

# Una descrizione fisica del volo

David Anderson, *Fermi National Accelerator Laboratory*, [dfa180@aol.com](mailto:dfa180@aol.com)  
Scott Eberhardt, *Dept. of Aeronautics and Astronautics, Univ. of Washington, Seattle WA 98195-2400*, [scott@aa.washington.edu](mailto:scott@aa.washington.edu)

Traduzione dall'inglese di Silvia Pugliese Jona per "La Fisica nella Scuola", n°2, aprile-giugno 2006

## 1. Introduzione

Ai nostri giorni moltissime persone hanno avuto occasione di volare in aeroplano. Molti si domandano cos'è che permette agli aeroplani di volare. Spesso ricevono risposte fuorvianti o addirittura completamente errate. Speriamo che le risposte che daremo qui aiutino a chiarire le idee sulle cause della portanza e che possiate utilizzarle se qualcuno dovesse chiedervi spiegazioni in proposito. Vi mostreremo che conviene partire dalle leggi di Newton e non dal principio di Bernoulli su cui si fonda la spiegazione studiata dalla maggior parte di noi. Questa spiegazione è, a dir poco, fuorviante: infatti la portanza è prodotta da aria che, da sopra l'ala, viene deviata verso il basso.

Cominciamo con definire i tre modi di descrivere la portanza riportate in libri di testo e in manuali di addestramento al volo. Il primo, usato dagli ingegneri aeronautici, è la descrizione aerodinamica matematica. Essa permette per esempio di determinare la portanza di un'ala mediante simulazioni su computer in cui, applicando un concetto matematico complicato chiamato "circolazione", si calcola l'accelerazione subita dall'aria. La circolazione, che quantifica il fenomeno fisico (che si manifesta nel riferimento dell'aereo) della rotazione dell'aria intorno all'ala, è un utile strumento matematico ma non si presta a formare una comprensione intuitiva di perché l'aereo vola.

Il secondo modo è la descrizione comune e si basa sul principio di Bernoulli. Ha il vantaggio di essere facile da capire e infatti, da molti anni, è la più frequentemente insegnata. Per la sua semplicità è anche quella riportata da molti manuali d'addestramento. Ha il difetto di ipotizzare un "principio di uguale tempo di percorrenza", ossia l'idea che la velocità relativa dell'aria lungo la faccia superiore dell'ala è più elevata perché la distanza da percorrere è maggiore. Questa descrizione focalizza l'attenzione sulla forma dell'ala e non spiega fenomeni come il volo rovesciato, la potenza occorrente per volare, l'effetto della vicinanza del suolo a volo radente e la dipendenza della portanza dall'angolo d'incidenza dell'ala.

La terza descrizione, che noi qui propugniamo, è la descrizione fisica della portanza basata principalmente sulle tre leggi della dinamica e su un fenomeno noto come "effetto Coanda". Essa è particolarmente utile per capire non solo i fenomeni che rendono possibile il volo ma anche le relazioni tra grandezze significative come, per esempio, la dipendenza della potenza dal carico alare<sup>1</sup> o la dipendenza della velocità di stallo dall'altitudine. Fornisce strumenti per stimare la portanza in modo veloce e approssimato (i cosiddetti calcoli "sul retro della busta") ed inoltre promuove l'acquisizione di una comprensione intuitiva del volo, utilissima ai piloti quando guidano un aeroplano.

## 2. La "descrizione comune" della portanza

Agli studenti di fisica e di aerodinamica s'insegna che gli aerei volano a causa del principio di Bernoulli, che afferma che quando la velocità dell'aria aumenta la sua pressione diminuisce. (Di fatto ciò non è sempre vero. Nonostante l'aria scorra veloce sulla presa statica dell'aereo, l'altimetro

---

<sup>1</sup> NdT: Il carico alare è la risultante del peso del velivolo (e di ciò che trasporta) e delle forze dovute ad accelerazioni normali alla superficie delle ali, per esempio le forze centripete in virata.

ne misura correttamente l'altitudine.<sup>2)</sup> La motivazione addotta è che la portanza è dovuta al fatto che l'aria fluisce più velocemente sopra l'ala che sotto, generandovi una zona di minor pressione. Questa spiegazione soddisfa la curiosità dei più e pochi la pongono in dubbio. I più curiosi potrebbero voler capire perché l'aria che passa di sopra è più veloce: proprio questo è il punto debole della spiegazione.

