

# DA DOVE VIENE LA PORTANZA ?

## SPIEGAZIONI “INCORRETTE”:

### 1. Bernoulli + Equal time transit principle (plus longer path)

Principio di uguale tempo di transito: l'aria che passa sopra la parte superiore dell'ala si ricongiunge con quella proveniente dalla parte inferiore dell'ala nello stesso tempo (le particelle di fluido si ritrovano nel bordo di uscita dell'ala). Tenendo conto che l'aria che passa di sopra percorre una lunghezza maggiore (erroneamente si assume che per volare l'ala deve avere un profilo curvo nella parte di sopra), per B. l'aria di sopra va più veloce, di conseguenza la pressione diminuisce, mentre sotto l'ala la velocità è minore e la pressione maggiore. La differenza di pressione tra sotto e sopra crea la portanza sull'ala.

Errori:

- a) Il principio di uguale tempo di transito è falso: difatti, il flusso d'aria che passa di sopra arriva prima al bordo di uscita.
- b) non è vero che il profilo dell'ala deve essere curvo (altrimenti come si spiega che gli aerei possano volare capovolti? Gli aerei di carta sono piatti, eppure volano.
- c) Bernoulli si può applicare solo in assenza di viscosità e dunque di perdita di energia meccanica (situazione ben lontana dalla realtà). Mentre si può applicare lontani dalla superficie alare, dove l'aria si può considerare un fluido ideale (incompressibile e non viscoso, e quindi valgono l'equazioni di Eulero), non è ugualmente valido applicarlo sulla superficie, dove valgono invece l'equazioni di Navier-Stokes, e dove è proprio la viscosità a giocare un ruolo fondamentale (come vedremo) nella spiegazione della portanza di un ala.

### 2. Tubo di Venturi

Questa teoria fa un paragone tra un profilo alare e il cosiddetto tubo Venturi, che è un restringimento a collo di un tubo di flusso. Per la conservazione del flusso, la quantità di fluido che passa dalla parte larga a quella stretta del tubo deve essere uguale; dunque il fluido è costretto a scorrere più velocemente nella parte stretta del tubo, e di conseguenza, usando B., la pressione in quella zona è minore.

Errore: Il profilo alare non è un tubo Venturi: in questa teoria si tiene conto soltanto del flusso di fluido sopra l'ala, ma allora, dov'è la parte superiore del restringimento? Inoltre, quale pressione è minore nel restringimento?

### 3. Teoria della pietra salterina

Questa teoria sostiene che l'ala ha portanza per un semplice scambio di quantità di moto tra l'ala, e l'aria che incide sotto di essa. Per la conservazione del momento ci dovrebbe essere una forza in su: la portanza, allo stesso modo che una pietra piatta, lanciata con un certo effetto su una superficie d'acqua, “rimbalza” e non affonda subito.

Errore: questa teoria tiene conto esclusivamente dell'aria che passa sotto l'ala, ma quella che passa sopra, non ha ugualmente degli effetti meccanici sull'ala?

## “SPIEGAZIONI CORRETTE”

Per spiegare la portanza di un'ala e il come ed il perché vola un aereo, bisogna farne uso di diversi principi: l'importante è capire in quale momento usarli, in quali condizioni, e soprattutto in quale ordine, per trovare una spiegazione soddisfacente. Questi principi sono:

1. Il principio di Bernoulli
2. Le leggi della dinamica
3. Dinamica dei fluidi (in viscosi e viscosi)
4. Il concetto di circolazione del flusso
5. Il ruolo dei vortici
6. La viscosità

I **concetti necessari fondamentali** sono quelli di **Pressione, Forza, Velocità e Superficie**. La pressione è una grandezza scalare, mentre la forza è un vettore. Non dimentichiamo, dunque, che la superficie ha un vettore associato, che determina in maniera cruciale la “direzione” in cui agisce la pressione. Quindi, se pensiamo ad un fluido in movimento, una variazione di velocità nella direzione del flusso comporterà una variazione della pressione dinamica. Allo stesso modo una variazione di velocità nella direzione normale al flusso, comporterà una variazione di pressione statica. La pressione totale è la somma delle pressioni statica e dinamica. Diventa quindi importante capire, quando si parla di pressione, a quale pressione facciamo riferimento. Gli strumenti di misura a bordo di un aereo (per esempio il famoso tubo Pitot per misurare la velocità di crociera) tengono conto di entrambe le pressioni in gioco (tubo Pitot-Prandtl).

