione dinamica**: la forza esercitata dall'aria in movimento, è **direttamente proporzionale alla velocità dell'aria**
- **Pressione dinamica in alto > Pressione dinamica in basso**



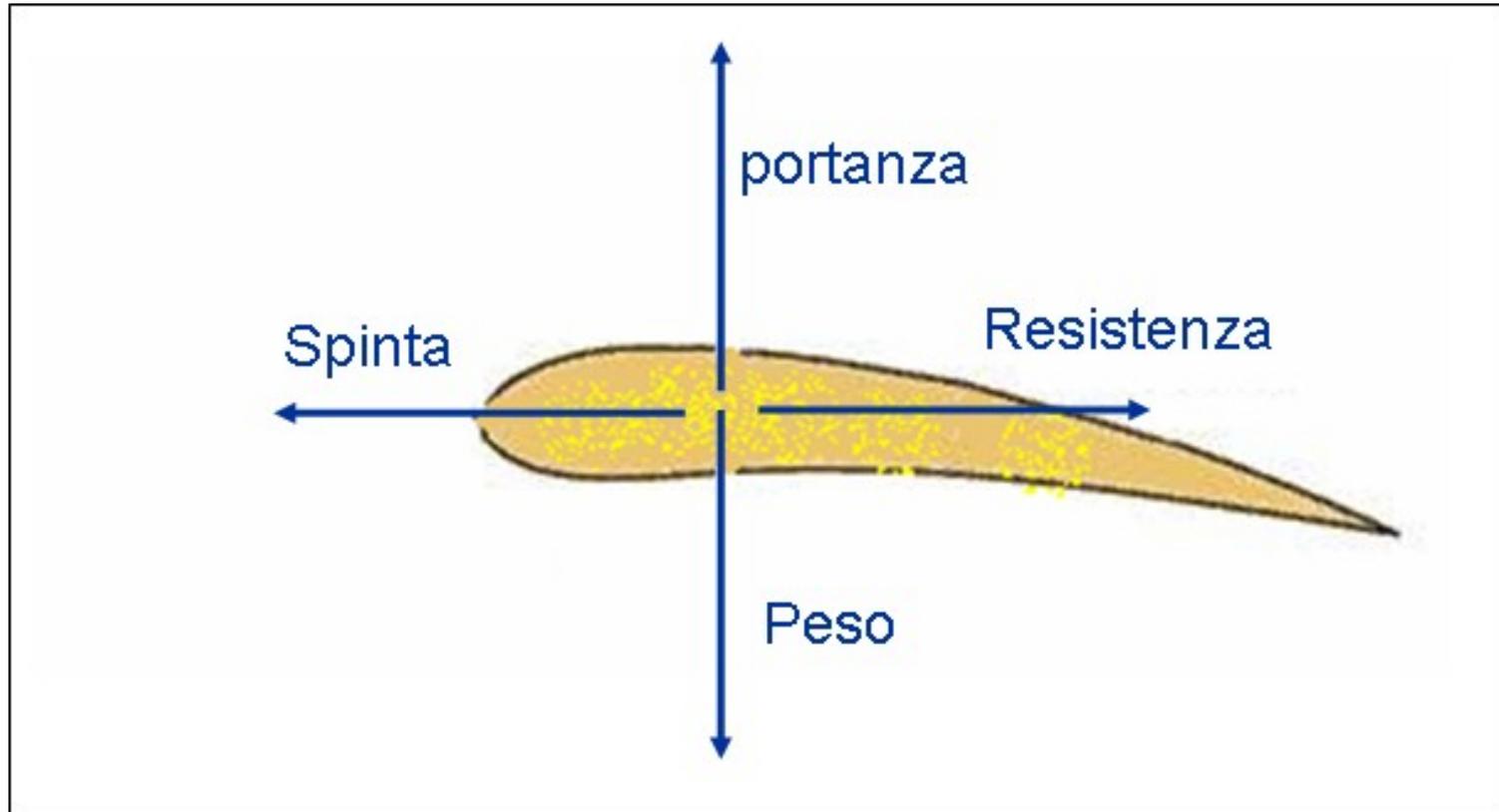
- **Pressione statica + pressione dinamica = costante**
- **Pressione statica in alto < Pressione statica in basso**

Il Profilo alare e teorema di Bernoulli

- **Pressione statica in alto < Pressione statica in basso**
- La differenza di pressione statica implica una **depressione** nella parte superiore
- La depressione provoca una **forza** di spinta verso l'alto: **PORTANZA**

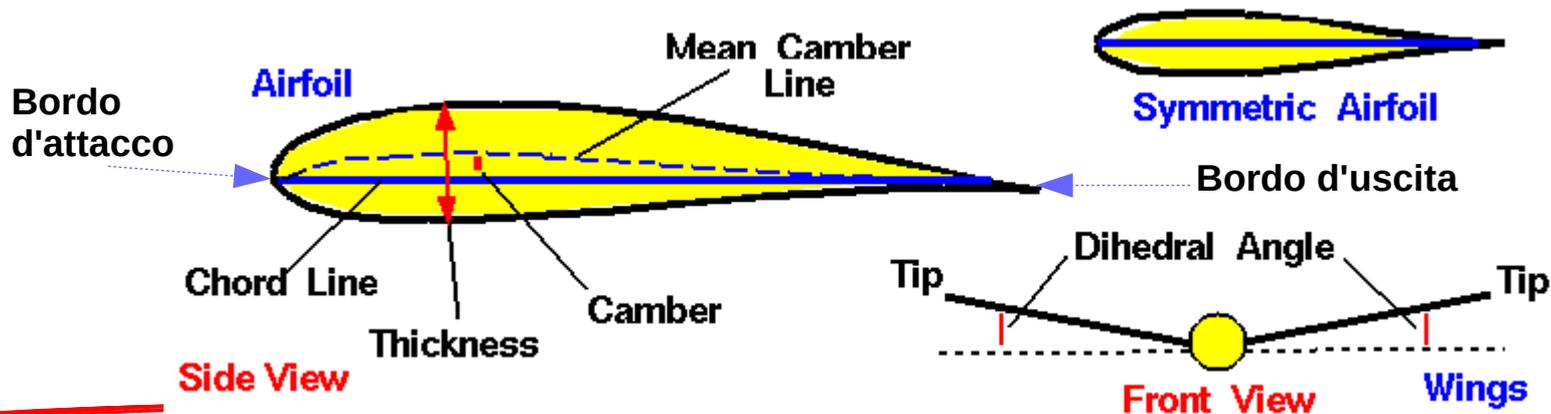


Le quattro forze su profilo alare



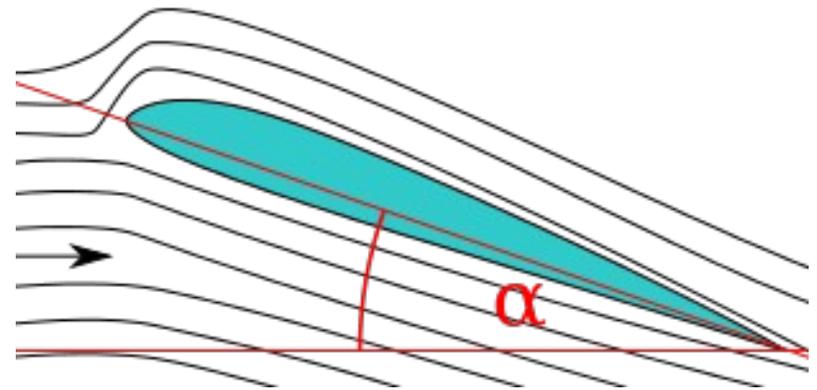
Profilo Alare: Parametri Geometrici

- **Bordo d'attacco:** punto/i anteriore/i di incidenza dell'aria
- **Bordo d'uscita:** punto/i opposto/i al bordo d'attacco
- **Corda (Chord):** segmento che unisce il bordo d'attacco con il bordo d'uscita
- **Linea di Curvatura (Camber line):** linea mediana luogo geometrico dei punti equidistanti dalle superfici sia superiore che inferiore
- **Thickness (spessore):** massima distanza tra superficie superiore e superficie inferiore



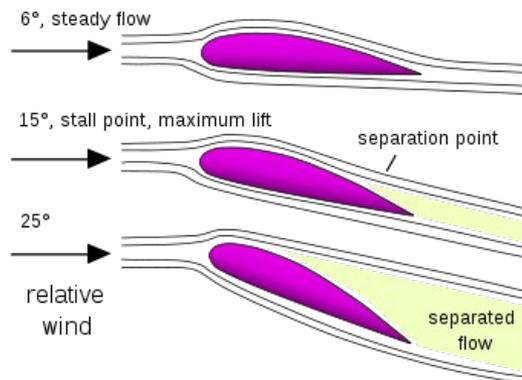
Angolo di incidenza

- La portanza e resistenza di un profilo alare dipendono
 - Dalla forma del profilo
 - Dall'angolo di incidenza
- **L'angolo di incidenza è l'angolo che forma la corda con la linea dell'orizzonte**
- Maggiore è l'angolo di incidenza (inclinazione dell'ala)
 - **Maggiore è la portanza**
 - **Maggiore è la resistenza**



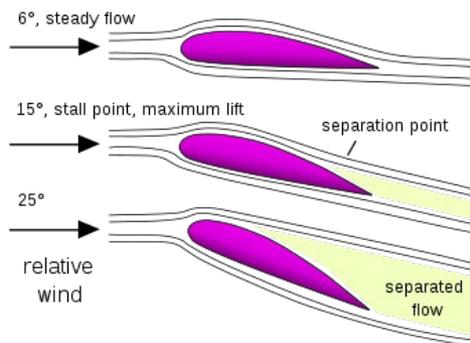
Angolo di incidenza

- Maggiore è l'angolo di incidenza (inclinazione dell'ala)
 - **Maggiore è la portanza**
 - **Maggiore è la resistenza**
- Ma fino a un certo punto critico!!
- Superando un **angolo critico**, i filetti fluidi si staccano dalla superficie superiore creando **moti turbolenti**
- **La depressione cessa, l'ala va in STALLO**



Angolo di incidenza e velocità

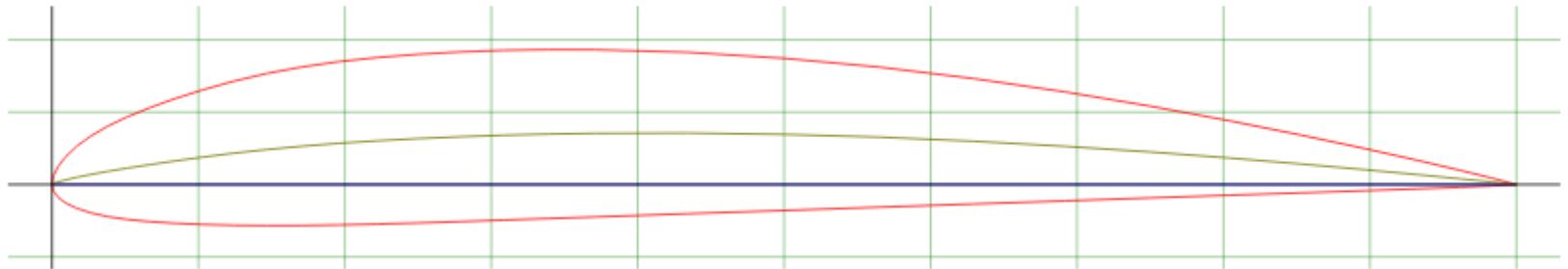
- L'angolo di stallo dipende anche dalla velocità (relativa) dell'aria
 - **Maggiore è la velocità più alto è l'angolo di stallo**
 - **Minore è la velocità più basso è l'angolo stallo**
- Ad angolo di attacco costante:
 - Diminuendo via via la velocità si arriva ad una velocità limite dove l'ala perde portanza
 - **Tale velocità è detta velocità di stallo**



