

La fisica del volo: portanza ed equazione di Bernoulli

Giulio Tretti

2 luglio 2026

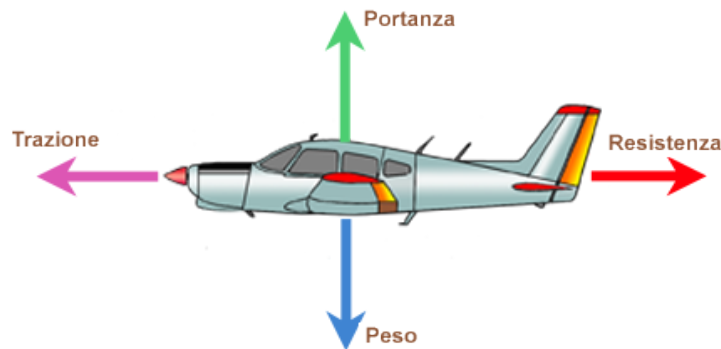
Indice

1	Introduzione al volo	2
1.1	Le quattro forze del volo	3
2	L'equazione di Bernoulli	3
2.1	Il principio fisico	3
2.2	Applicazione al profilo alare	4
3	La formula della portanza	5
3.1	Analisi delle variabili	6
4	Il mito dei tempi di transito uguali	6
4.1	Perché questa spiegazione è errata	7
5	Spiegazione moderna della portanza	7
5.1	Effetto Coandă	8
5.2	Terzo principio della dinamica	8
5.3	Conclusioni	8

1 Introduzione al volo

Il volo degli aeroplani rappresenta una delle più affascinanti e straordinarie applicazioni della fisica classica nella vita reale. Sebbene possa sembrare sorprendente e persino controintuitivo che una macchina dal peso di diverse centinaia di tonnellate riesca a staccarsi da terra e a viaggiare stabilmente nel cielo, il fenomeno è interamente spiegabile attraverso alcune *leggi fondamentali della meccanica classica e della fluidodinamica*.

Per comprendere appieno il funzionamento di un aereo non ci si può limitare a un'osservazione superficiale, ma è necessario analizzare nel dettaglio l'*equilibrio dinamico delle forze* che agiscono sul velivolo durante le varie fasi del volo, nonché il *comportamento delle particelle d'aria che interagiscono costantemente con le superfici alari*.



Ecco le forze che agiscono su un aereo in volo

1.1 Le quattro forze del volo

Durante ogni fase del volo, sul velivolo agiscono simultaneamente quattro forze fondamentali, divisibili in 2 coppie di vettori contrapposti:

Forza	direzione del vettore	origine/causa	obiettivo fisico
Trazione	In avanti	Generata dai motori	accelerare il velivolo e vincere la resistenza
Resistenza	All'indietro (contrario alla spinta)	Viscosità dell'aria e geometria del velivolo	si oppone al movimento del velivolo
Portanza	verso l'alto (perpendicolare al moto)	differenza di pressione/ deviazione di flusso	sostenere l'aereo in quota e contrastare il peso
Peso	verso il basso (centro della terra)	gravità agente sulla massa complessiva	attrarre il velivolo verso il basso

Affinché un aeroplano possa decollare, accelerare o mantenere un volo rettilineo uniforme a una quota costante, queste forze devono trovarsi in un preciso stato di equilibrio dinamico: la portanza deve compensare esattamente il peso, mentre la spinta deve bilanciare perfettamente la resistenza aerodinamica.

2 L'equazione di Bernoulli

Uno dei pilastri teorici storicamente più utilizzati e citati nello studio della fluidodinamica e del volo è il principio di Bernoulli, formulato dal celebre matematico e fisico svizzero **Daniel Bernoulli** nel XVIII secolo all'interno del suo trattato *Hydrodynamica*.