Le leggi della dinamica vengono applicate nel considerare che sia l'aereo che le masse d'aria coinvolte sono oggetti macroscopici. Per studiare la dinamica dei fluidi, dobbiamo invece considerare a volte quelle che vengono chiamate **particelle di fluido**. Non sono le singole molecole (d'aria o acqua) ma dei piccoli elementi di volume grandi abbastanza da contenere milioni di molecole ma allo stesso tempo piccoli abbastanza da essere considerati singoli elementi sui quali applicare le leggi della dinamica (l'equivalente di un punto materiale). Allo stesso tempo, non possiamo dimenticare che da un punto di vista microscopico, ogni fluido è fatto di molecole (per quello che ci interessa non è necessario scendere al livello atomico), ciascuna delle quale interagisce con le altre seguendo le leggi della meccanica statistica. Quindi, la pressione altro non è che il risultato degli urti sia tra le molecole, che con gli eventuali contenitori, che portano ad un continuo scambio di quantità di moto, creando forze che agiscono tra la superficie molecolare e con i confini, dando luogo alla pressione.

Quindi, nel ragionare sulle cause (origini) della portanza, è bene tenere in mente tutti e tre livelli di approccio, per riuscire ad applicare i principi giusti.

Quali sono dunque le teorie “corrette” (intendiamo per corrette quelle che applicano i principi nelle condizioni giuste) sul volo?

### 1. Bernoulli + Newton

Come abbiamo detto prima, il p. di B. si può soltanto applicare al di fuori del cosiddetto strato limite (boundary layer). Lo strato limite fu introdotto da Prandtl nel 1905 per spiegare il comportamento delle linee di flusso nello scontrare una superficie (nel nostro caso l'ala). Il suo spessore può variare da qualche mm a qualche cm, a secondo della velocità del fluido. Lo strato limite si forma come conseguenza della viscosità del fluido o come viene detto in letteratura, dovuto alla “skin friction”, alla frizione di superficie. Si sa (da esperimenti già effettuati da Newton) che quando un fluido è a contatto con una superficie, si dà quello che viene chiamato la “no-slip

condition”: il fluido è fermo nel punto di contatto con essa. Di conseguenza, allo stesso modo che quando due strati di fluido che scorrono a velocità diversa tendono a “trascinare” (quello più veloce) o “rallentare” (quello più lento) uno all’altro, generando forze viscosive di sforzo (tensioni) che provocano cambiamenti di pressione, la superficie ferma il fluido per viscosità. Succede allora che, mentre il fluido lontano dalla superficie scorre a velocità elevata (seguendo un flusso laminare e in viscido regolato dalle equazioni di Eulero, e dove è dunque valido applicare il P.di B.), nel punto di contatto con la superficie il fluido è fermo, e, man mano che si percorre lo strato limite nella direzione normale alla superficie, la velocità passa da zero a U (velocità del flusso esterno) in maniera rapidissima: c’è un gradiente di velocità enorme, e bisogna applicare l’equazioni di Navier-Stokes. Dentro lo strato limite non possiamo applicare il p.di B.

Questo grande gradiente di velocità crea delle tensioni di sforzo (shear forces) che obbligano al fluido a piegarsi e seguire il profilo dell’ala. L’ala (dove il fluido è costretto a fermarsi) trascina a sua volta con sé un sottile strato d’aria, creando una depressione che si propaga rapidamente all’esterno dello strato limite. Quindi, anche l’aria che sta al di sopra dello strato limite tende a piegarsi verso le zone di bassa pressione (allo stesso modo che una zona di bassa pressione nell’atmosfera provoca venti che tendono a soffiare verso il centro della burrasca, o allo stesso modo che all’interno di un tornado c’è una zona di bassissima pressione che è quasi un vuoto, creando i devastanti effetti di risucchiamento). In un certo senso l’aria sopra l’ala viene continuamente “trascinata”<sup>1</sup> verso di essa, e poi successivamente spinta in giù dalla parte finale dell’ala (trailing edge). E’ il downwash. Tutta l’aria che viene spinta in giù continuamente crea una forza di reazione (terzo p. della dinamica) uguale e in direzione opposta che altro non è che la portanza.