Profili Alari e Curve Polari

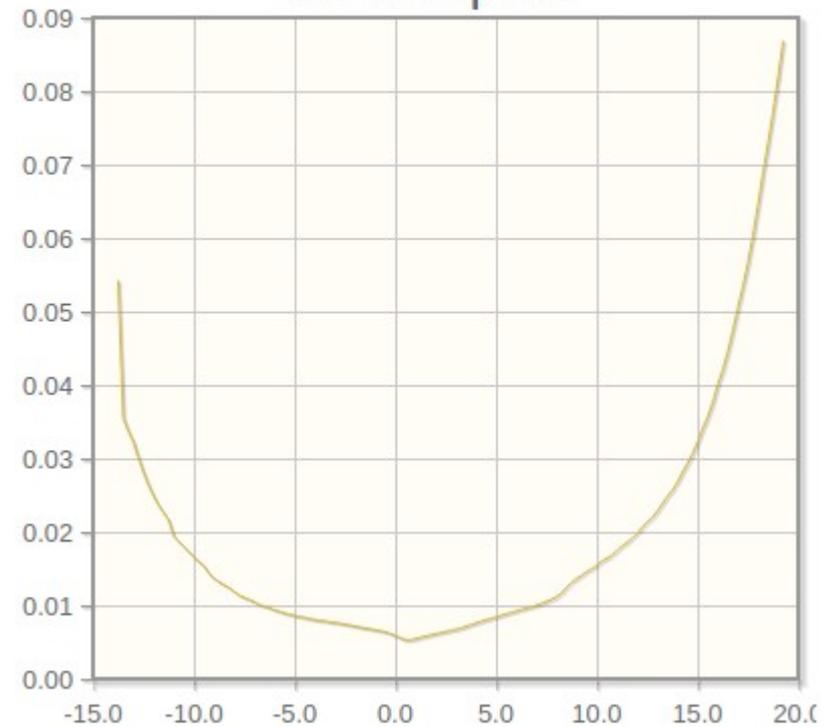
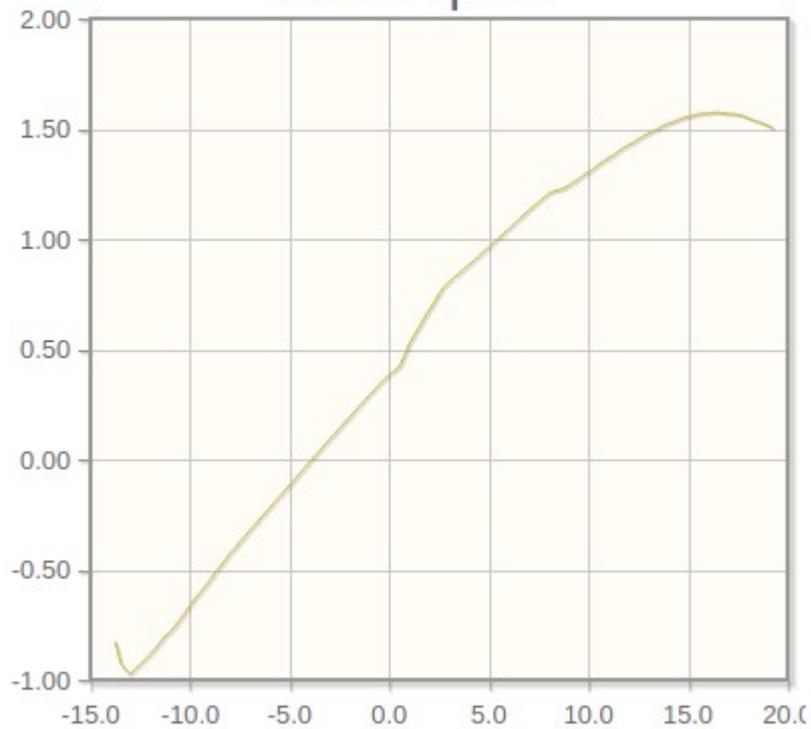
- Le caratteristiche dinamiche di spinta dell'ala dipendono fortemente dal suo profilo
- I parametri di portanza e resistenza sono definiti da due coefficienti
 - Coefficiente di portanza (**C_y, C_p, C_l**)
 - Coefficiente di resistenza (**C_x, C_r, C_d**)
- La dipendenza di tali coefficienti da **velocità e angolo di attacco** è definita dalle cosiddette **curve polari**
- Le **curve polari** sono caratteristiche proprie di ogni profilo

Profilo Piano-Convesso "Clark-Y"



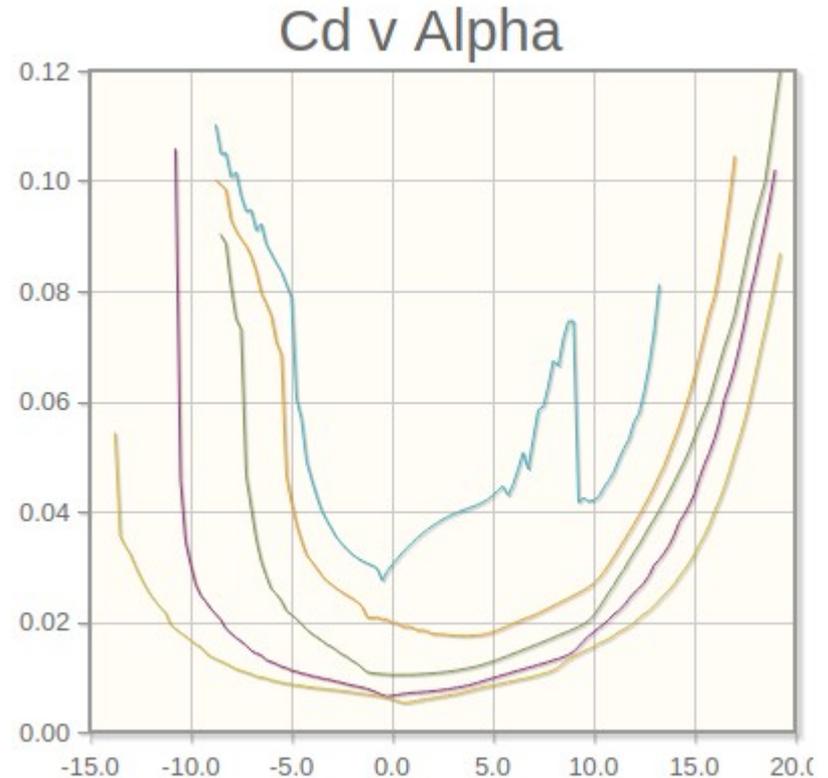
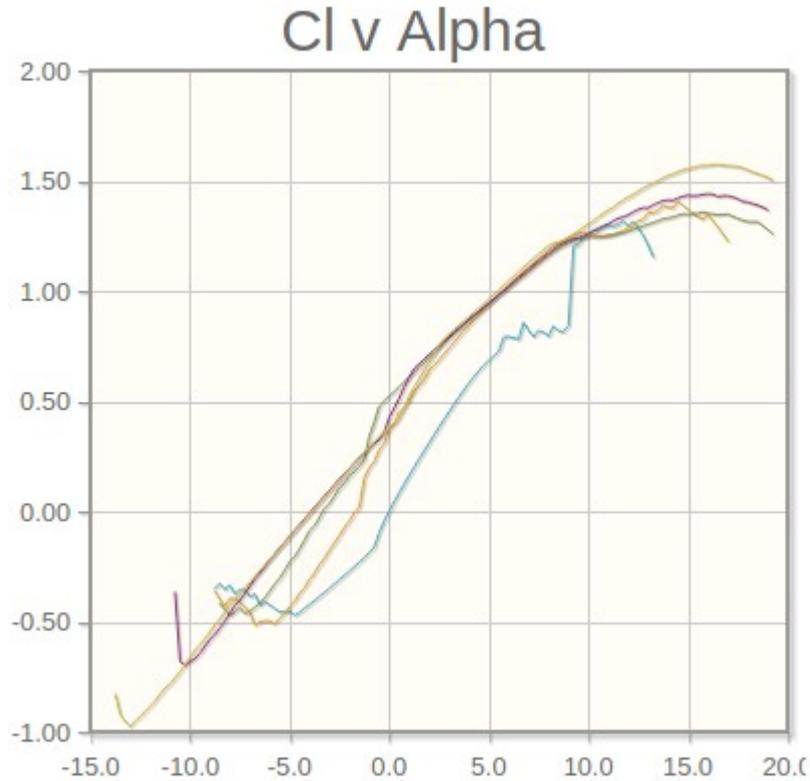
Cl v Alpha

Cd v Alpha



Fonte <http://airfoiltools.com>

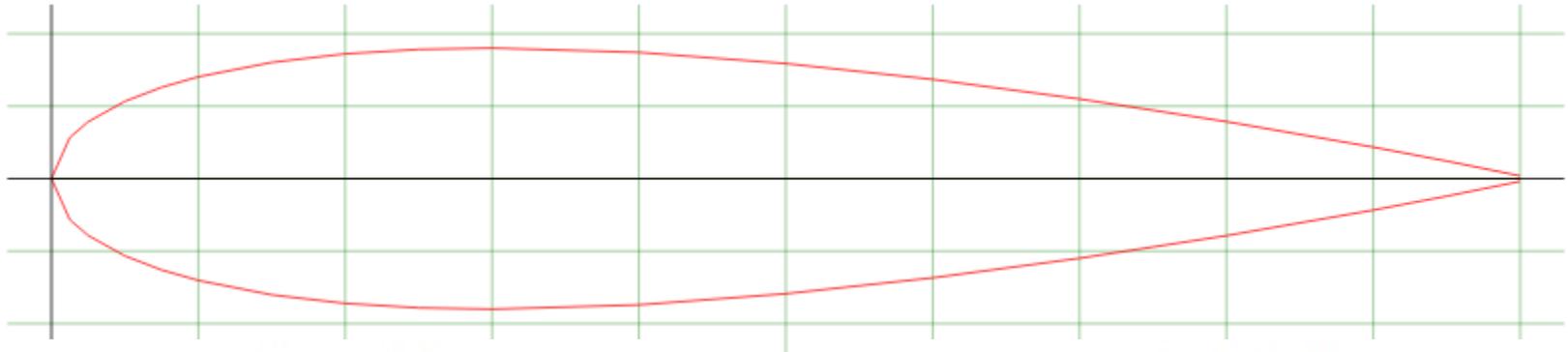
Profilo "Clark-Y"- Dipendenza dalla velocità



