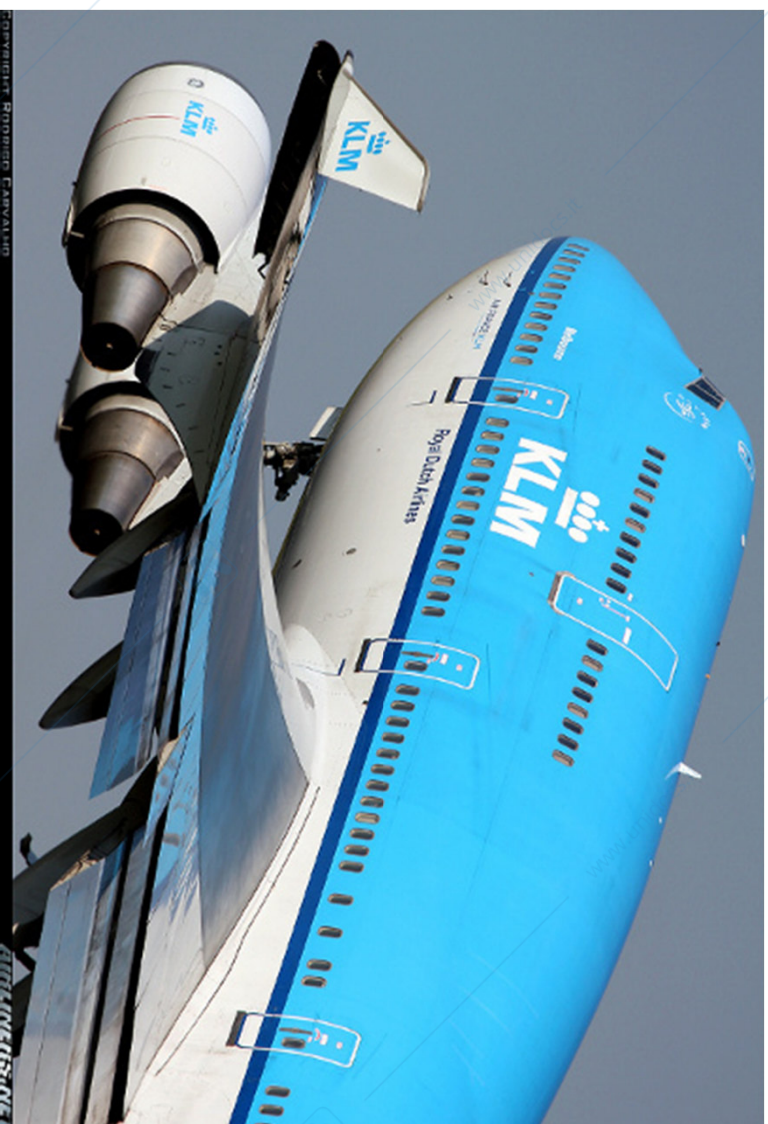


VOLO di un AEROPLANO principi e curiosità



Ing. Gabriele D'Ippolito – gabriele.dippolito@polimi.it volo aeroplano 26.11.2019

Di che parliamo?

- Qualche domanda interessante
- Perché stupirsi?
- Come tirarsi su...
- Il miracolo dell'Aeronautica
- Un problema di circolazione
- Seguire la scia
- Situazione di stallo
- Forse ho capito...
- Ma quale muri! ... (se rimane tempo)

Qualche domanda interessante

Perché le oche volano in formazione a Δ ?

Cos'è il Cx delle automobili ?

...e il vuoto d'aria ?...

Dove sta il carburante ?

volò aeroplano 26.11.2019

Perché stupirsi?



Airbus A380

- Lunghezza : 72,7 m
- Apertura Alare : 79,8 m
- Peso massimo al decollo : 560 000 kg
- Peso massimo all'atterraggio : 386 000 kg
- Capacità carburante : 320 000 l - 0,810 kg/l (259 000 kg)
- Spinta : 4 x 320 kN - 4 x 32 600 kg
- Velocità crociera : M = 0.89
- Quota di crociera : H = 10 700 m

volo aeroplano 26.11.2019

Come tirarsi su

L'aria è un gas e quindi si adatta alla presenza di ostacoli.

E' incolore per cui non riusciamo ad apprezzare come si muova

...MA...

le goccioline di nebbia sono un buon tracciante e aiutano a capire

come l'aria si adatta al movimento di un oggetto

La forma degli oggetti è determinante per la loro capacità di muoversi all'interno dell'aria con poca resistenza. Le forme che oppongono

«meno resistenza» vengono dette «più aerodinamiche»

Come tirarsi su

I PROFILI AERODINAMICI

devono avere delle forme che si muovano in una

direzione preferenziale

opponendo la

minore resistenza possibile

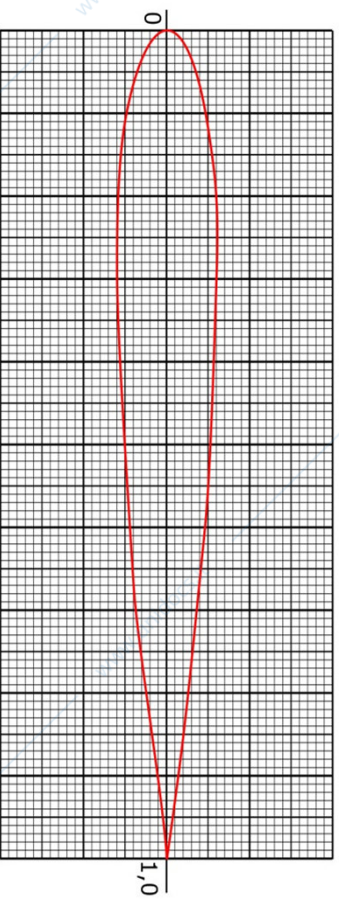
nel caso delle **ALL**, i profili devono generare una