**Quindi l’effetto congiunto della azione dello strato limite sull’aria soprastante e la forza di reazione del downwash, provocano la necessaria portanza.**

Da un punto di vista microscopico, l’aria che si ferma a contatto con la superficie dell’ala in realtà è tutto altro che ferma! Le molecole d’aria sono continuamente urtando tra di loro, e quelle di velocità più bassa (quelle vicino alla superficie, ben all’interno dello strato limite) rallentano quelle provenienti da fuori dal medesimo, rallentando ulteriormente l’aria. Questo effetto (rallentamento delle molecole d’aria e dunque depressione) si propaga velocemente a traverso lo strato limite, il cui spessore aumenta lungo la direzione del flusso (verso il trailing edge). Questo meccanismo crea delle turbolenze (che si propagano lungo il flusso) creando instabilità. Molto vicino alla superficie, invece, il flusso nello strato limite (un piccolo substrato) può essere considerato laminare. (Vedremo come il meccanismo dello instaurarsi della turbolenza all’interno dello strato limite è ritenuto responsabile, insieme alla circolazione, della portanza nel successivo “modello corretto” del volo).

**Nota: Prandtl assumptions inside the boundary layer:**

1. La pressione cambia continuamente ma leggermente all’interno dello strato limite (se questo è sottile). Dalle equazioni di Navier-Stokes, per un fluido che incontra una superficie curva:

$$\partial p / \partial y = K \rho u^2 \quad (\text{gradiente di pressione nella direzione normale alla superficie})$$

Dove u è la velocità lungo la direzione del flusso,  $\rho$  è la densità e K è la curvatura della superficie nel punto di contatto. Quindi, questo è il gradiente di pressione che compensa l’effetto centrifugo del flusso attorno alla superficie curva.

---

<sup>1</sup> È lo entrainment

2. Il numero di Reynolds  $R \propto \rho u / \nu$  dove  $\nu$  è la viscosità cinematica deve essere grande ma non tanto da rendere il flusso turbolento
3. Nello strato limite il termine d'inerzia è dello stesso ordine di grandezza del termine viscoso o di frizione:  $u \nabla u \approx \nu \Delta u$

## 2. Kutta-Joukowski (starting vortex + circulation)

Ovvero il cilindro rotante che si solleva (<http://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/cyl.html>)

Mediante le adeguate trasformazioni di Joukowski, la superficie di un cilindro si può trasformare in un profilo alare, nel quale la velocità del flusso nel trailing edge, sopra e sotto è uguale, così come la pressione. Questa è la cosiddetta condizione di Kutta, che spiega la portanza come conseguenza della creazione di un vortice (starting vortex) che si propaga lungo il profilo alare staccandosi nel trailing edge, e dando luogo alla circolazione (circulation field) intorno all'ala.

Abbiamo visto prima come dalla formazione dello strato limite risulti una depressione sulla superficie dell'ala che obbliga al flusso a piegarsi lungo il profilo. Tuttavia, come accennavamo prima, lungo il flusso questa depressione viene lentamente a meno, quando lo scambio di molecole d'aria lente con quelle più veloci provenienti dallo strato esterno non è efficiente abbastanza. Quando questo avviene c'è lo stacco (separation) dello strato limite. Quindi, l'aria proveniente dal leading edge dell'ala, trova di fronte a sé un gradiente di pressione avverso (nell'andare verso il trailing edge, trova pressioni maggiori e quindi si rallenta, perde energia cinetica). All'interno dello strato limite, però c'è già una perdita di energia per frizione (skin friction), e l'aria fatica ad accomodarsi alla velocità del flusso sovrastante. Se questo gradiente avverso è graduale, gli impatti con le molecole d'aria esterne più veloci (il mescolamento turbolento) aiuta a "trascinare" quelle più interne lungo il flusso, e lo strato limite aumenta di spessore, lasciando una "scia" (wake) che si muove lentamente dietro il trailing edge.