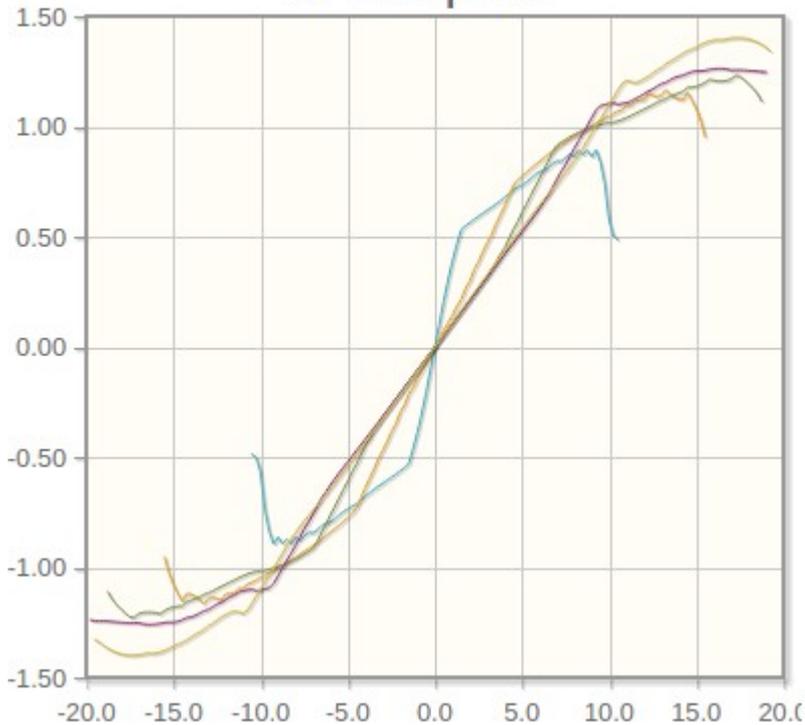
Ogni curva è riferita ad una diversa velocità relativa (numero di Reynolds)

Fonte <http://airfoiltools.com>

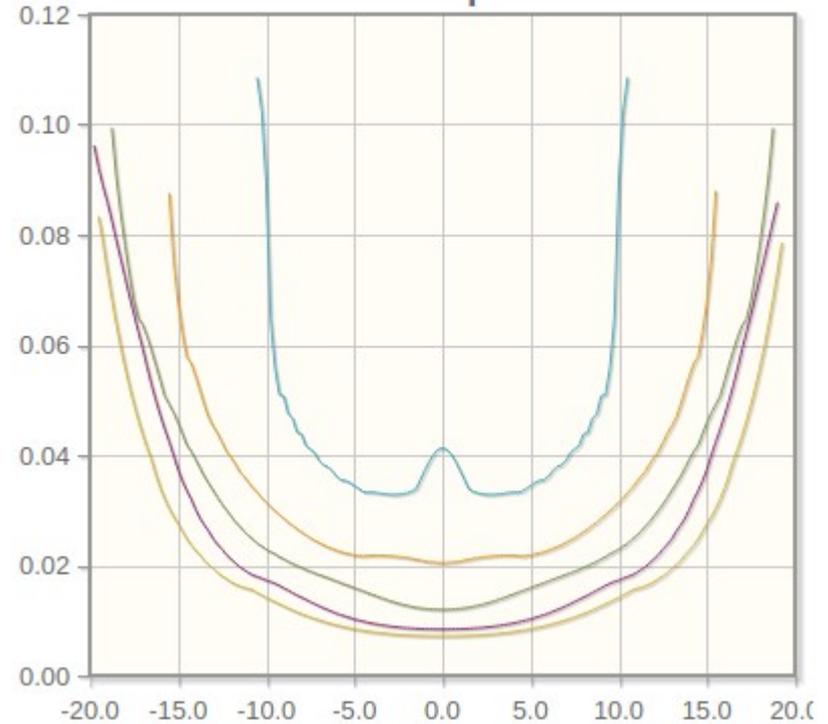
Profilo Simmetrico "NACA0018"



Cl v Alpha

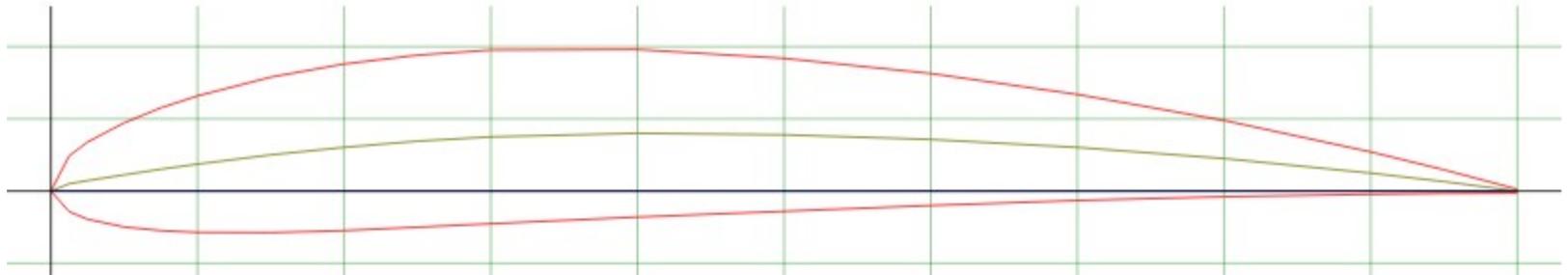


Cd v Alpha

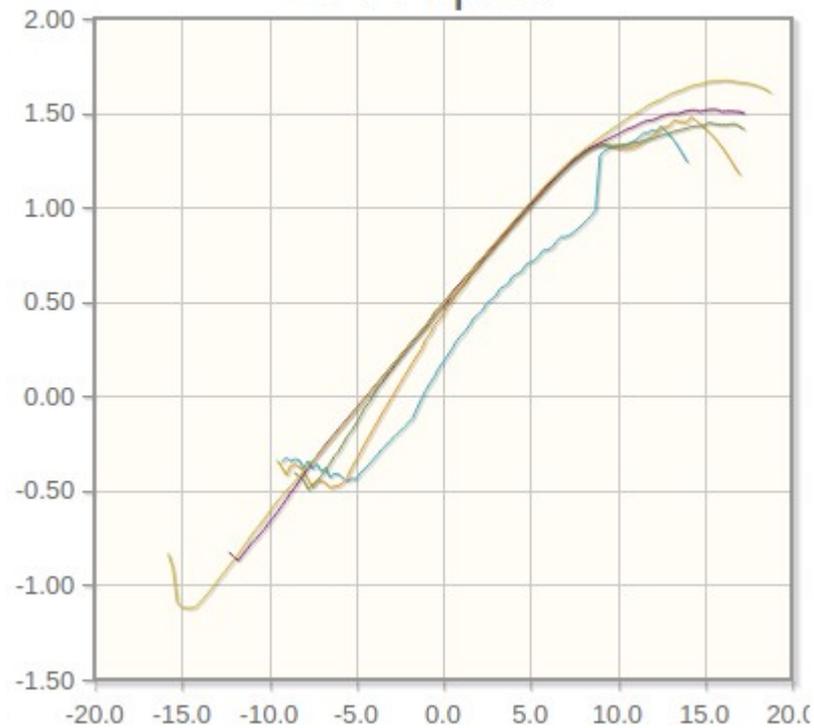


NACA = National Advisory Committee for Aeronautics

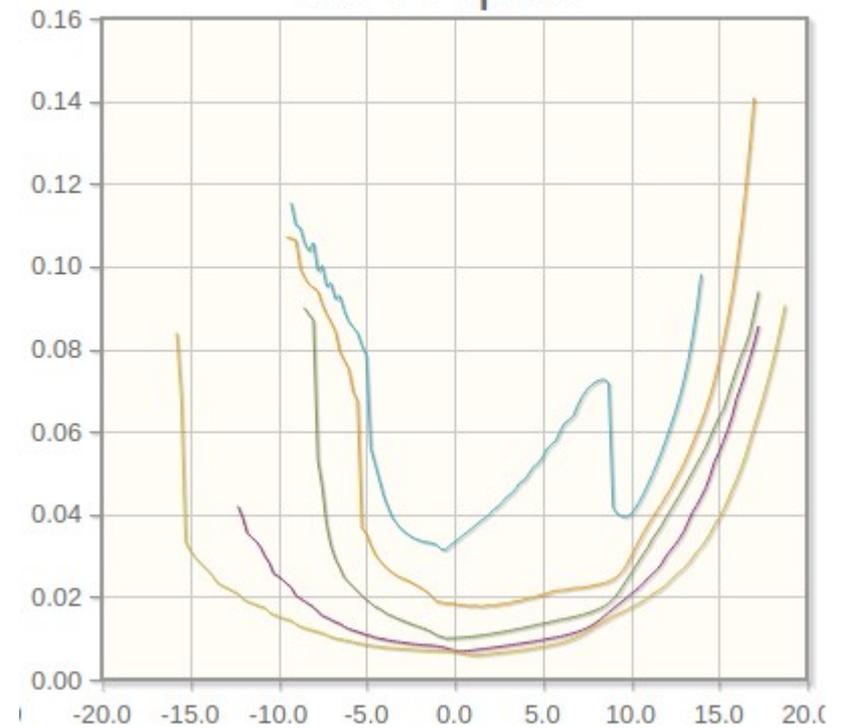
Profilo asimmetrico "NACA4412"