2.1 Il principio fisico

L'equazione di *Bernoulli* non è altro che una formulazione del principio di conservazione dell'energia applicata ai *fluidi ideali* (ovvero fluidi non viscosi e incompressibili) in regime di flusso stazionario. Essa afferma che, lungo una determinata linea di flusso, la somma dell'energia di pressione, dell'energia cinetica e dell'energia potenziale per unità di volume si mantiene costante. Se consideriamo il volo a quote pressoché costanti, la variazione di energia potenziale è trascurabile, pertanto un aumento della velocità locale del fluido comporta necessariamente

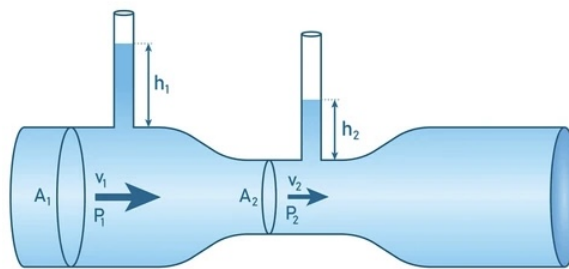
una corrispondente diminuzione della sua pressione statica. In forma matematica standard la formula si esprime come:

$$P + \frac{1}{2}\rho v^2 = \text{costante}$$

con le variabili definite come:

- P : rappresenta la pressione statica del fluido (espressa in *Pascal*)
- ρ : indica la densità del fluido (espressa in $\frac{kg}{m^3}$)
- v : indica la velocità del fluido lungo la linea di flusso (in $\frac{m}{s}$)

Questo principio dimostra che la pressione dinamica (legata alla velocità) e la pressione statica sono inversamente proporzionali: se il fluido accelera, la pressione interna cala.



Ecco il principio di *Bernoulli* spiegato con un'immagine

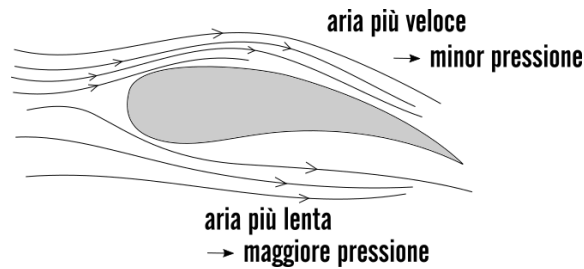
2.2 Applicazione al profilo alare

Le ali degli aerei non sono piatte, ma possiedono una sezione geometrica specificamente progettata dai progettisti aeronautici, denominata **profilo alare**. Questo profilo è generalmente caratterizzato da una curvatura asimmetrica, con la parte superiore (dorso) più bombata ed estesa rispetto alla parte inferiore (ventre), che si presenta più piatta.

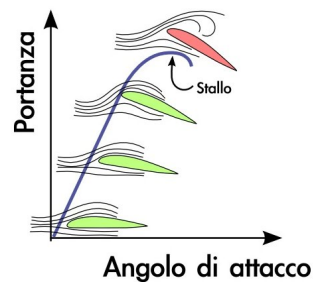
Quando l'aereo avanza tagliando l'aria, il flusso gassoso si divide in corrispondenza del bordo d'attacco (la parte anteriore dell'ala). A causa della geometria asimmetrica e dell'angolo con cui l'ala incontra l'aria, il flusso che scorre sopra il dorso è costretto a subire una forte strozzatura e una deviazione geometrica, il che lo costringe a muoversi a una velocità locale decisamente superiore rispetto al flusso che transita sotto il ventre.

Applicando l'equazione di *Bernoulli*, laddove la velocità dell'aria è maggiore (sul dorso) si genera una zona di bassa pressione, mentre dove la velocità è minore (sul ventre) si mantiene una pressione più alta.

Questa netta differenza di pressione tra la superficie inferiore e superiore genera una forza netta risultante diretta dal basso verso l'alto, che contribuisce in modo significativo alla portanza.



La situazione di stallo in un aereo avviene quando l'angolo di incidenza (inclinazione dell'ala rispetto al flusso d'aria che la investe) è troppo grande.