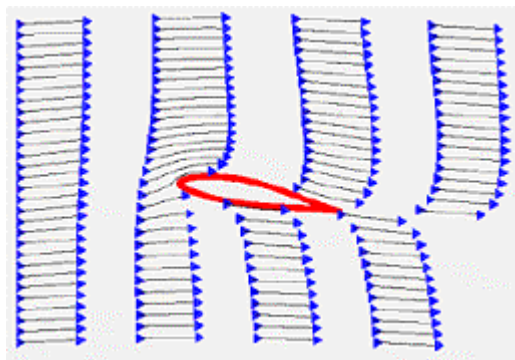
Per giustificare la maggiore velocità dell'aria si ricorre alla geometria, dicendo che la velocità è in relazione alla distanza che l'aria percorre. Si dice che dopo essersi separati sul bordo anteriore dell'ala i due flussi d'aria - quello che passa sopra e quello che passa sotto - devono tornare a riunirsi in corrispondenza del bordo posteriore. È il cosiddetto "principio degli uguali tempi di transito".

Cerchiamo di capire quanto siano realistici i calcoli basati sulla descrizione comune. Consideriamo un esempio concreto: il Cessna 172, un piccolo aereo a quattro posti, ad ala alta, abbastanza diffuso. A pieno carico le ali devono sostenere una massa di circa 1050 kg. Il percorso lungo la faccia superiore dell'ala è dell'1,5% maggiore del percorso lungo la faccia inferiore. Applicando la descrizione comune, alla velocità di circa 100 km/h (che per questo aeroplano è "volo lento") l'ala produrrebbe solo il 2% della portanza richiesta. I calcoli portano a concludere che per sviluppare una portanza sufficiente la velocità dell'aereo deve superare i 640 km/h, e se calcoliamo la differenza tra i due percorsi lungo il profilo dell'ala che consentirebbe di sostenere il velivolo in condizioni di volo lento troviamo che dev'essere pari al 50%. L'ala dovrebbe essere spessa quasi quanto è larga.

Ma chi lo dice che i due flussi devono rincontrarsi nello stesso istante al bordo posteriore? La figura 1 mostra come si muove l'aria intorno a un'ala in una galleria del vento simulata. Nella simulazione s'introducono nella galleria sbuffi di fumo ad uguali intervalli di tempo. L'aria che passa sopra il profilo alare raggiunge il bordo posteriore apprezzabilmente prima di quella che passa sotto. L'accelerazione di quest'aria è molto maggiore di quella prevista dall'ipotesi dell'uguale tempo di transito. Inoltre, un esame attento rivela che l'aria che passa radente sotto l'ala ritarda rispetto all'aria sottostante che fluisce liberamente. Il principio degli uguali tempi di transito varrebbe solo per ali con portanza zero.

**Fig 1**

Simulazione del flusso d'aria intorno a un'ala in una galleria del vento con "fumo".



La spiegazione comune implica l'impossibilità del volo rovesciato. Non è applicabile ai velivoli acrobatici, le cui ali sono simmetriche (ugual profilo sopra e sotto), né spiega come fa l'ala ad adeguarsi alle notevoli variazioni di carico che deve sopportare, per esempio, in uscita da una picchiata o percorrendo una curva stretta.

<sup>2</sup> NdT: I dati sull'altitudine, sulla velocità di salita o discesa e sulla velocità rispetto all'aria si ricavano da misure di pressione, effettuate attraverso aperture chiamate "prese". La presa statica è un'apertura laterale, normale alla direzione di volo dell'aereo, che coglie la pressione atmosferica locale utile a determinare l'altitudine. La presa dinamica è un'apertura parallela al verso del moto dell'aereo e coglie la somma della pressione atmosferica e della pressione di arresto dell'aria. Dal confronto delle due pressioni si ricava la velocità del velivolo rispetto all'aria.