Se, invece, questo gradiente avverso di pressione è troppo veloce, il processo di energizzazione (tramite gli scontri di molecole più lente vicino alla superficie e quelle più veloci del flusso esterno) è troppo lento per riuscire a compensarlo, ed il flusso esterno non ce la fa a portare dietro lo strato interno lungo l'ala. Lo strato limite, dunque si separa, creando la situazione di stallo. Maggiore è l'angolo di attacco, più avanti nell'ala avviene la separazione. Di qua anche che maggiore è la turbolenza (mixing) all'interno dello strato limite, meno facilmente avverrà la separazione (a parità di spessore dello strato). Allo stesso tempo questa turbolenza è la portatrice della maggior parte del "drag" dato un determinato spessore.

Che succede quando l'ala è accelerata rapidamente partendo dal riposo?

Inizialmente il flusso continua ad essere quasi laminare e non c'è alcuna portanza. Mano a mano che la velocità del flusso d'aria (o dell'ala) aumenta, lo strato limite comincia a separarsi (vicino al trailing edge, e sempre dovuto al gradiente avverso di pressione) cominciando a formarsi un vortice (starting vortex) che si propaga verso la punta finale dell'ala ed all'interno del quale l'aria gira in senso antiorario. Questo vortice cresce e si propaga lungo l'ala finché si stacca e abbandona la superficie. È questo vortice che crea l'asimmetria (e quindi le differenze di pressione) tra le superficie superiore ed inferiore (senza questa asimmetria, creata dalla viscosità, non c'è portanza, né "drag", ma il

cosiddetto paradosso di D'Alembert<sup>2</sup>). Quindi, **la viscosità, tramite il meccanismo di separazione e la formazione di vortici, è direttamente responsabile della portanza**, in quanto è **il vortice iniziale** (starting vortex) **a produrre la necessaria circolazione** intorno all'ala. L'effetto sulla velocità dell'aria creato dalla circolazione non è drammatico, ma la **direzione del flusso** cambia in maniera significativa in quanto la circolazione modifica la direzione dell'aria, facendola risalire sopra il profilo alare. Non solo. La circolazione sulla parte superiore dell'ala fa aumentare la velocità dell'aria lungo il flusso, e fa il contrario nella parte inferiore (si oppone al flusso d'aria). Di conseguenza l'aria sopra ha una velocità maggiore che sotto l'ala (localmente). Mano a mano che ci allontaniamo dall'ala gli effetti della circolazione sono molto meno importanti.

**Infine, viscosità significa formazione di vortici e quindi di circolazione, responsabile della portanza.**

La portanza è proporzionale a :

$$LIFT \propto K \rho U$$

E la direzione si ottiene ruotando il vettore velocità (U) un angolo positivo nel senso opposto a quello della circolazione (regola della mano destra).

Perché ci sia una forza di portanza su un profilo alare e allo stesso tempo si abbia una boundary layer che non si stacchi, ci vuole circolazione; tuttavia, questa deve avere un particolare valore e cioè quello che garantisce che, dato un particolare orientamento dell'ala (angolo di attacco) il punto di stagno posteriore si trovi proprio nella parte finale e sottile (sharp end) dell'ala. In questa maniera la velocità lì è finita e non nulla. E' proprio questo fatto, e cioè, lo stabilirsi di una circolazione dovuta allo spostamento di vorticità lungo l'ala, che garantisce la portanza.

***L'effetto della viscosità nel boundary layer, quando inizia il movimento dell'ala nell'aria, causa la giusta quantità di vorticità necessaria a far sì che si stabilisca la necessaria circolazione (che genera la portanza) e che ci permette di ignorare gli effetti della viscosità una volta che si è stabilito il movimento stazionario. Questa è l'ipotesi di Joukowski.***

---

<sup>2</sup> Il paradosso di D'Alembert si illustra facilmente con una superficie piatta, ma è ugualmente valido per un profilo alare qualsiasi: senza viscosità la portanza e la resistenza sono sempre zero (vedere: "The origins of lift, Arvel Gentry, 2006)

Qual è dunque la teoria corretta per spiegare la portanza e il volo?