3 La formula della portanza

Nelle scienze aeronautiche e nell'ingegneria aerospaziale, la forza di portanza non viene calcolata solo tramite i principi teorici microscopici, ma viene quantificata globalmente attraverso una celebre relazione matematica macroscopica sperimentale.

La formula fondamentale della portanza è espressa come:

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

Ogni termine all'interno di questa equazione rappresenta una caratteristica ben specifica:

- L : Forza di portanza totale risultante (in N)
- ρ : densità dell'aria circostante, che varia sensibilmente in base alla quota di volo e alla temperatura atmosferica
- v : velocità relativa dell'aereo rispetto al fluido indisturbato (in $\frac{m}{s}$)
- S : area della superficie alare della pianta dell'aereo (in m^2)
- C_L : coefficiente di portanza, numero adimensionale che racchiude in sé l'efficienza geometrica del profilo alare e varia in base all'angolo di incidenza

3.1 Analisi delle variabili

Analizzando attentamente la struttura matematica della formula, è possibile comprendere come i piloti e i progettisti possano manipolare le diverse variabili per controllare il comportamento del velivolo. La portanza aumenta in modo *direttamente proporzionale* alla densità dell'aria (ecco perché a quote stratosferiche, dove l'aria è rarefatta, è più difficile generare portanza) e alla superficie delle ali. Tuttavia, *il fattore più influente è la velocità*, poiché essa agisce elevata al quadrato: raddoppiare la velocità del mezzo quadruplica la forza ascensionale prodotta. Inoltre, modificando l'angolo di attacco o estendendo i sistemi di ipersostentazione (come i flap e gli slat durante le fasi di atterraggio e decollo), si aumenta temporaneamente il coefficiente C_L e la superficie S . Questa profonda dipendenza dalle variabili spiega chiaramente perché *ogni aeroplano necessita di percorrere una pista di rullaggio per raggiungere una specifica velocità minima critica* (chiamata velocità di rotazione o V_r , preceduta da V_1 che una volta superata non è più possibile abortire il decollo, e succeduta da V_2 dopo la quale il velivolo è in volo) prima di poter generare la portanza necessaria a vincere la forza peso e staccarsi stabilmente dal suolo.

4 Il mito dei tempi di transito uguali

Per molti decenni, sia nei manuali scolastici sia nella saggistica divulgativa, è stata purtroppo diffusa una spiegazione eccessivamente semplificata – e fisicamente errata – della genesi della portanza, nota nella comunità scientifica come *”teoria dei tempi di transito uguali”* o *”teoria della popolarità”*.

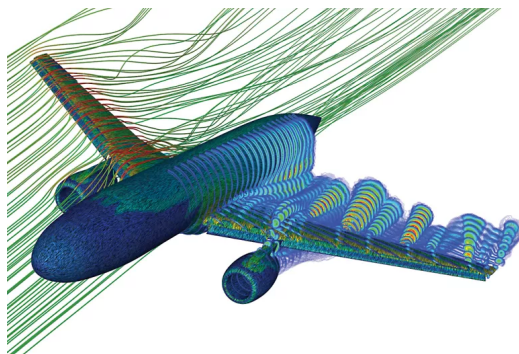
Questa teoria fallace si basa sul presupposto geometrico che due ipotetiche particelle d'aria, separate nettamente dal bordo anteriore dell'ala, debbano necessariamente compiere il loro percorso lungo il profilo e ricongiungersi nello stesso

identico istante sul bordo posteriore (bordo d'uscita). Dato che il dorso dell'ala è più curvo e lungo rispetto al ventre, l'aria superiore sarebbe costretta a percorrere una distanza geometrica maggiore nello stesso intervallo di tempo, accelerando e riducendo la pressione in virtù del solo principio di *Bernoulli*.

4.1 Perché questa spiegazione è errata

Le simulazioni computazionali della fluidodinamica (CFD) e le visualizzazioni sperimentali in galleria del vento hanno ampiamente dimostrato che il presupposto dei tempi di transito uguali non ha alcun fondamento nella fisica dei fluidi. Non esiste alcuna legge di natura che obblighi le particelle separate a ricongiungersi alla fine del profilo.