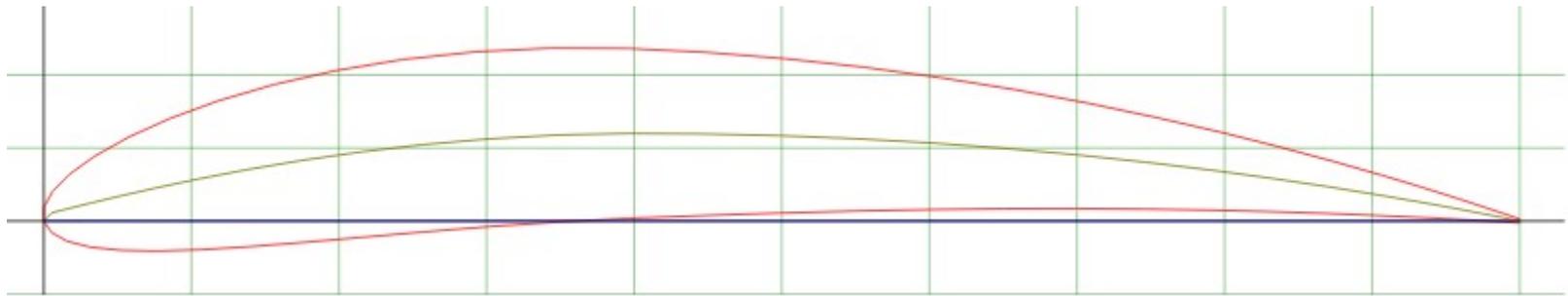
Cl v Alpha



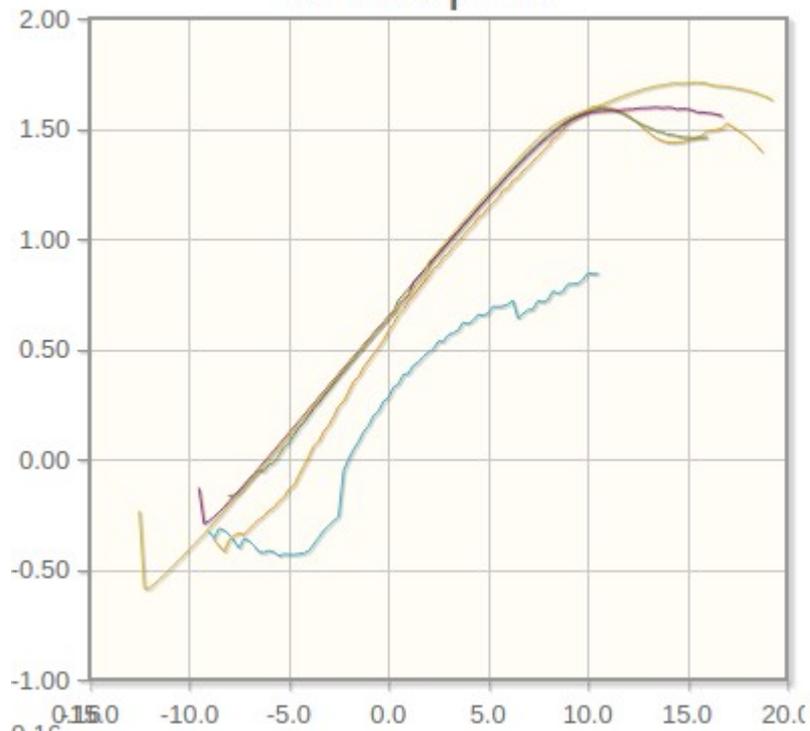
Cd v Alpha



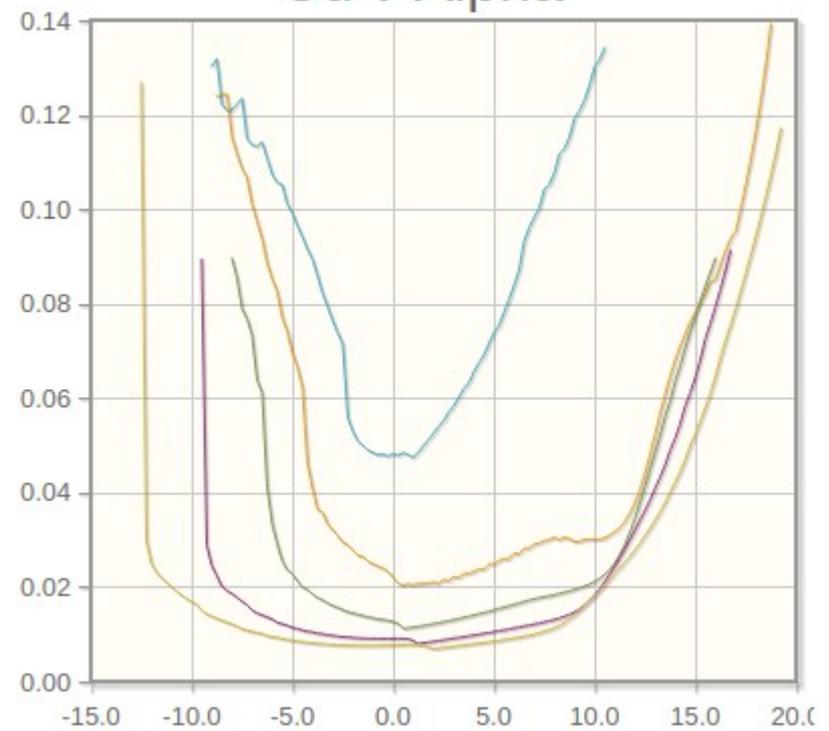
Profilo concavo-convesso "NACA6412"



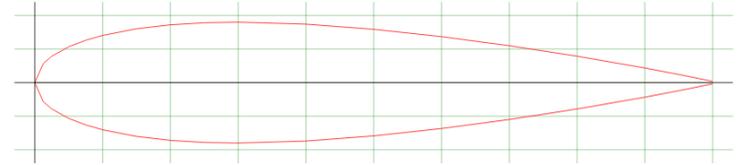
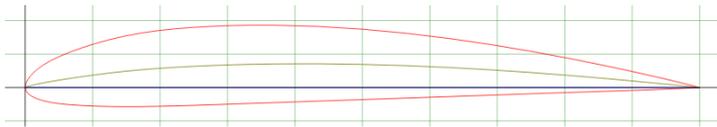
Cl v Alpha



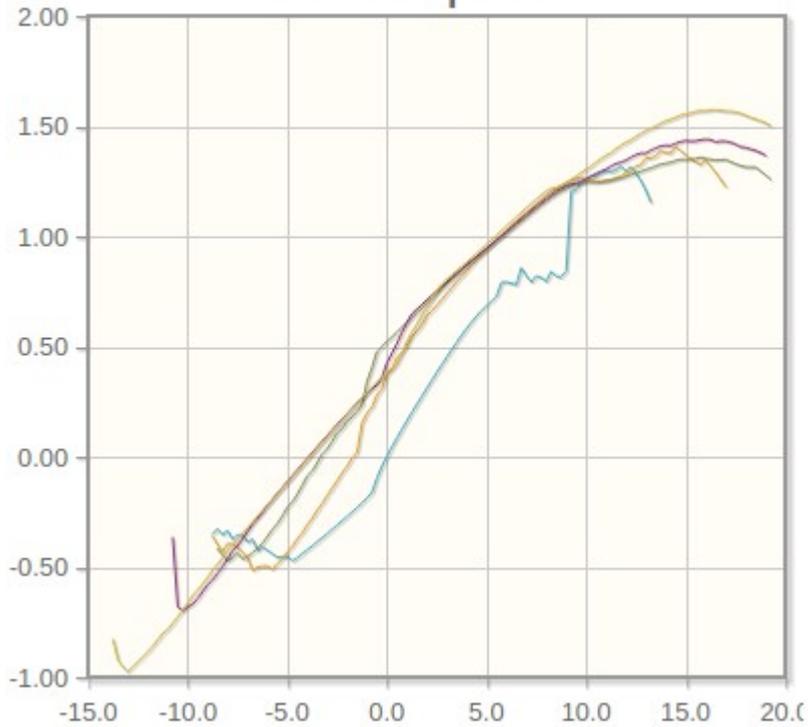
Cd v Alpha



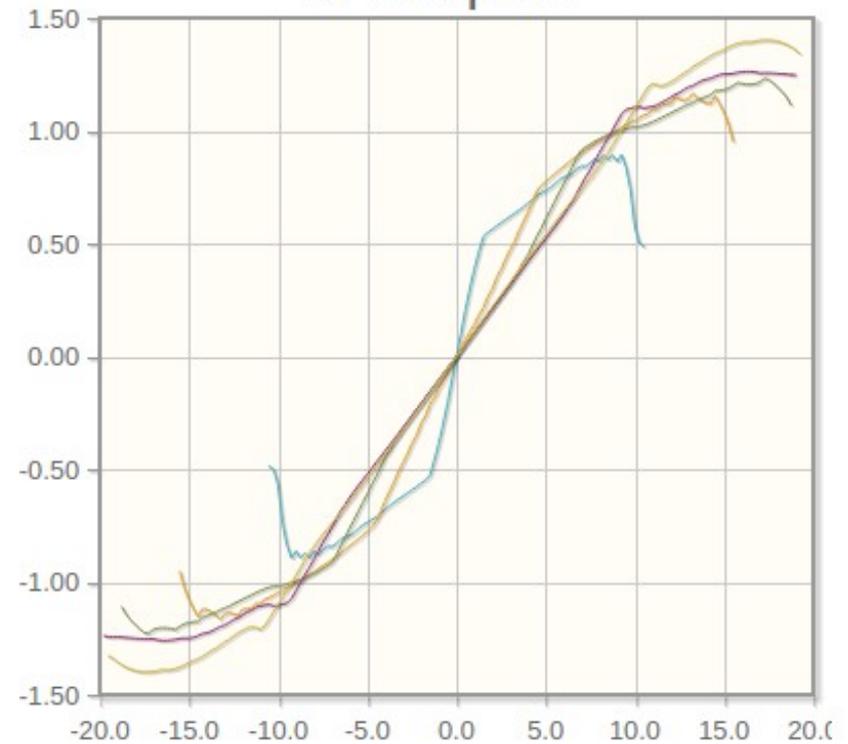
Piano-convesso vs. Simmetrico



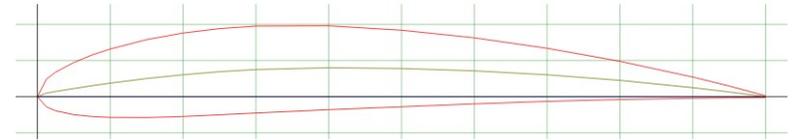
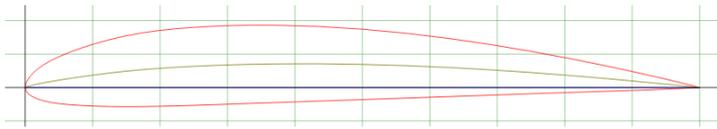
Cl v Alpha