**forza perpendicolare alla direzione di avanzamento
(per contrastare la *forza peso*)**

Come tirarsi su

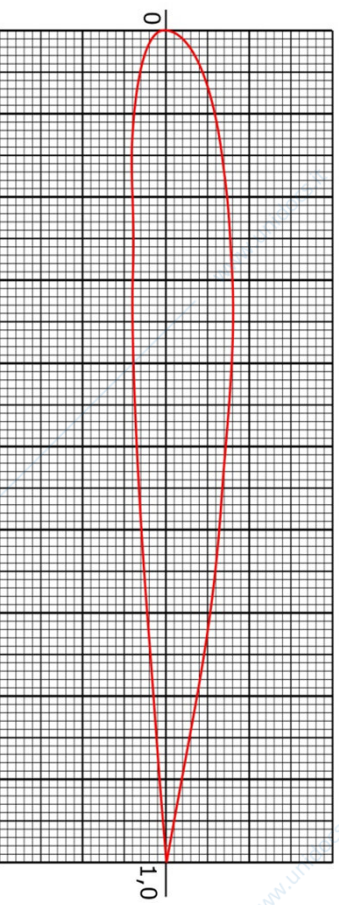
I PROFILI ALARI

 **simmetrici**



derive
piani di coda (talvolta)
carenature di antenne o ostacoli

non simmetrici

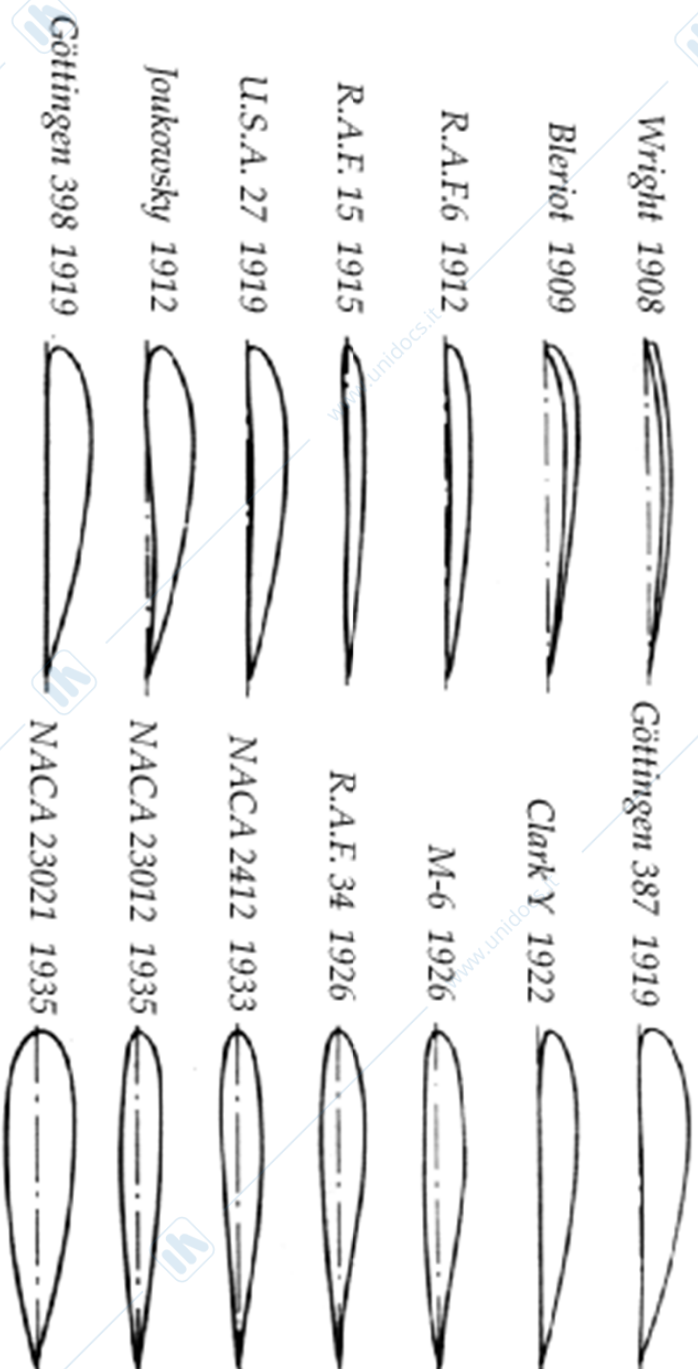


ali
piani di coda (spesso)
alettoni automobilisti da gara

I **profili aerodinamici** sono caratterizzati da resistenze **10 - 20 volte inferiori** a quelle delle **sezioni cilindriche**

Come tirarsi su

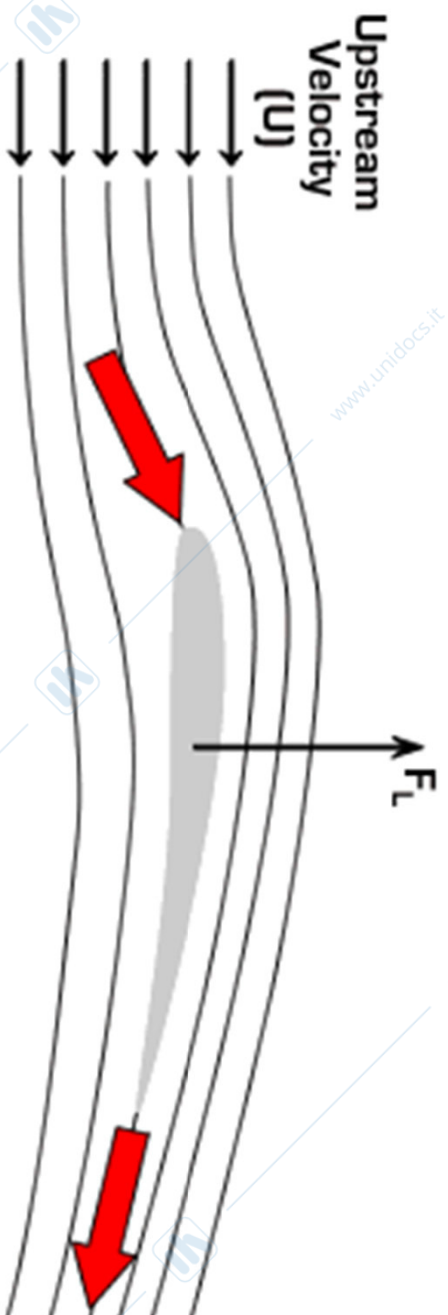
I PROFILI ALARI



Come tirarsi su

I PROFILI ALARI

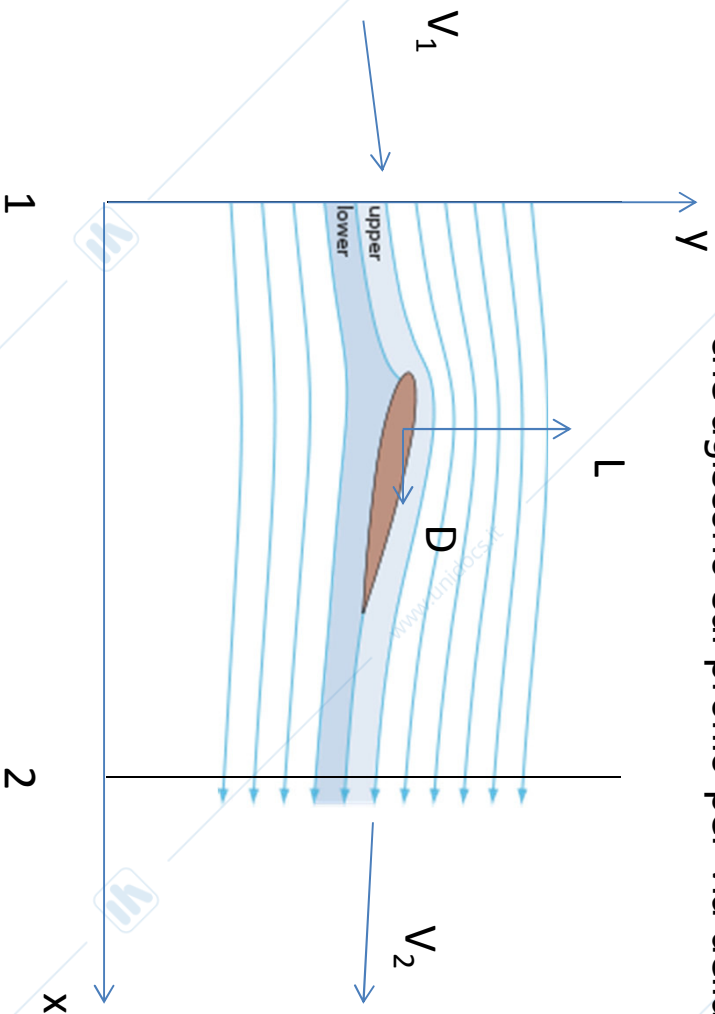
come si deformano le traiettorie delle particelle di gas attorno al profilo



Come tirarsi su

I PROFILI ALARI

Calcoliamo le forze che agiscono sul fluido per la presenza del profilo alare e quindi quelle che agiscono sul profilo per via della deformazione del flusso



Si intuisce che le forze saranno legate all'angolo del profilo rispetto alla direzione del flusso a monte: *angolo di incidenza*

Forza sul Fluido

Seconda Legge Newton:

Forza = variazione q.tà moto

$$F_x = m V_{2x} - m V_{1x}$$

$$F_y = m V_{2y} - m V_{1y}$$

Forza sul Profilo

Terza Legge Newton:

Principio Azione-Reazione

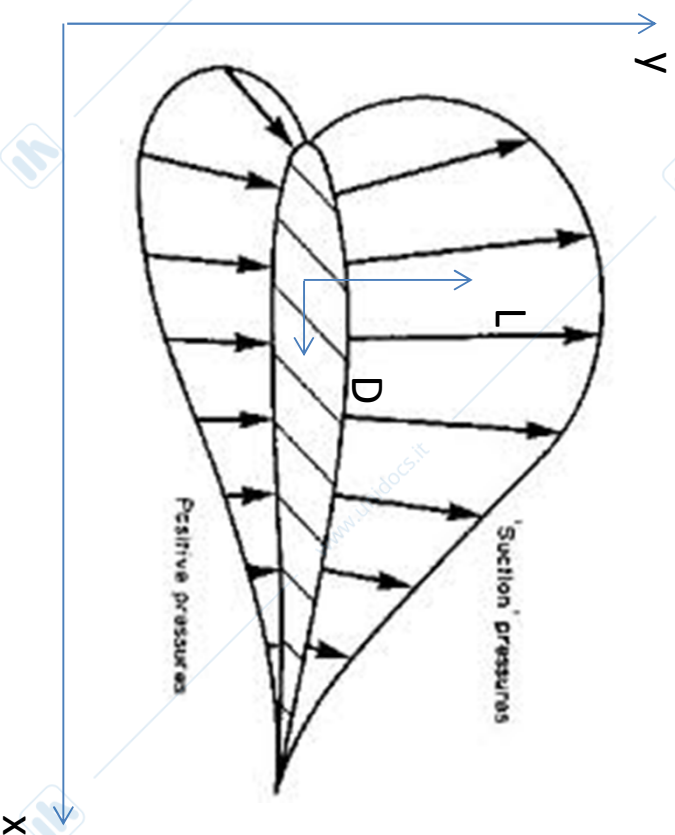
$$D = -F_x = -(m V_{2x} - m V_{1x})$$

$$L = -F_y = -(m V_{2y} - m V_{1y})$$

Come tirarsi su

I PROFILI ALARI

Calcoliamo l'integrale delle pressioni sul profilo per calcolare la forza che agisce