In quale ordine entrano in gioco la viscosità, i gradienti di pressione, la velocità del flusso d'aria ?

Partiamo dall'aereo (qualsiasi sia il profilo alare, e l'angolo di attacco) a riposo. Quando comincia a muoversi lentamente, il flusso d'aria sull'ala è pressoché laminare (a velocità bassa l'aria fa poca resistenza sull'ala, c'è poca "skin friction", diciamo che l'aria ha tutto il tempo per "accorgersene" che l'ala sta arrivando, e si può ancora considerare un fluido incompressibile anche vicino alla superficie). L'aereo comincia ad accelerare, e di conseguenza la frizione di superficie comincia ad aumentare (l'aria fa resistenza all'ala), si comincia a formare lo strato limite, dove l'aria è viscosa. Quindi, vicino alla superficie:

No slip- condition  $\Rightarrow$  Gradiente di velocità nel punto di stagno (N.B.:questo punto si trova sotto il "muso" dell'ala, non nel punto esatto nella direzione del flusso; di conseguenza, l'aria è costretta a risalire lungo il profilo dell'ala, **anche se questa è piatta**, creando un flusso in su (upwash))<sup>3</sup>  $\Rightarrow$  depressione sulla superficie dell'ala che si propaga verso il trailing edge  $\Rightarrow$  l'aria sovrastante sente la depressione e si curva seguendo il profilo (**downwash**)  $\Rightarrow$  lo scambio tramite urti di molecole lente (vicino alla superficie) e rapide (fuori dallo strato limite) crea piccoli vortici che servono ad aiutare l'aria dello strato limite (che perde continuamente per skin friction energia cinetica) a trascinarsi con l'ala verso il trailing edge ("pompano" lo strato limite evitando lo stacco) (a queste velocità il punto di stacco è ancora lontano dal muso dell'ala)  $\Rightarrow$  verso il trailing edge si forma, man mano che aumenta la velocità, un vortice (starting vortex) che si sposta in dietro fino a distaccarsi; per adesso siamo già a velocità elevate, c'è una massa d'aria che viene spinta in giù come conseguenza del piegarsi per accomodarsi al profilo alare; in più, lo starting vortex comincia a creare circolazione intorno all'ala, che aiuta ad accelerare l'aria sopra l'ala ed a rallentare quella sotto, aumentando l'effetto del gradiente di pressione (nello strato limite e vicino all'ala, l'aria continua ad essere "ferma" da un punto di vista macroscopico)  $\Rightarrow$  dalla conseguenza di tutti questi effetti: upwash, depressione, downwash, vortici, starting vortex, circolazione, ne viene fuori la portanza.....siamo riusciti a decollare!

In questo ragionamento abbiamo usato le leggi della dinamica, della idrodinamica (viscosa e in viscida) e certi principi geometrici (Kutta-Joukowski)

---

<sup>3</sup> L'aria deve percorrere quindi una linea curva (anche se l'ala è piatta): di conseguenza, c'è un gradiente trasversale di pressione (che aumenta allontanandoci dal centro di curvatura). **Quando le linee di flusso sono curve, la equazione di Eulero prevede la presenza di un gradiente trasversale di pressione: la pressione aumenta allontanandosi dal centro di curvatura locale.** Di conseguenza, la pressione nella zona vicino all'ala è minore di quella lontano da essa. Questa è la "depressione" che obbliga l'aria sovrastante a piegarsi e seguire il profilo alare (e anche a farlo più veloce! Tanto è vero che arriva al trailing edge prima dell'aria che scorre sotto, invalidando il principio di equal transit time, d'altronde sfalsato sperimentalmente).

Quindi non ci serve un'ala curva per avere portanza, basta l'angolo di attacco, anche con una superficie piatta.