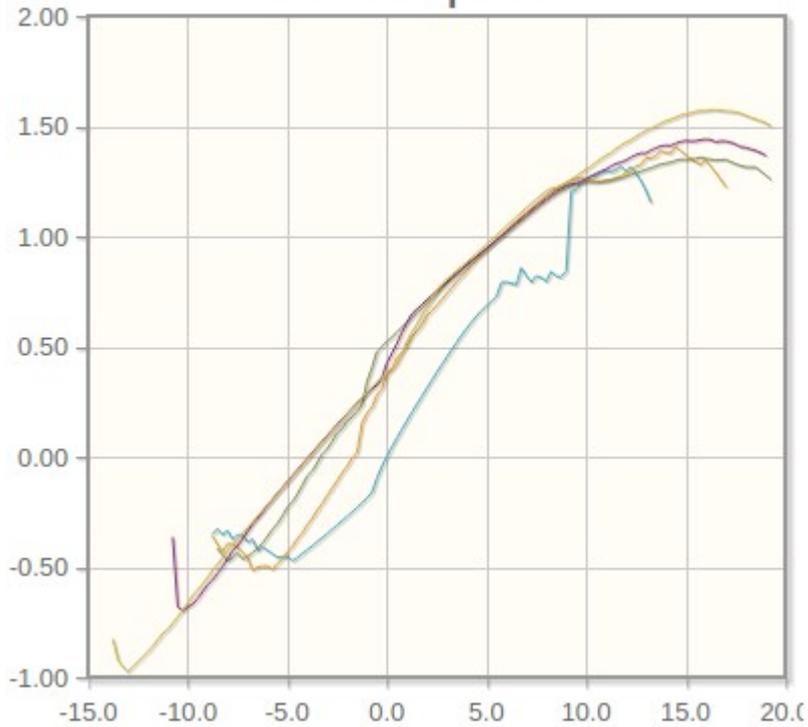
Cl v Alpha



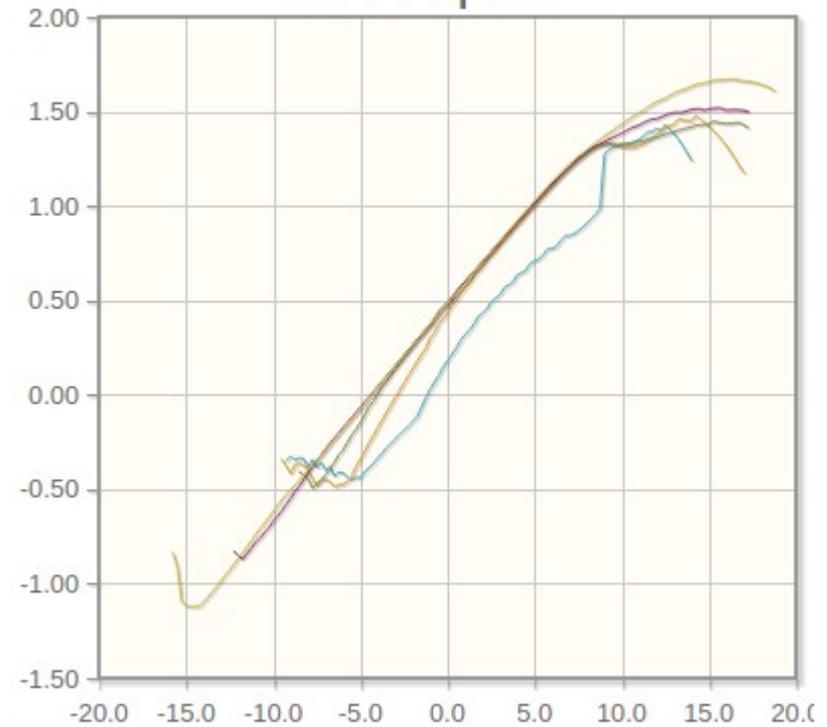
Piano-convesso vs. asimmetrico



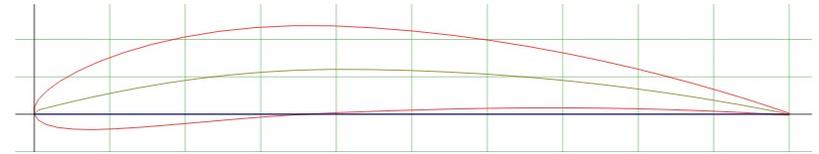
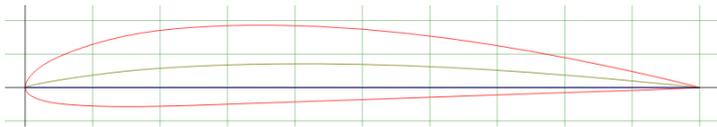
Cl v Alpha



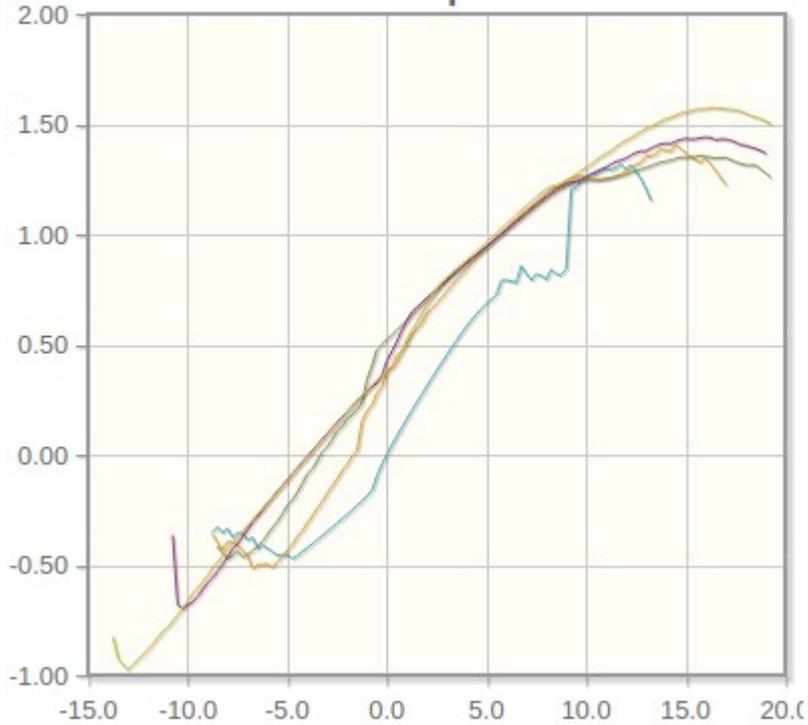
Cl v Alpha



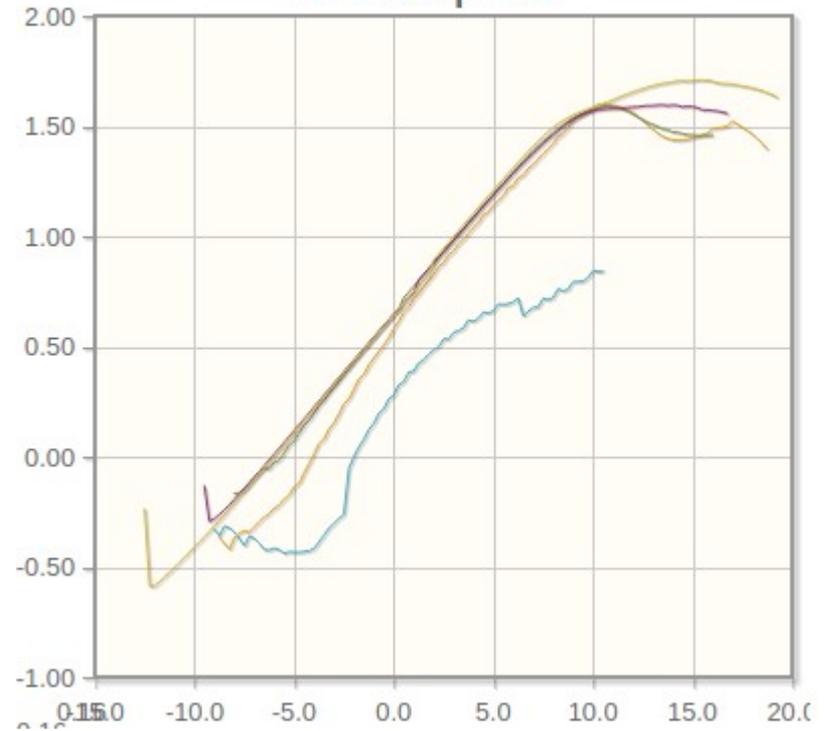
Piano-convesso vs. conc.-conv.



Cl v Alpha



Cl v Alpha



Altri parametri sensibili

- **Forma e dimensione dell'ala**
 - Rettangolare
 - Trapezoidale
 - A freccia
- **Rastrematura (Diedro)**
- **Carico alare (peso sull'unità di superficie)**
 - **Alianti:** 20-40 kg/m²
 - **Aeroplani:** 60-250 kg/m²
 - **Caccia:** 400-700 kg/m²
 - **Aeromodelli:** 30-100 g/dm² (3-10 kg/m²)

Modifica del profilo: Alettoni

- L'**alettone** (o **flap**) provoca una modifica del profilo alare
- Quando il flap è **abbassato**, la portanza **aumenta**
- Quando il flap è **alzato**, la portanza **diminuisce**

Fig. A



Fig. B

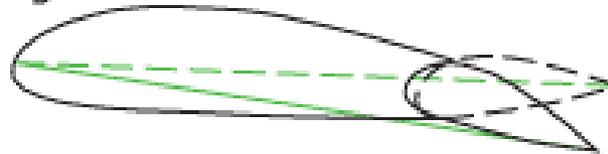


Fig. C

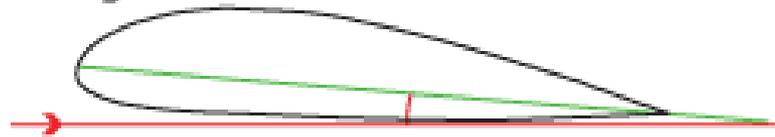
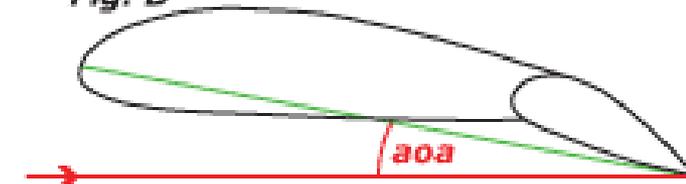