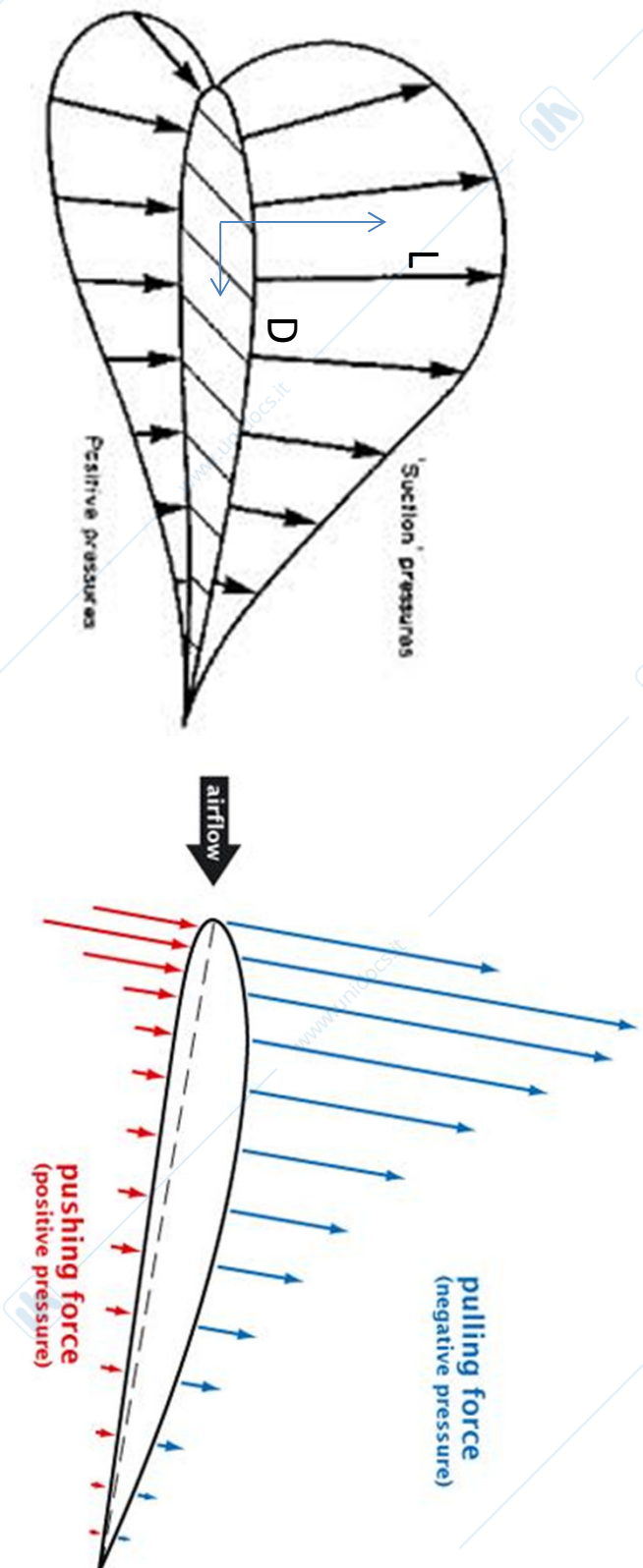
$$D = -F_x = \oint_{\Omega} p \vec{n} \cdot d\vec{x} + \oint_{\Omega} \vec{\tau}_0 \cdot d\vec{x}$$

$$L = -F_y = \oint_{\Omega} p \vec{n} \cdot d\vec{y} + \oint_{\Omega} \vec{\tau}_0 \cdot d\vec{y}$$

Le forze calcolate come integrale delle pressioni sono le medesime calcolate con il bilancio della quantità di moto.

Come tirarsi su

I PROFILI ALARI

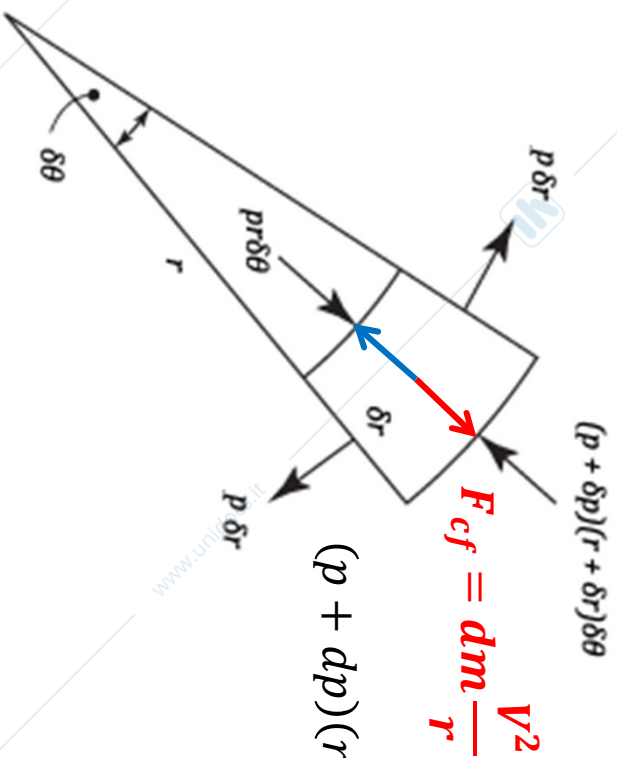


IL CONTRIBUTO ALLE FORZE DATO DAL DORSO E' BEN MAGGIORE DI QUELLO

DATO DAL VENTRE

IL PROFILO E' RISUCCHIATO VERSO L'ALTO !!!

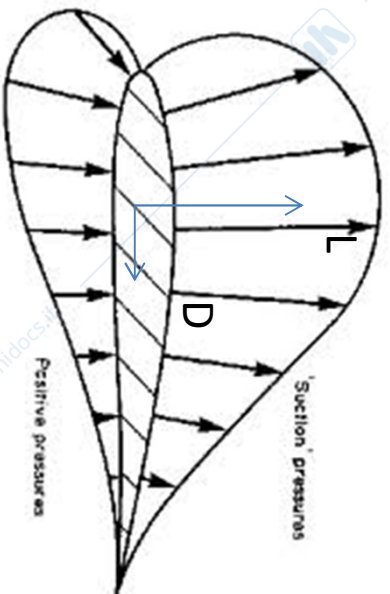
Come tirarsi su



$$(p + dp)(r + dr)d\theta - prd\theta - \left(p + \frac{1}{2} dp\right) drd\theta = dm \frac{V^2}{r}$$

- ✓ La curvatura delle linee di flusso è proporzionale alla variazione di pressione
- ✓ Verso il centro dei vortici la pressione diminuisce

IL PROFILO E' RISUCCHIATO VERSO L'ALTO !!!