La spiegazione comune ha resistito tanto a lungo perché il principio di Bernoulli è facile da capire. Non c'è nulla di sbagliato nel principio in sé, né con l'affermazione che l'aria che passa sopra l'ala va più veloce, ma le considerazioni sopra esposte suggeriscono che esso non riesce a spiegare compiutamente il fenomeno: con il solo principio di Bernoulli viene a mancare un pezzo vitale, infatti conoscendo le velocità possiamo calcolare le pressioni sopra e sotto l'ala, ma come si determinano le velocità? Presto vedremo che sopra l'ala *l'aria accelera perché la pressione si riduce*, e non il viceversa.

Un altro difetto importante della spiegazione comune è che ignora completamente il lavoro compiuto. La portanza richiede potenza (lavoro fratto tempo). Vedremo nel seguito che la comprensione degli aspetti energetici è chiave essenziale per capire molti interessanti fenomeni legati alla portanza.

### 3. La portanza e le leggi di Newton

Come si genera dunque la portanza di un'ala? Richiamiamo la prima e la terza legge della dinamica (la seconda ci servirà tra un po'). La prima legge, *un corpo in quiete rimarrà in quiete e un corpo in moto continuerà il suo moto in linea retta se non soggetti ad una forza esterna*, dice che per far cambiare direzione ad un flusso d'aria o per metterla in moto se inizialmente era in quiete, occorre applicare una forza. La terza legge dice che *ogni azione è accompagnata da una reazione opposta e di uguale intensità*. Per esempio, un corpo appoggiato su un tavolo esercita una forza sul tavolo d'intensità pari al suo peso e il tavolo che lo sostiene esercita su di esso una forza opposta a questa. Per avere portanza l'ala deve agire sull'aria: per fissare le idee possiamo etichettare ciò che l'ala fa all'aria come azione e la portanza che ne risulta come reazione.

Confrontiamo tra loro due illustrazioni dell'andamento dei filetti d'aria intorno ad un profilo alare. Nella figura 2 l'aria impatta orizzontalmente sull'ala, s'incurva intorno ad essa e l'abbandona di nuovo in direzione orizzontale. Figure di questo tipo s'incontrano comunemente anche nei manuali di volo. L'aria abbandona l'ala esattamente nelle stesse condizioni in cui l'aveva incontrata. Nessun'azione netta sull'aria, nessuna portanza! Nella figura 3 l'aria che abbandona l'ala è diretta verso il basso. La prima legge dice che perché ciò avvenga occorre una forza (l'azione) e la terza legge dice che sull'ala deve agire una forza opposta diretta verso l'alto (la reazione). Per generare portanza l'ala deve deviare verso il basso una grande quantità d'aria. Nella figura 3 i filetti sono disegnati correttamente.

**Fig 2**

Illustrazione comune del flusso d'aria intorno a un'ala. Quest'ala è priva di portanza.



**Fig 3**

Effettivo andamento del flusso d'aria intorno a un'ala, che mostra le deviazioni verso l'alto e verso il basso.

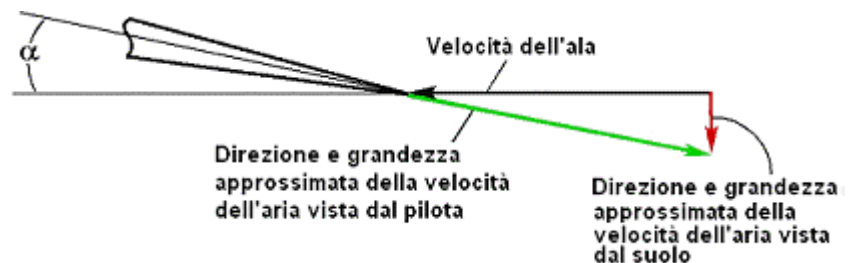


La portanza dell'ala è strettamente connessa alla variazione della quantità di moto  $massa \times velocità$  ( $mv$ ) dell'aria spinta verso il basso. Si può riformulare la seconda legge della dinamica  $F = ma$  (cioè  $forza = massa \times accelerazione$ ) per renderla meglio applicabile al nostro caso: *La portanza di un'ala è proporzionale alla massa dell'aria deviata verso il basso moltiplicata per la componente verticale della velocità di quell'aria*. Più semplice di così! Per aumentare la portanza dell'ala si può o deviare una maggiore quantità d'aria o aumentare la componente verticale della sua velocità in uscita dall'ala, indicata nella figura 3 con la parola “downwash”.<sup>3</sup>