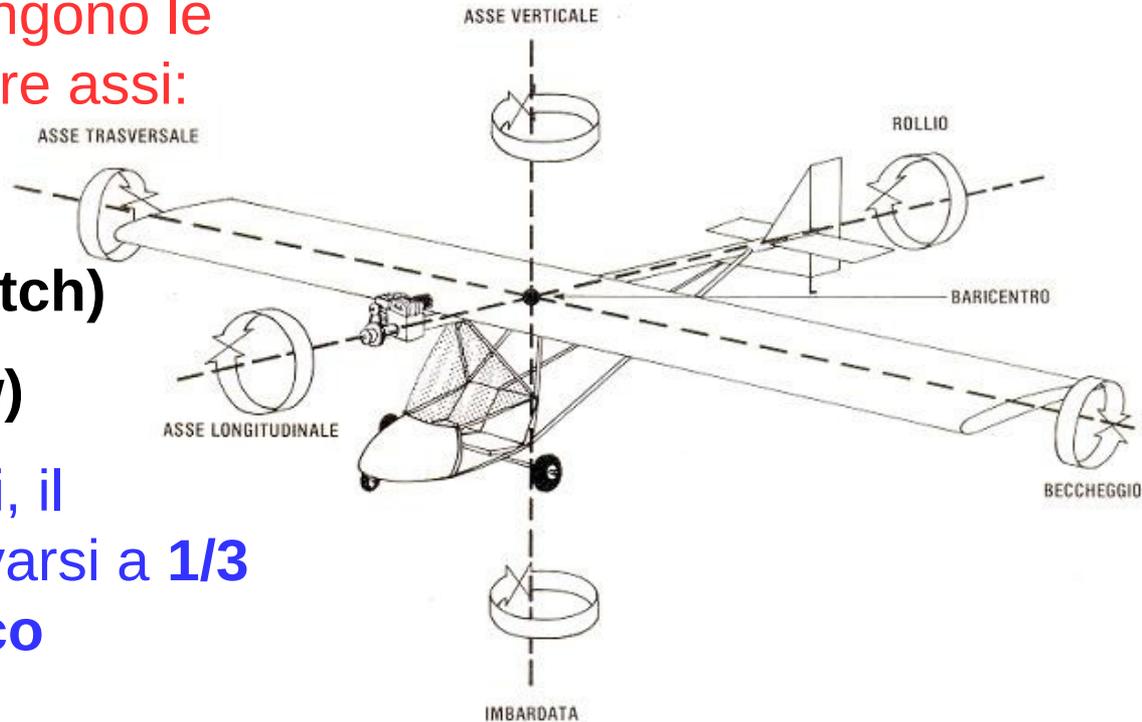
Fig. D



Relative airflow

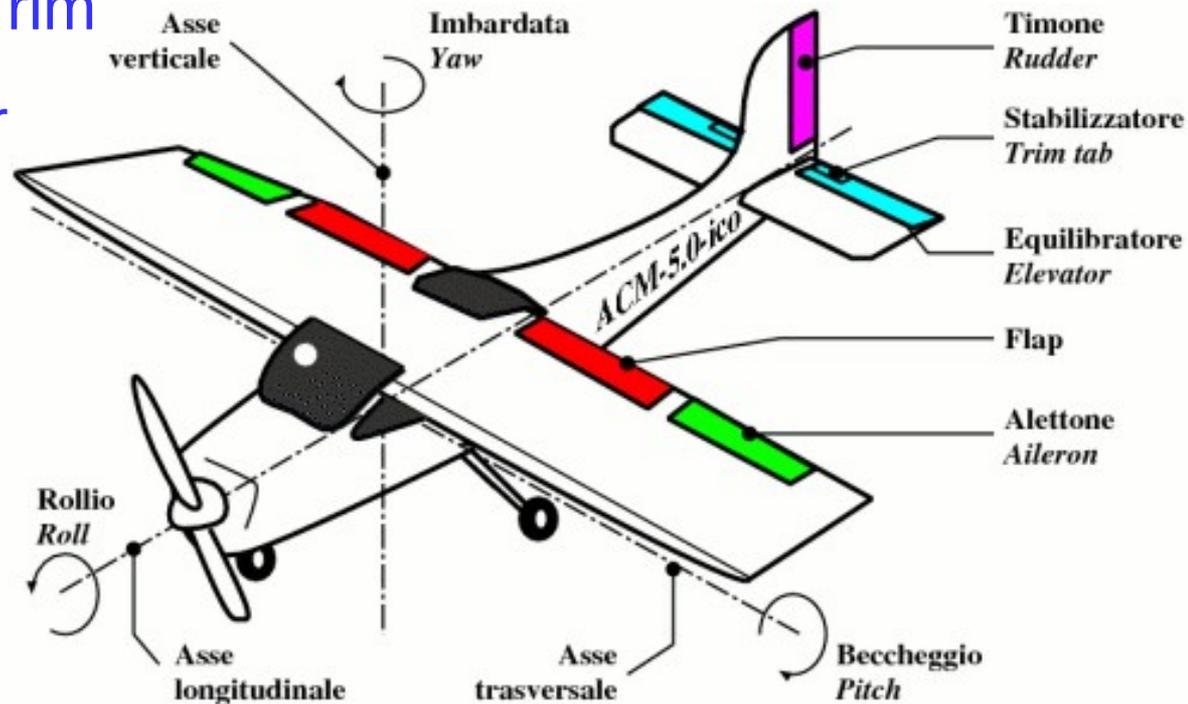
Baricentro di un aeromobile

- Il Baricentro è il centro di massa di un corpo rigido
- In un aeromobile, il baricentro è il punto su cui avvengono le rotazioni intorno ai tre assi:
 - **Rollio (roll)**
 - **Beccheggio (pitch)**
 - **Imbardata (yaw)**
- Nelle ali rettangolari, il baricentro deve trovarsi a **1/3 dal bordo di attacco**



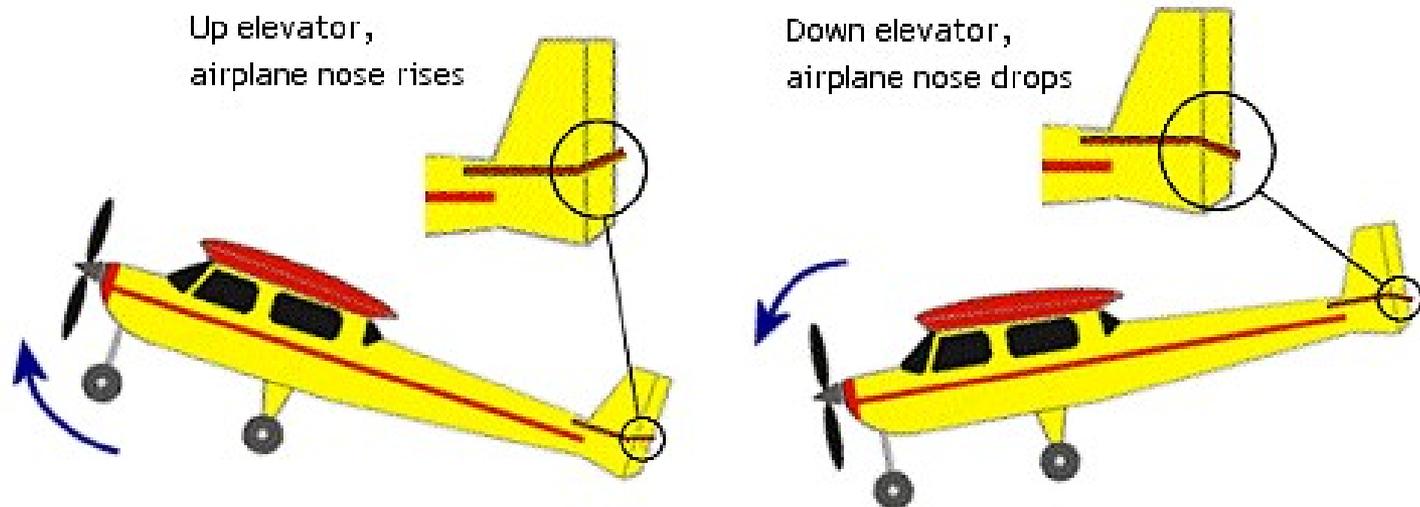
Aeromobile: superfici mobili

- Alettoni / Aleirons
- Flaps
- Equilibratore / Elevator
- Stabilizzatore / Trim
- Timone / Rudder



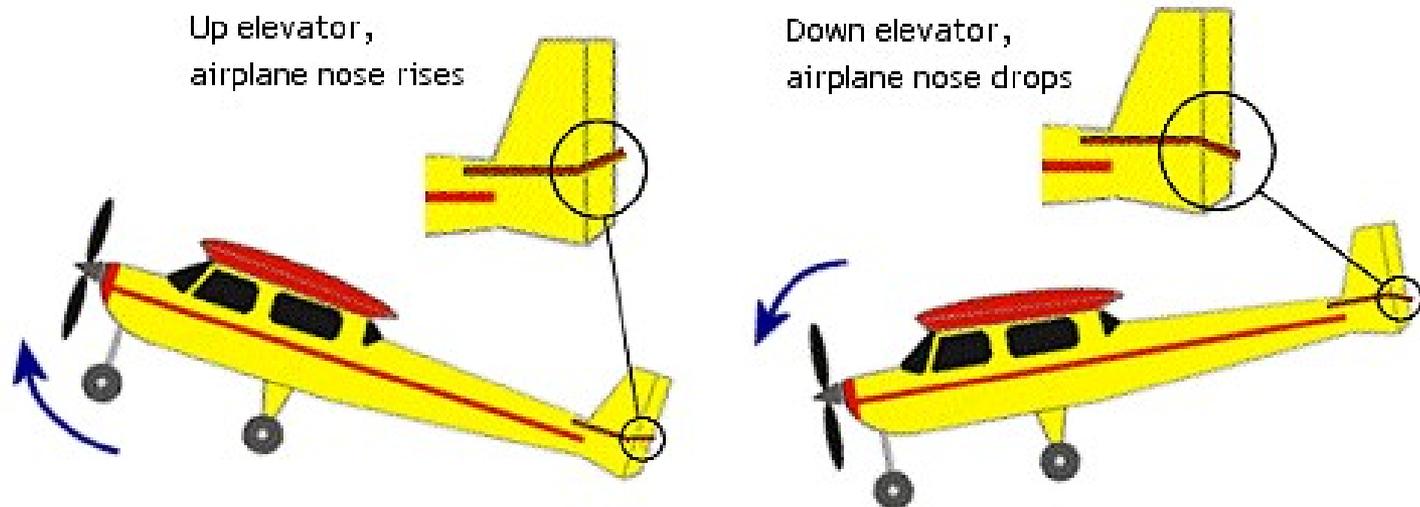
Equilibratore / Elevator

- L'equilibratore provoca una rotazione di **beccheggio (pitch)** dell'aeromobile
- Il risultato è una modifica dell'**angolo di attacco dell'ala**
- Se α aumenta, aumenta la **portanza**
 - E la velocità è **sufficiente**, l'aeromobile **sale** verso l'alto
 - Se la velocità **non è sufficiente** si rischia lo **stallo**



Equilibratore / Elevator

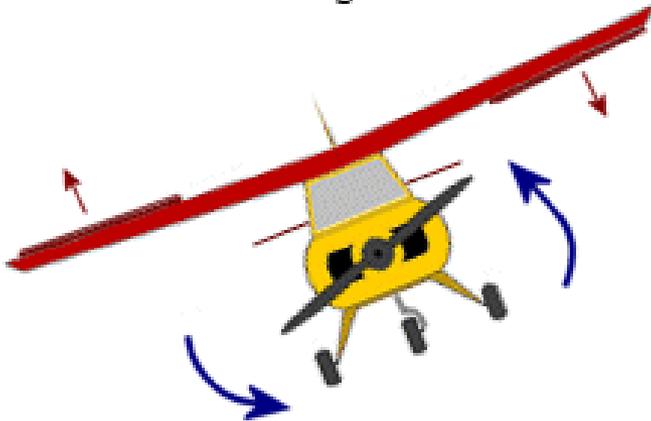
- L'equilibratore provoca una rotazione di **beccheggio (pitch)** dell'aeromobile
- Il risultato è una modifica dell'**angolo di attacco dell'ala**
- Se α **diminuisce**, diminuisce la **portanza**
 - l'aeromobile **scende** verso il basso



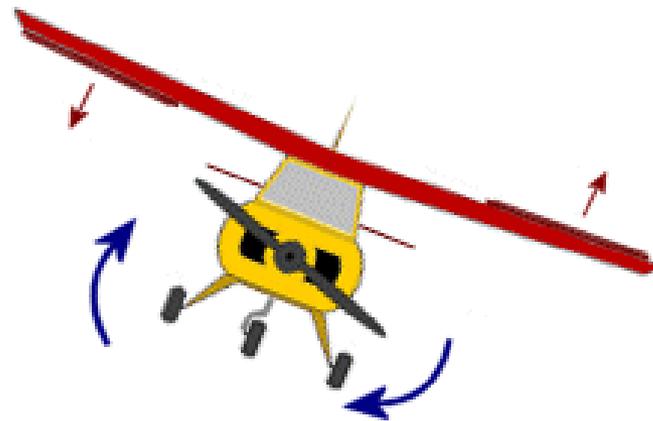
Alettoni / Aleirons

- Gli alettoni provocano una forma al profilo alare
- La modifica è **simmetrica**:
 - Un'ala aumenta la sua portanza
 - L'altra ala diminuisce (parimenti) la sua portanza
- Il risultato è una rotazione sull'asse di **rollio**