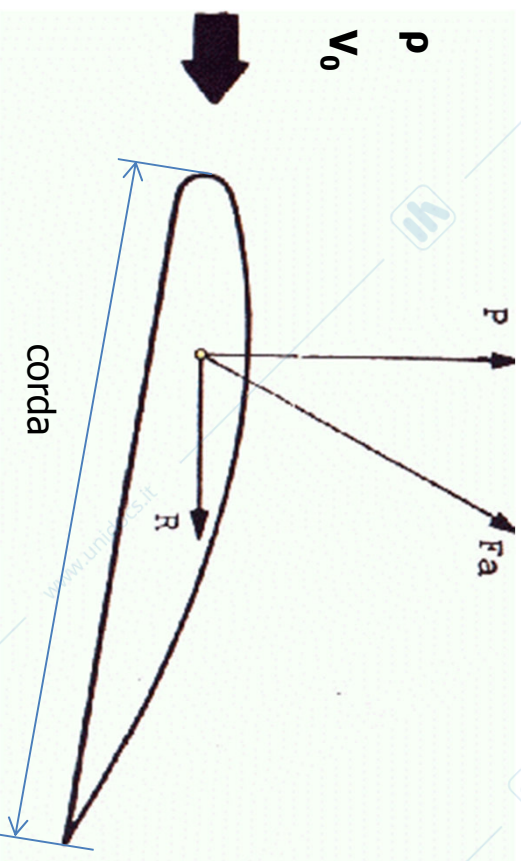


Miracolo dell'Aeronautica

Ma come si possono confrontare le prestazioni aerodinamiche dei diversi profili e avere un'idea immediata della loro efficienza?

ADIMENSIONALIZZAZIONE

Portanza **L** e Resistenza **D** hanno le dimensioni di una forza (N)



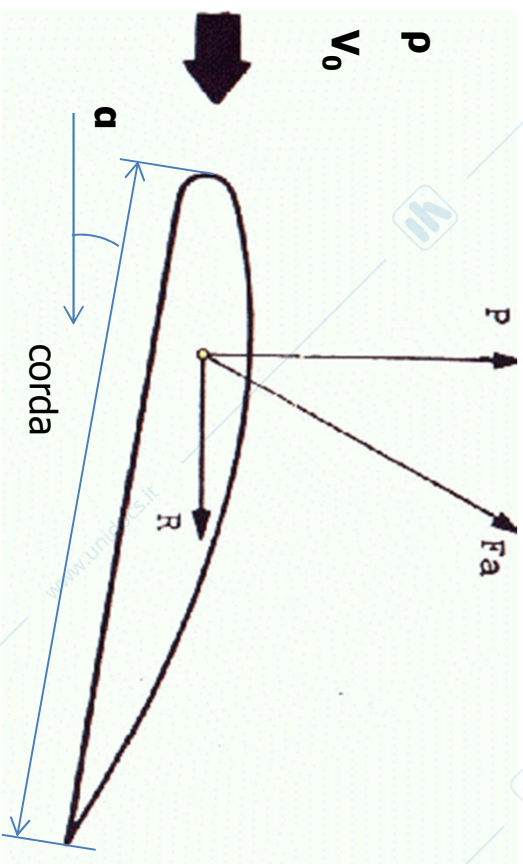
Gli unici parametri di riferimento che possono essere controllati per tutti i diversi profili e le differenti forme di ala sono:

La velocità del flusso a monte **V₀**, la superficie dell'ala **S** = (corda profilo) * (apertura ala) e la densità del fluido **ρ**

COEFFICIENTE AERODINAMICO:

$$C_a = \frac{F_a}{\frac{1}{2} \rho V_0^2 S}$$

Miracolo dell'Aeronautica



COEFFICIENTE PORTANZA:

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho V_0^2 S}$$

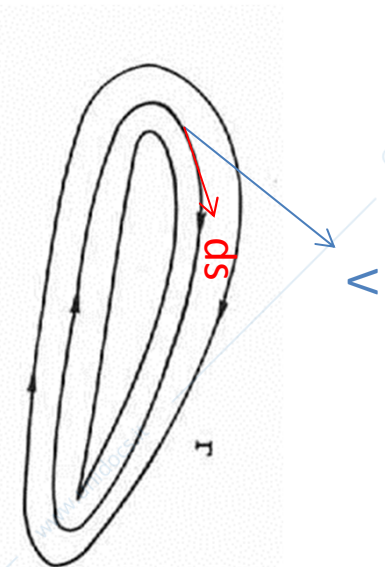
COEFFICIENTE RESISTENZA:

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho V_0^2 S}$$

Le forze aerodinamiche e i rispettivi coefficienti sono funzione dell'angolo di incidenza α e questa dipendenza è pressochè lineare fino al sopraggiungere di fenomeni di distacco della corrente fluida dal profilo alare

Un problema di circolazione

In corrispondenza dei punti di un contorno chiuso è possibile trovare i valori della velocità \mathbf{V}



Si definisce *circolazione* Γ della velocità \mathbf{V} lungo un contorno \mathbf{s} : $\Gamma = \oint \vec{V} \cdot d\vec{s}$

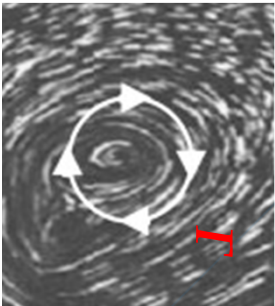
Teorema di Kelvin:

in presenza di forze di massa conservative (gravità) e per un fluido incomprimibile non viscoso, **la circolazione della velocità rimane costante, quando la si calcoli lungo un cammino chiuso** che si muove con la velocità del fluido.

In molti casi le condizioni dei flussi d'aria approssimano quelle del Teorema di Kelvin con ragionevole accordo

Un problema di circolazione

La circolazione può essere usata come parametro per identificare l'intensità di flussi come per esempio i vortici



$$\Gamma = \oint \vec{V} \cdot d\vec{s}$$

la circolazione della velocità rimane costante, quando la si calcoli lungo un cammino chiuso

Che cosa significa in pratica??



volo aeroplano 26.11.2019

Un problema di circolazione

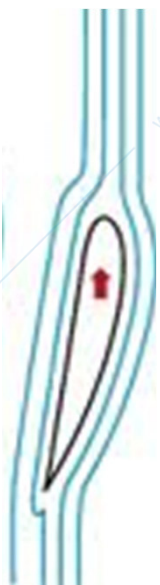
...ma nel campo dei profili alari, che cosa vuol dire?...

Prandtl (1875 – 1953) pensa a un esperimento... la partenza impulsiva di un profilo



I

o è immerso nel fluido in quiete: $\Gamma = \oint \vec{V} \cdot d\vec{s} = 0$



$t_3 > t_2$

$$\Gamma = \oint \vec{V} \cdot d\vec{s} \neq 0$$

ma per il Th. di Kelvin non è possibile!

Un problema di circolazione

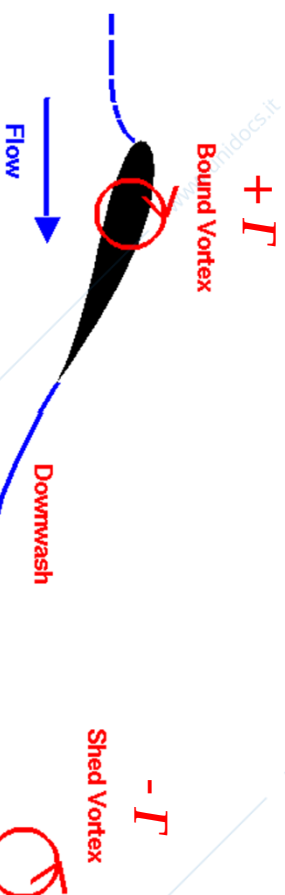
...ma se T deve rimanere nulla, dove sarebbe la $-T$ a compensare $+T$??....

...è spalmata sul profilo!!!



Shed Vortex

Glenn
Research
Center



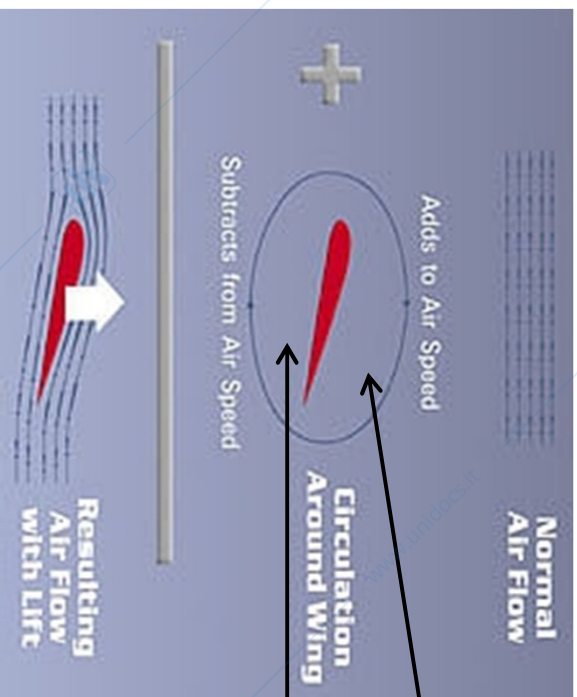
$$\Gamma = \oint \vec{V} \cdot d\vec{s} = 0$$

Il vortice iniziale $-T$ PERMANE e solo la viscosità ne dissiperà l'energia!