In realtà, l'aria che scorre sulla parte superiore dell'ala viene accelerata a una velocità talmente elevata che supera di gran lunga il tempo impiegato dal flusso inferiore, raggiungendo il bordo d'uscita molto prima rispetto alla porzione di flusso che ha percorso il ventre dell'ala. Di conseguenza, pur rimanendo valido il legame matematico tra velocità e pressione espresso da Bernoulli, la premessa geometrica della "distanza maggiore percorsa nello stesso tempo" è completamente falsa e non può essere utilizzata per spiegare l'origine quantitativa della portanza.



Spiegazione visiva del perché questa teoria è errata

5 Spiegazione moderna della portanza

La fisica e l'ingegneria moderna interpretano la generazione della portanza in modo più olistico ¹ e rigoroso, abbandonando i miti geometrici e considerando l'interazione dinamica globale, lo scambio di quantità di moto e la viscosità del fluido nel sistema *ala-aria*.

¹metodo per cui vanno studiate tutte le parti che compongono un insieme per capirne il vero funzionamento

5.1 Effetto Coandă

Un tassello fondamentale per comprendere il comportamento reale dell'aria è l'effetto *Coandă*, individuato dal pioniere dell'aerodinamica rumeno *Henri Coandă*. Questo fenomeno fisico descrive la naturale tendenza di un flusso di fluido viscoso a seguire la curvatura di una superficie solida vicina, anziché proseguire in linea retta.

Nel caso specifico dell'aeroplano, a causa degli attriti viscosi nello strato limite, l'aria che investe la parte superiore dell'ala aderisce tenacemente al profilo curvo del dorso. Questo fa sì che il flusso d'aria non si separi dall'ala, ma venga letteralmente "pizzicato" e costretto a seguire la geometria discendente della parte posteriore della struttura, venendo deflesso nettamente verso il basso una volta superato il bordo d'uscita (un fenomeno noto in inglese come *downwash*).

5.2 Terzo principio della dinamica

Una volta stabilito che l'ala ha la capacità di deviare enormi masse d'aria verso il basso attraverso la sua geometria e il suo angolo di attacco, entra in gioco il Terzo Principio della Dinamica di *Newton* (noto anche come principio di azione e reazione). Questa legge fondamentale della meccanica afferma che a ogni azione corrisponde sempre una reazione uguale in modulo e direzione, ma contraria in verso.

Quando l'ala avanza nell'atmosfera, esercita un'azione meccanica diretta sull'aria, spingendo continuamente verso il basso una specifica portata in massa di fluido. Come reazione immediata e inevitabile, l'aria esercita sul profilo alare una forza uguale e contraria diretta verso l'alto. Questa spinta reattiva verso l'alto costituisce la componente primaria della portanza aerodinamica, permettendo al velivolo di sostenersi in volo.

5.3 Conclusioni

In ultima analisi, il volo degli aeroplani non può essere ridotto a un singolo e isolato fenomeno fisico, ma è il mirabile risultato della combinazione sinergica di diversi principi fluidodinamici. L'equazione di *Bernoulli* descrive accuratamente la relazione locale tra i campi di velocità e i campi di pressione attorno all'ala, ma non spiega l'origine prima dell'accelerazione del fluido.

La spiegazione scientifica moderna e completa richiede l'unione dei modelli: la viscosità dell'aria e l'effetto *Coandă* costringono il flusso a seguire il profilo dell'ala, l'angolo di attacco devia l'aria verso il basso, e il terzo principio di *Newton* traduce questa deviazione di massa in una spinta ascensionale netta. Solo integrando la conservazione dell'energia (*Bernoulli*) con la conservazione della quan-

tità di moto (*Newton*) si ottiene una descrizione impeccabile e scientificamente fondata di come un aeroplano riesca a vincere la gravità.