Left aileron down, right one up
causes a roll to the right

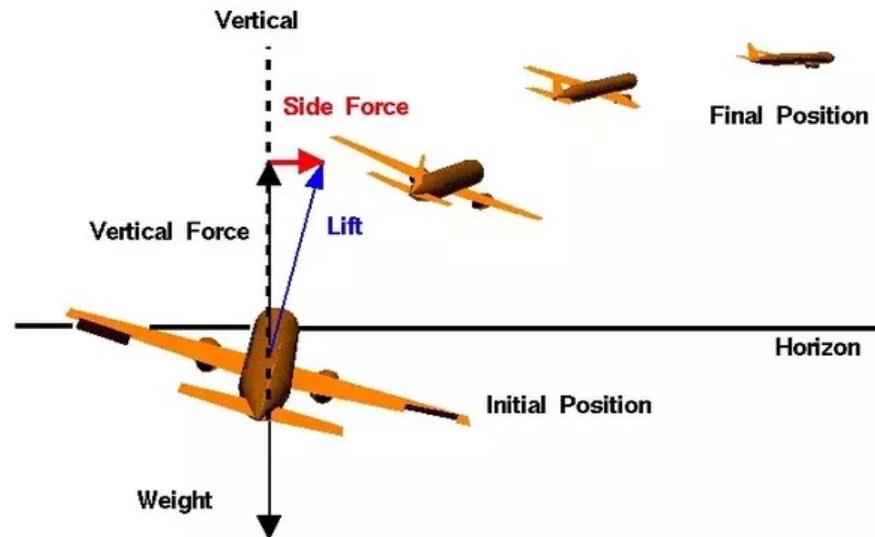


Left aileron up, right one down
causes a roll to the left



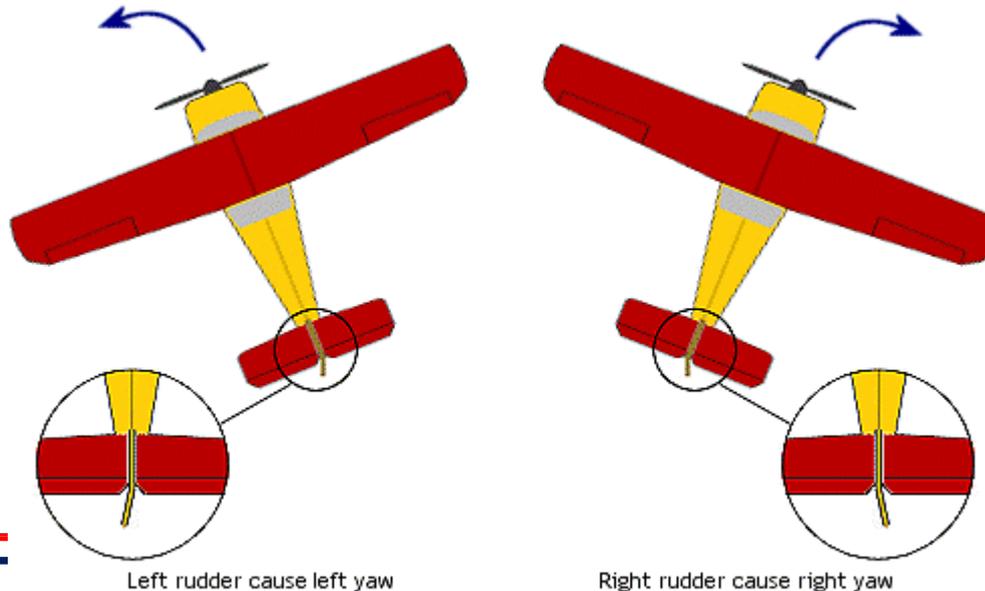
Alettoni / Aleirons

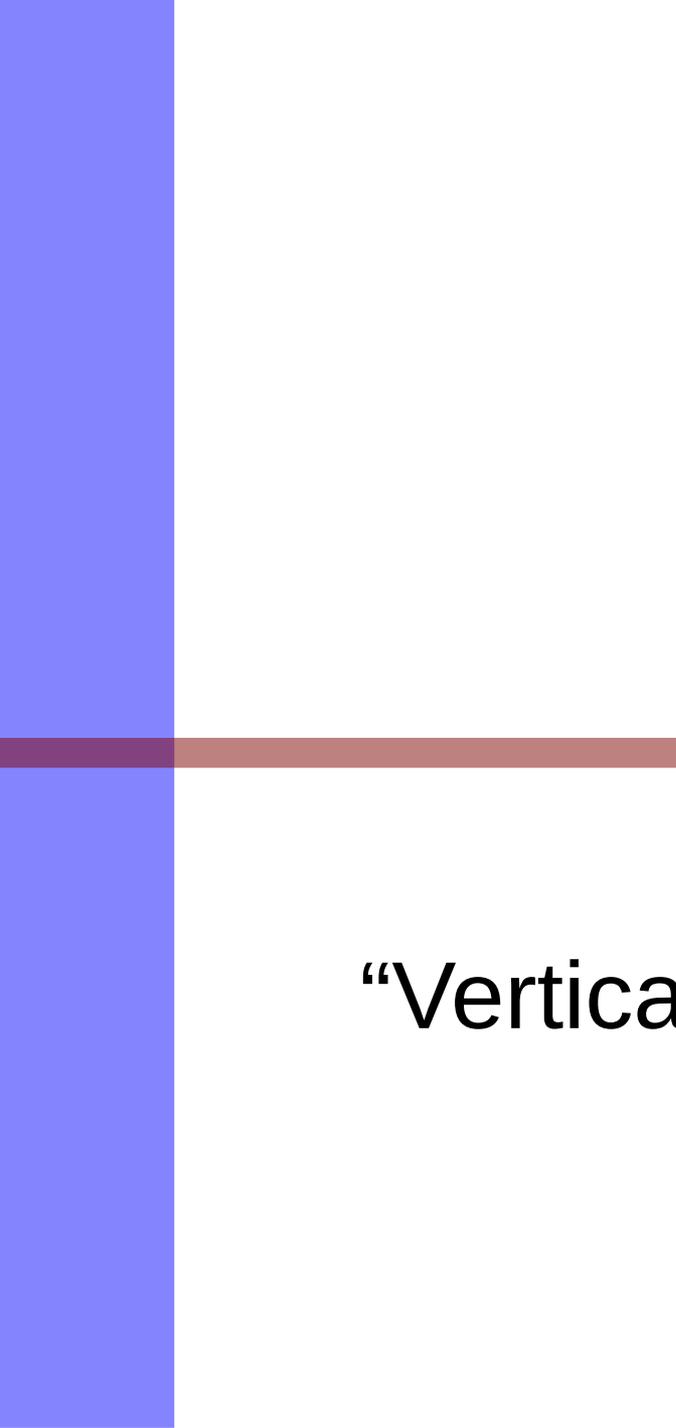
- Il risultato è una rotazione sull'asse di **rollio**
- Quando l'aeromobile è ruotato, il vettore della portanza (lift) è **inclinato** (rispetto alla verticale terrestre)
- Il vettore si **decompone** in due componenti
 - **Verticale**, continua a sostenere l'aeromobile in aria
 - **Orizzontale**, provoca un movimento laterale dell'aeromobile (virata)



Timone / Rudder

- Il **timone** provoca una rotazione sull'asse di **imbardata (Yaw)**
- Il risultato è una **rotazione** del “muso” dell'aeromobile e quindi un **cambio di rotta**
- Si usa nelle virate insieme agli alettoni
- Oppure per compensare il vento laterale (in decollo/atterraggio) che farebbe ruotare la coda





Velivoli VTOL

“Vertical Take-Off and Landing”

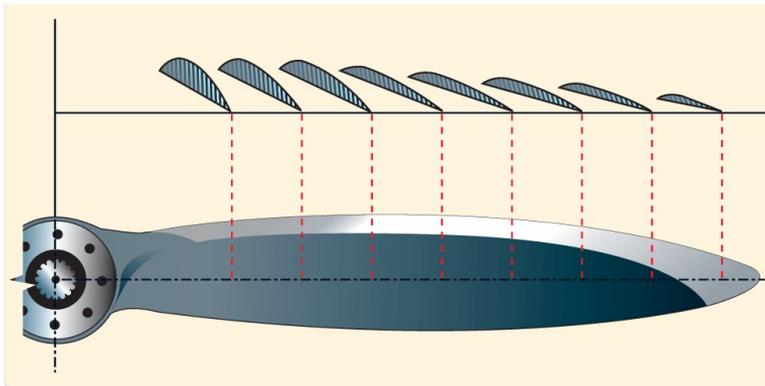
Velivoli VTOL

- I Vertical-Take-Off-and-Landing sono velivoli in grado di decollare (take-off) e atterrare (landing) **verticalmente**
- **Appartengono a questa categoria**
 - **Gli elicotteri**
 - **I multirotori**



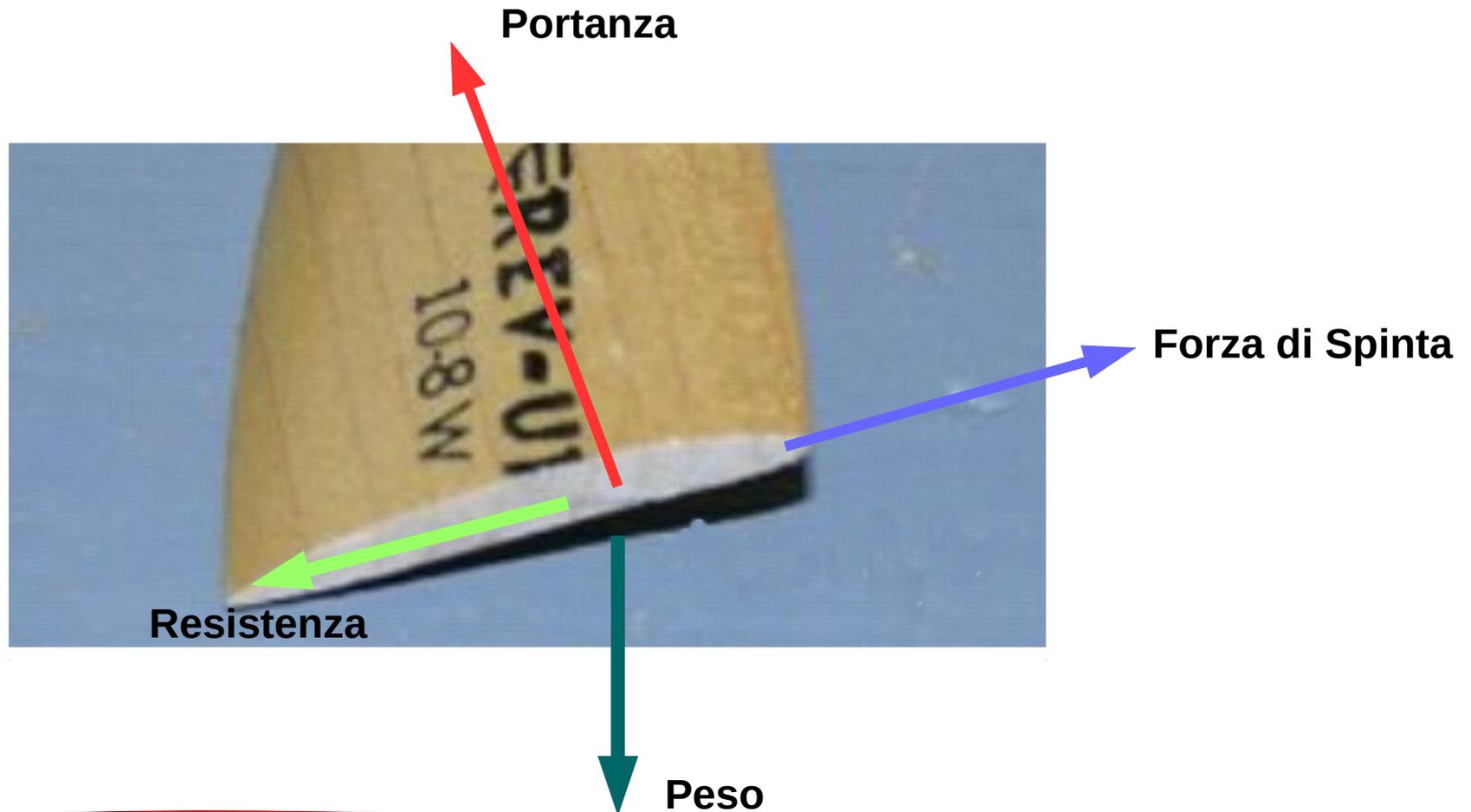
VTOL ed elementi portanti

- Nei VTOL l'elemento portante è il **rotore**
 - **Singolo: elicotteri**
 - **Multipli: multirotori**
- Il rotore è la degenerazione di un'ala
 - **Stretta e lunga**
 - **Con un determinato profilo**