Un problema di circolazione

...RIEPILOGANDO...

Ogni corpo che presenti una distribuzione di velocità circolatoria sul suo contorno se viene investito da una corrente fluida genera una forza



Maggiore velocità sul dorso – minore pressione:
velocità circolatoria si somma alla velocità della corrente
Minore velocità sul ventre – maggiore pressione:
velocità circolatoria si sottrae alla velocità della corrente

La distribuzione di velocità circolatoria sul contorno dell'oggetto può essere generata dalla forma dell'oggetto stesso o dalla sua rotazione attorno a un proprio asse (trasversale rispetto alla corrente fluida)

Un problema di circolazione

APPLICAZIONE PRATICA

Considerando un corpo cilindrico immerso in una corrente trasversale



La distribuzione di velocità circolatoria sul contorno dell'oggetto può essere generata dalla forma dell'oggetto stesso o dalla sua rotazione attorno a un proprio asse (trasversale rispetto alla corrente fluida)

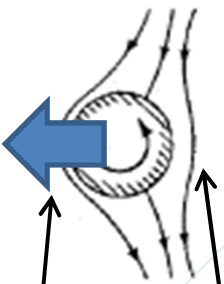


Minore velocità sul ventre – maggiore pressione:

velocità circolatoria si sottrae alla velocità della corrente

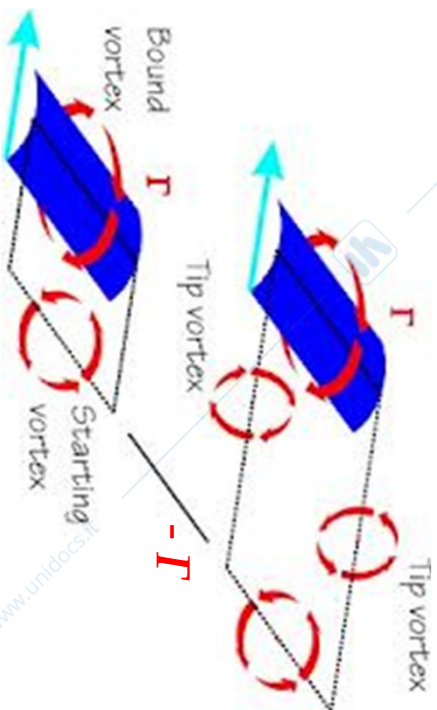
Maggiore velocità sul dorso – minore pressione:

velocità circolatoria si somma alla velocità della corrente

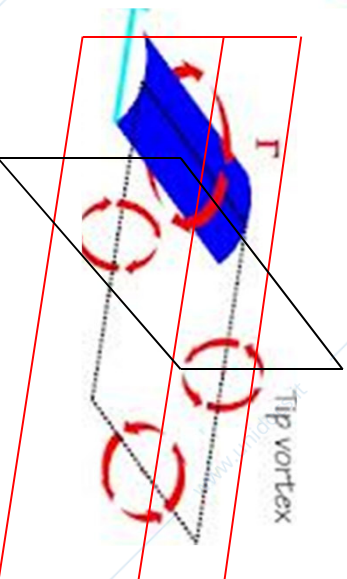


Un problema di circolazione

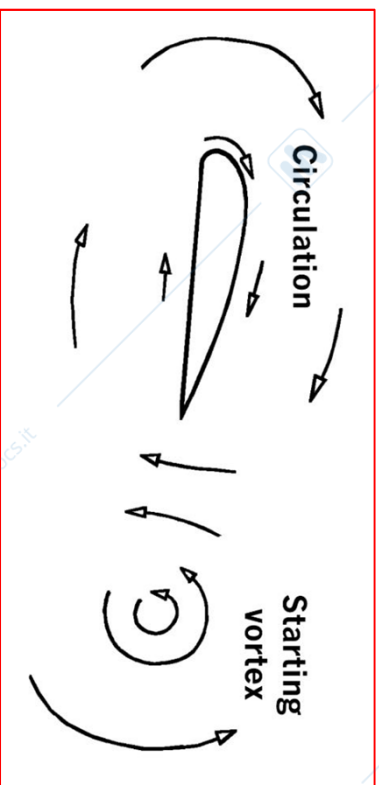
...va bene per i profili, ma per un'ala? ... **pensate all'anello di fumo**



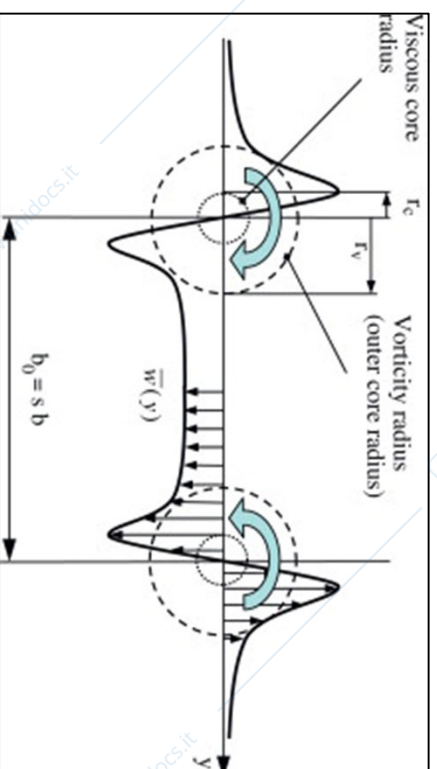
Se la circolazione non può crearsi o distruggersi, bisogna pensare a una maglia chiusa.



Sezione meridiana:

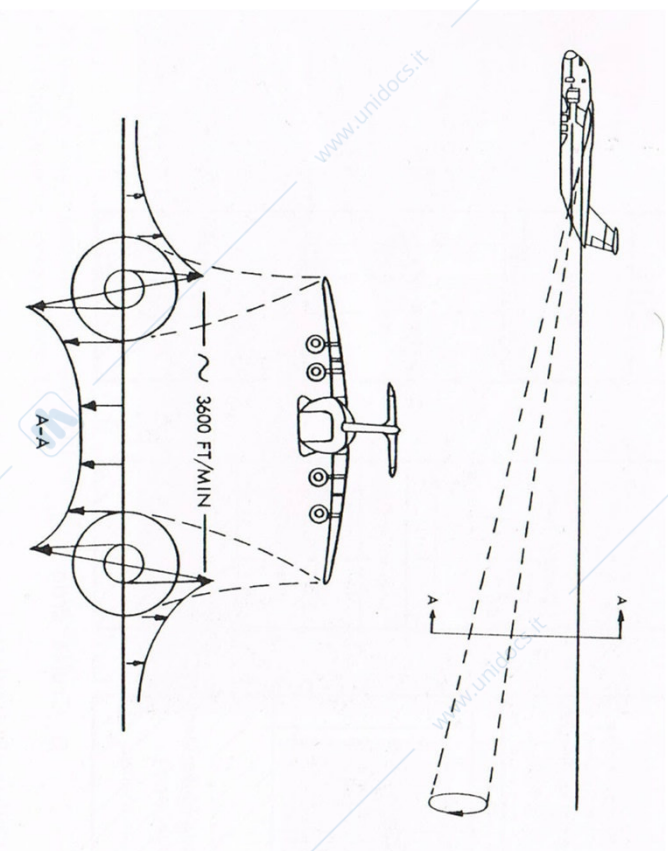


Sezione trasversale:



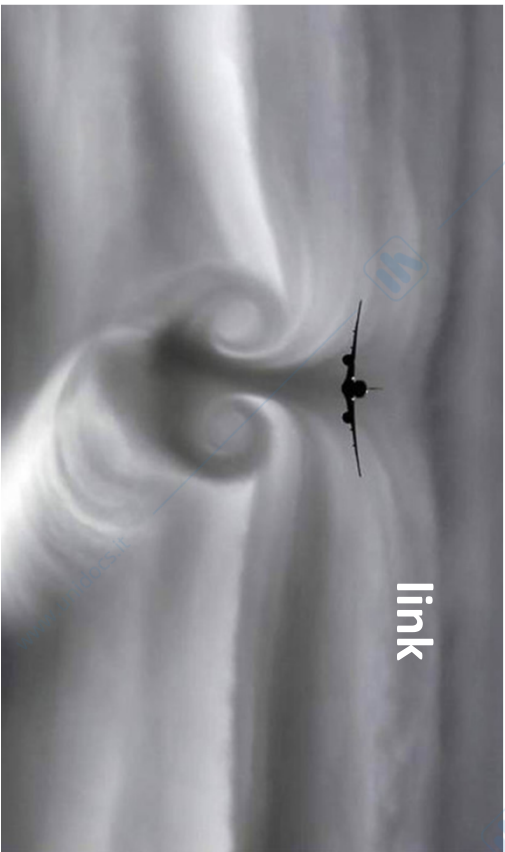
Seguire la scia

Nel caso di un aeroplano in volo otteniamo

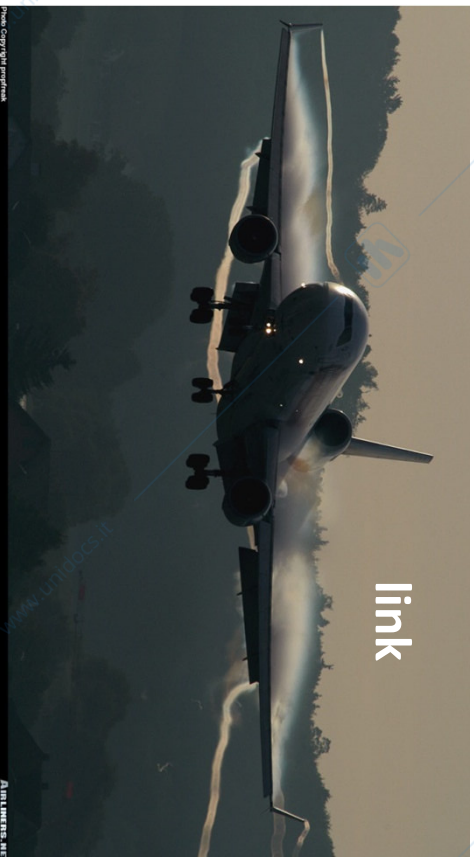


Ma la scia ha veramente questa forma??

Seguire la scia



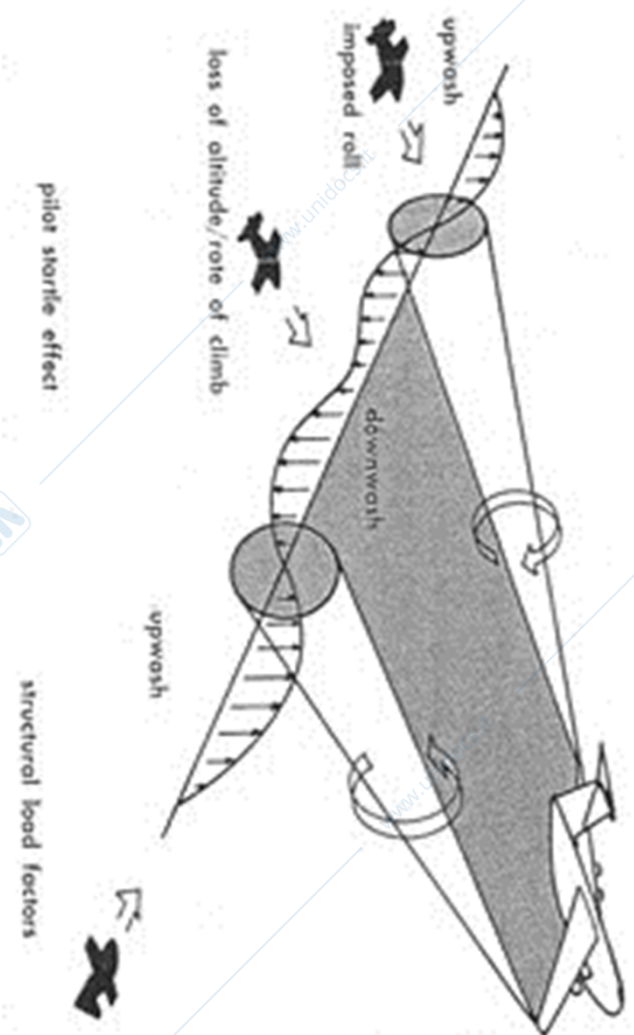
- ✓ curvatura delle linee di flusso proporzionale alla variazione di pressione: **condensa sul dorso**
- ✓ verso il centro dei vortici la pressione diminuisce: **condensa nel cuore dei vortici di scia**



volo aeroplano 26.11.2019

Seguire la scia

quindi stare in scia di un aeroplano è conveniente?



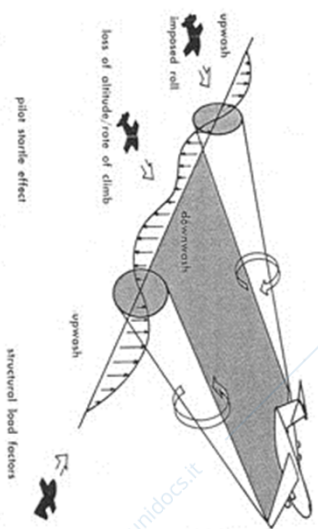
Per rispondere meglio dobbiamo ricordare i coefficienti aerodinamici, in particolare quello di portanza:

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho V_0^2 S}$$

volo aeroplano 26.11.2019

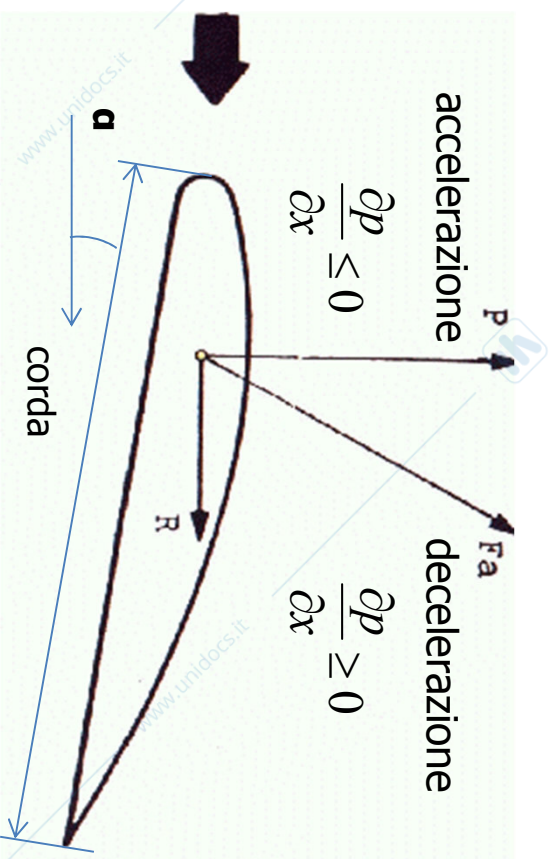
Segui la scia

Il segreto delle oche è svelato



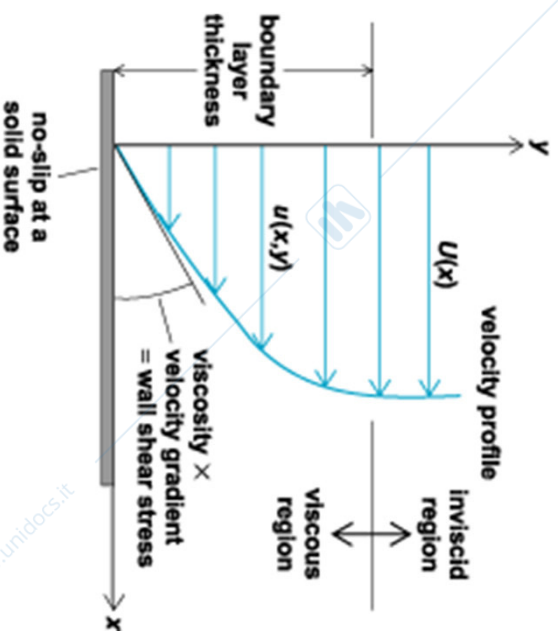
volò aeroplano 26.11.2019

Situazione di stallo

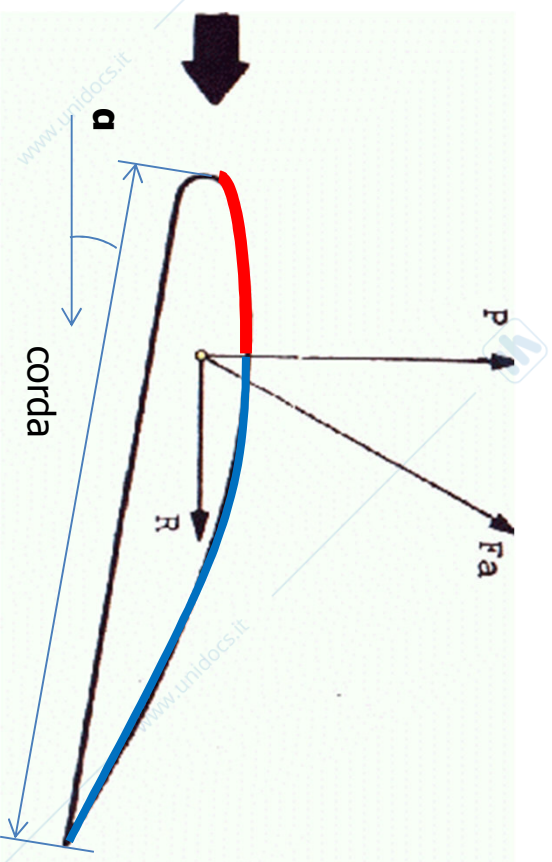


La capacità di un flusso di fluido di restare aderente alla parete dipende dallo sforzo viscoso e perciò dalla derivata della velocità in direzione normale alla parete:

$$\tau_w = \mu \left. \frac{\partial U(x, y, t)}{\partial y} \right|_{y=0}$$

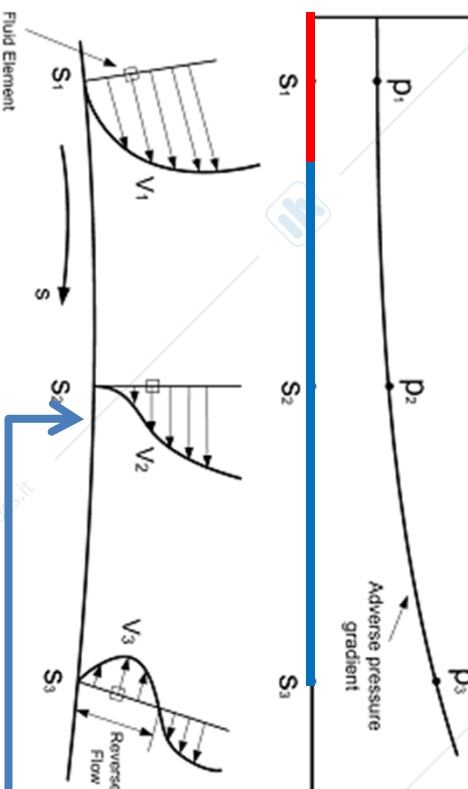


Situazione di stallo



$$p \frac{\partial p}{\partial x} \leq 0$$

$$\frac{\partial p}{\partial x} \geq 0$$

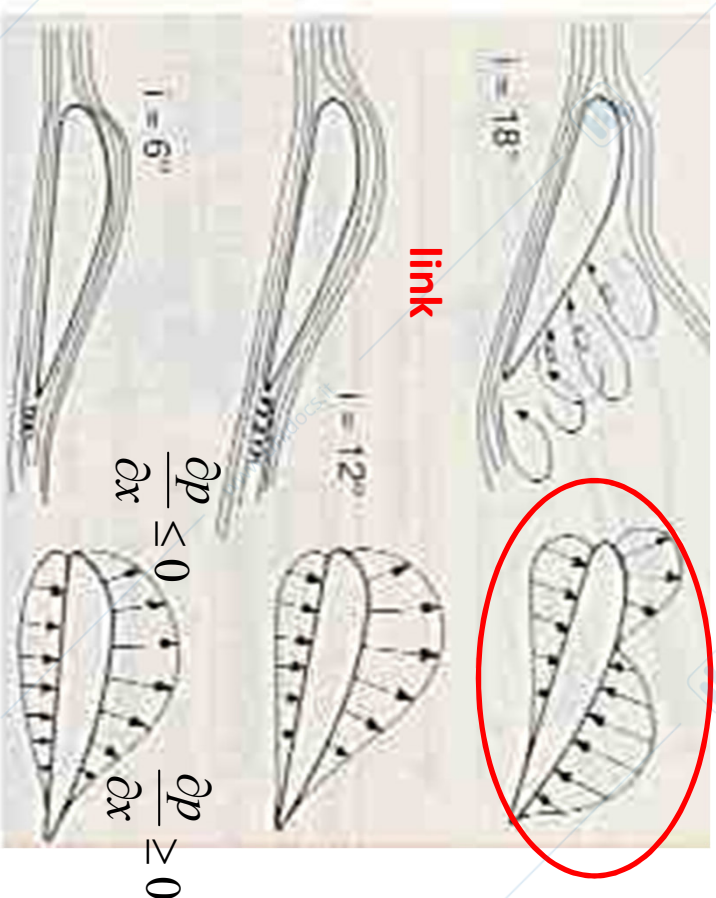


Flusso **accelera** → **sfuerzo** a parete **aumenta**
 Flusso **decelera** → **sfuerzo** a parete **diminuisce**

Condizione di separazione:

$$\tau_w = \mu \left. \frac{\partial U(x, y, t)}{\partial y} \right|_{y=0} = 0$$

Situazione di stallo



Incidenza eccessiva: portanza ridotta

Incidenza elevata: portanza elevata

Incidenza media: portanza media

Profilo stallato:

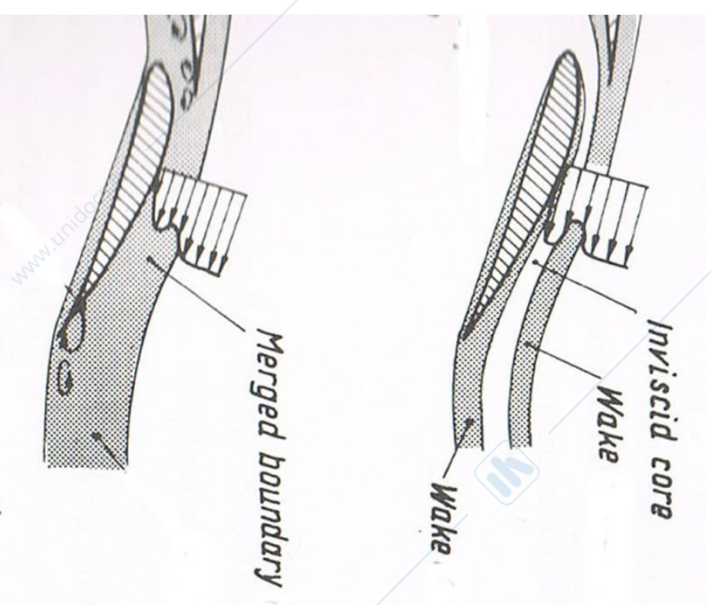
minore superficie dorso soggetta a bassa pressione

La forza risultante verso l'alto ottenuta dall'integrale delle pressioni si è ridotta

Forse ho capito...

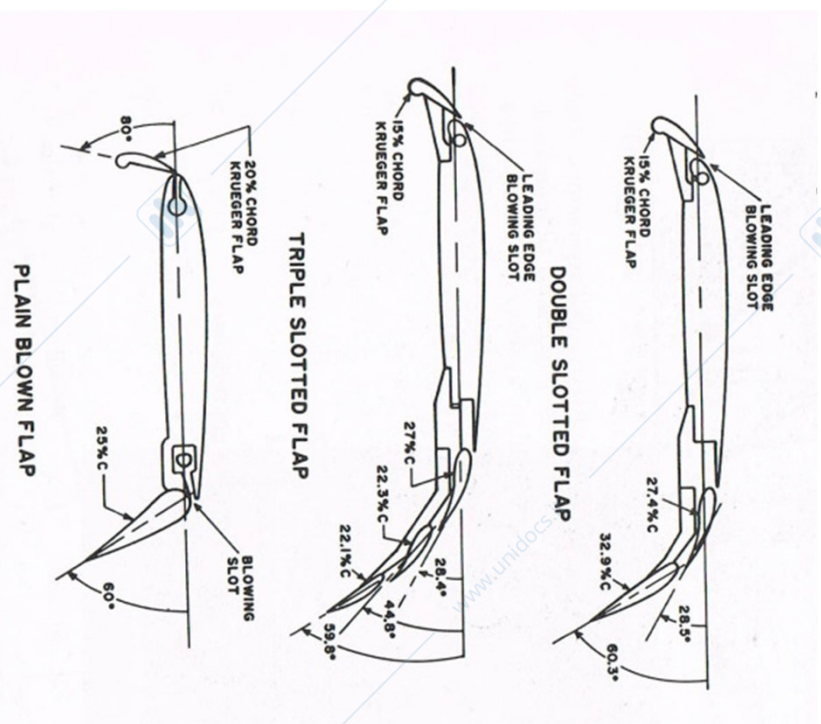
- Per incrementare la portanza bisogna deflettere verso il basso più fluido (variazione q.tà di moto)
- Maggiore q.tà di moto diretta verso il basso, maggiore gradiente avverso di pressione nella direzione di avanzamento che tende a rallentare la corrente sul profilo

INIETTO DEL FLUIDO A PARETE CON
VELOCITA' ELEVATA PER RIPRISTINARE IL
GRADIENTE DI VELOCITA'



Forse ho capito...

IPERSOSTENTATORI



Riducono la componente assiale di quantità di moto: alta resistenza

Aumentano la componente verticale di quantità di moto: alta portanza

L'efficienza aerodinamica E come rapporto tra portanza e resistenza decresce molto

DECOLLO : poco estesi – elevata portanza e media resistenza

ATTERRAGGIO : molto estesi – elevatissima portanza ed elevatissima resistenza

Forse ho capito...

DECOLLO O ATTERRAGGIO?



volò aeroplano 26.11.2019

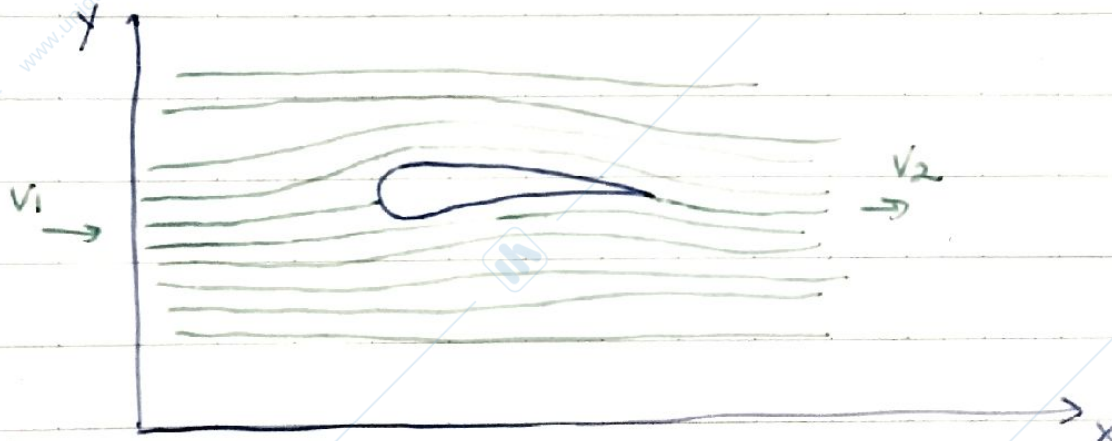
SEMINARIO SUL VOLO DELL'AEROPILANO

Perché le oche volano in formazioni a Δ ?



In Saia alla prima
ora ci sono delle perturbazioni
e quelle dopo per
evitarle si mettono dietro

Profili alari



Drag

$$D = -F_x = (mV_{2x} - mV_{1x})$$

Azione-
reazione

$$L = -F_y = (mV_{2y} - mV_{1y})$$

Lift

Il legge di Newton

Forza = var. quantità di
moto



2

Mo	X	We	Th	Fr	Sa	Su
----	---	----	----	----	----	----

No. FIS LA TECNICA

Date 26.11.19

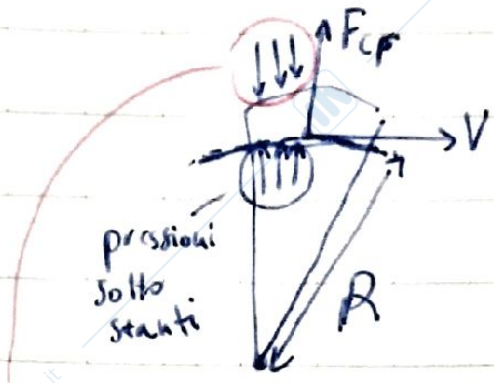
Importante l'angolo di incidenza per determinare
più o meno LIFT

Anche se c'è un
angolo di stall
oltre il quale
non si ottiene
più nulla

Si possono calcolare D e C_L anche
come l'integrale delle pressioni sul profilo
alare.

ci si accorge confrontando
la forza dovuta alle pressioni
negative sopra al profilo
e la forza dovuta alle
pressioni sotto il profilo
che l'ala non viene spinta
verso l'alto, ma RISPUNTA verso
l'alto

Se presentiamo una porzione del profilo



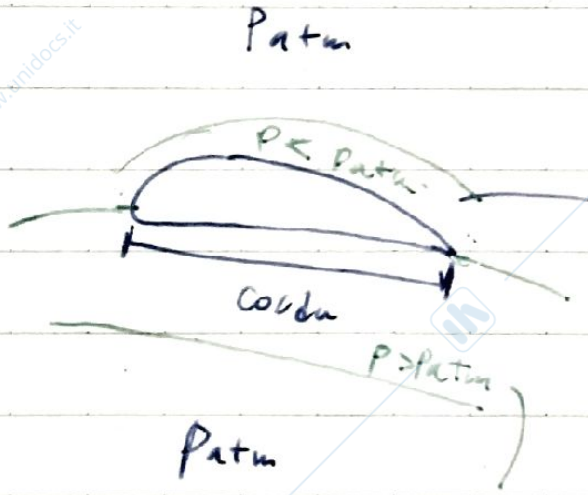
$$F_{cp} = \rho \frac{V^2}{R}$$

forza centrifuga

forza centripeta dovuta alle pressioni che si oppone a F_{cp}

Verso il centro dei vortici la pressione diminuisce

↓
profilo risucchiato verso l'alto



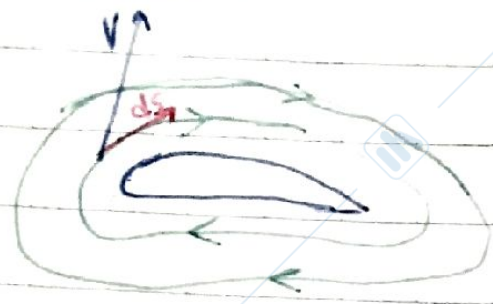
questa parte ha curvatura maggiore

↓
linee di flusso più circolari

⇒ p legato al raggio di curv. $P < P_{atm}$

si allontanano dal centro di curv. ⇒ $P > P_{atm}$

Circolazione



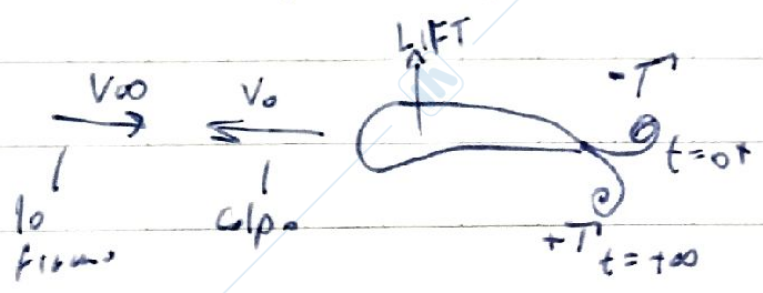
Circolazione Γ della
 Velocità V lungo il
 contorno S

$\Gamma = \oint V \cdot ds$
 Teorema di Kelvin — Γ rimane costante in condizioni stazionarie
 Esperimento di Prandtl

In aria in quiete



colpo impulsivo al profilo



Vede in momenti diversi Γ diverso da 0 ma i vortici sono spalmati sul profilo $\rightarrow -T$ e $+T$ si compensano $\Rightarrow \Gamma=0$