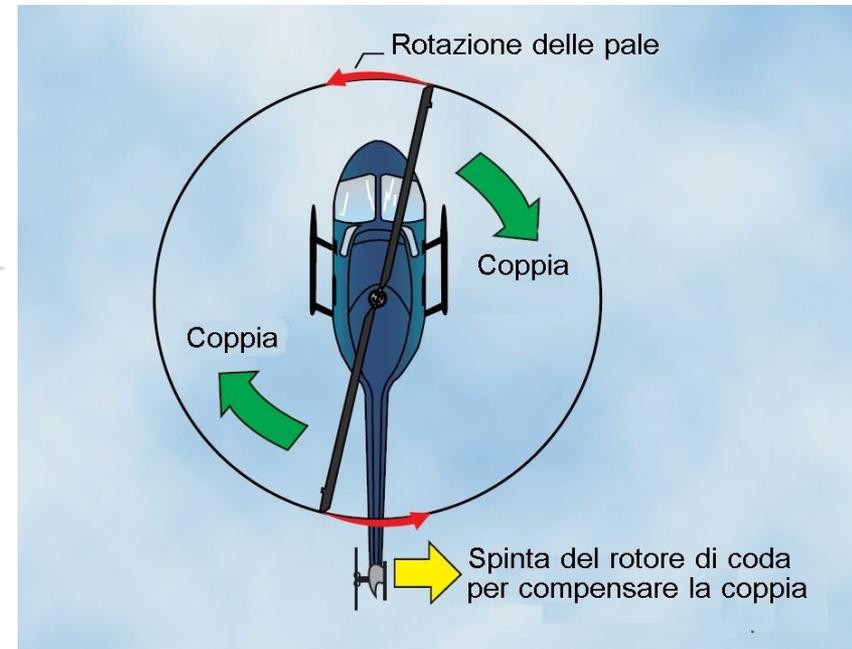
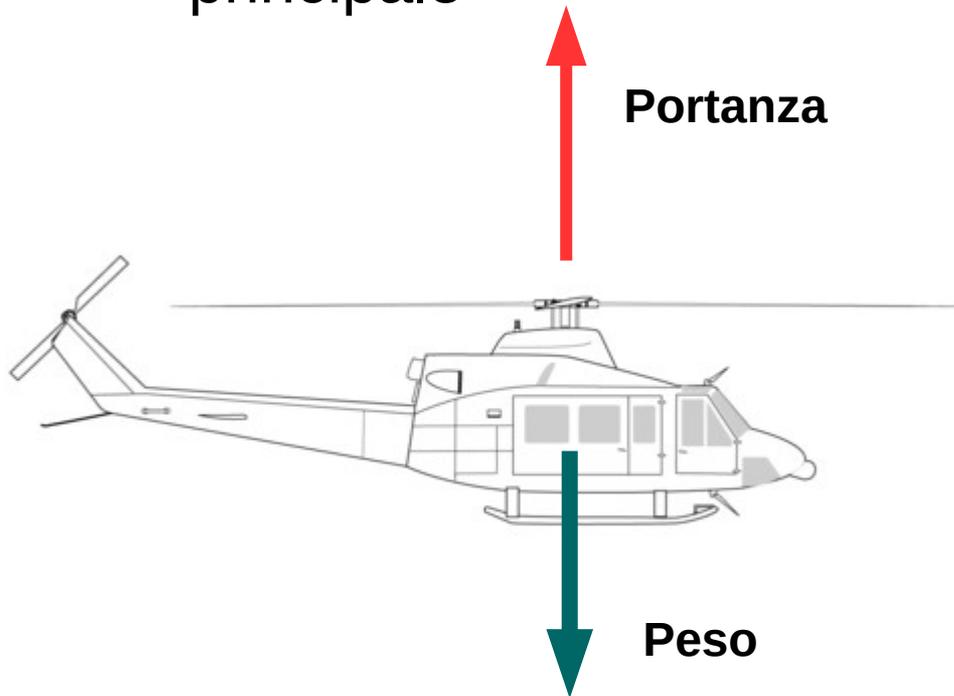
Rotore e Forze

- Le quattro forze che caratterizzano l'ala intervengono anche sulla dinamica del rotore



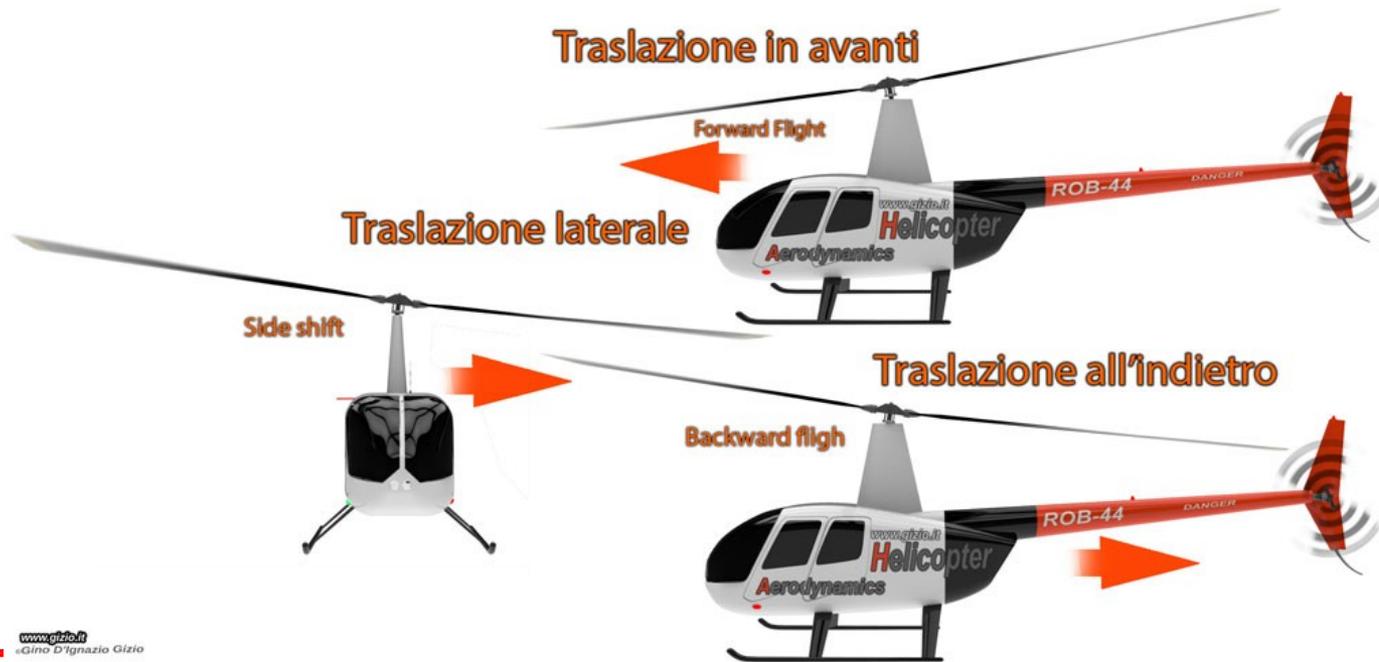
Elicotteri: Portanza e Bilanciamento

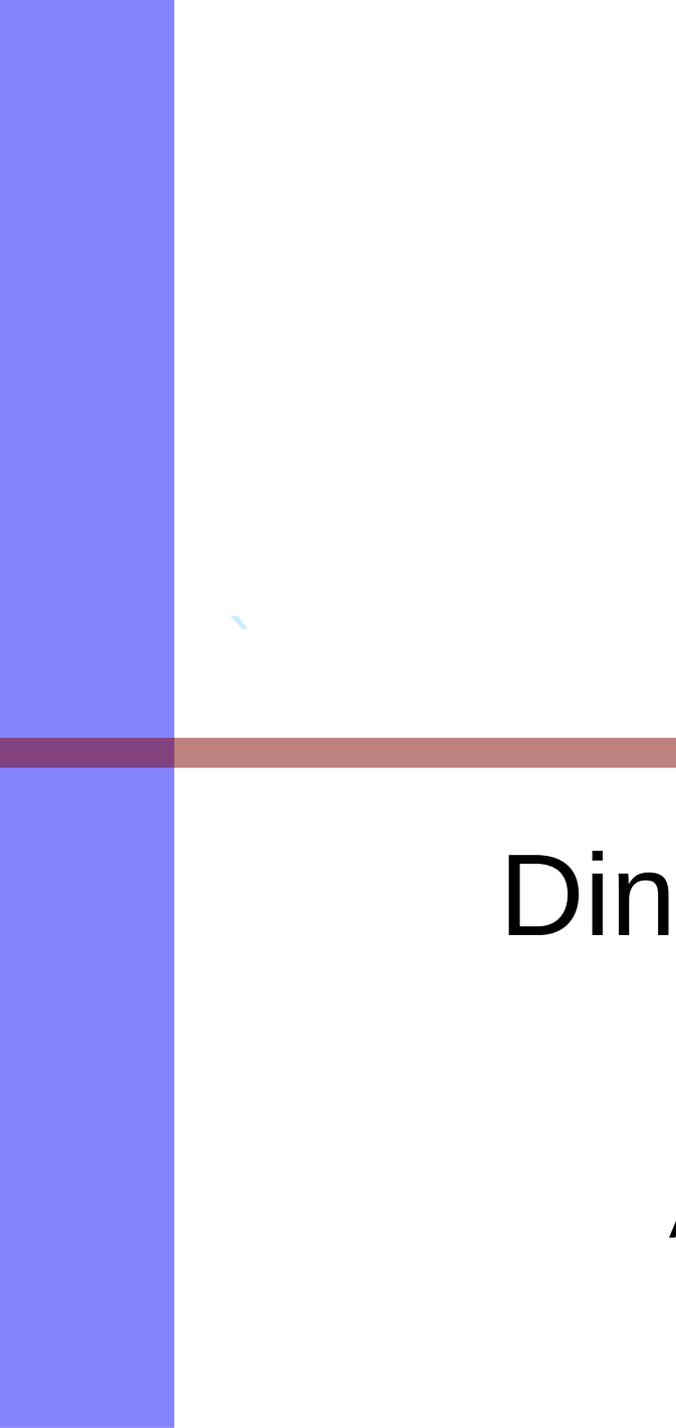
- La portanza è dunque generata dal rotore e consente all'elicottero il movimento **verticale**
- Il **rotore di coda** consente di bilanciare l'effetto **azione-reazione** creato dalla rotazione del rotore principale



Elicotteri: Volo Traslato

- Negli elicotteri, il piatto del rotore può muoversi provocando l'**inclinazione** del piano di rotazione delle pale
- La portanza generata non è più solamente **verticale** e compare una componente **orizzontale** che provoca il **volo traslato** nel verso dell'inclinazione





Dinamica del volo

Corrado Santoro
Aero Club di Catania

Corso Pilotaggio SAPR