La figura 4 mostra com'è visto il flusso dell'aria in uscita dall'ala nel riferimento dell'aereo (o nella galleria del vento) e com'è visto da un osservatore al suolo sorvolato dall'aereo. Per il pilota l'aria abbandona l'ala con un'inclinazione non molto diversa dall'angolo d'incidenza e con una velocità non molto diversa da quella dell'aereo. L'osservatore al suolo vede invece una velocità verso il basso, prossima alla verticale, di valore relativamente modesto. Aumentando l'angolo d'incidenza aumenta la componente verticale della velocità dell'aria. Similmente, a parità di angolo d'incidenza, tale componente aumenta aumentando la velocità orizzontale dell'ala. I due contributi - angolo d'incidenza e velocità orizzontale - contribuiscono ad aumentare la velocità verticale dell'aria (indicata nella figura con il vettore diretto in giù) e quindi ad aumentare la portanza.

**Fig 4**

La velocità d'uscita dell'aria dall'ala vista dal pilota dell'aereo e da un osservatore al suolo



L'aria che nel riferimento del suolo si allontana dall'ala dell'aereo in direzione quasi verticale non è sostanzialmente diversa dal compatto flusso cilindrico d'aria che si forma dietro un'elica, davanti a un ventilatore o sotto il rotore di un elicottero, le cui pale sono assimilabili ad ali rotanti. Se le pale espellessero l'aria a un angolo apprezzabile rispetto al loro asse di rotazione l'aria spazzerebbe un volume conico anziché cilindrico. Queste analogie confermano la conclusione che l'ala procura portanza trasferendo quantità di moto all'aria. Se il velivolo sta viaggiando ad altitudine costante e non sta compiendo una curva la quantità di moto trasferita all'aria è infine trasferita al suolo. Se l'aereo sorvolasse una (enorme) bilancia, la bilancia potrebbe pesarlo.

Cerchiamo di stimare quale massa d'aria debba essere deviata da un'ala per sostenere un aereo. Riprendiamo in esame un Cessna 172 di massa circa 1050 kg, che viaggia alla velocità di 220 km/h. Se si suppone che l'angolo d'incidenza delle ali sia 5° si trova che l'aria esce dall'ala con la velocità verticale di circa 18 km/h. Assumendo che la componente verticale *media* della velocità dell'aria deviata sia metà di questo valore, applicando la seconda legge di Newton troviamo che l'ala deve deviare più di 4 tonnellate d'aria al secondo. Un Cessna 172 in condizioni di volo normale devia dunque ogni secondo una massa d'aria più che quattro volte la sua. Pensate quant'aria deve deviare al decollo un aereo passeggeri da 250 tonnellate!

La necessità di coinvolgere una così grande massa d'aria è un forte argomento contro l'idea implicita nella spiegazione comune che la portanza sia causata da un fenomeno di superficie (cioè che sia generata solo in un piccolo strato d'aria prossimo alle superfici dell'ala). Infatti, poiché la

<sup>3</sup> NdT: In italiano non esistono termini tecnici corrispondenti agli inglesi “upwash” e “downwash” che indicano, rispettivamente, l'ascesa dell'aria che impatta sul bordo anteriore e la discesa dell'aria che esce dal bordo posteriore dell'ala. Nel resto di questo articolo si manterranno i termini inglesi ogniqualvolta motivi di brevità lo consiglino.

densità dell'aria al livello del mare è circa  $1 \text{ kg/m}^3$ , per poterne deviare in ogni secondo una tale massa l'ala del Cessna deve agire sull'aria contenuta in un volume che la sovrasta per un'altezza di circa 7 metri. La figura 5 illustra l'effetto prodotto dall'aria deviata verso il basso su un banco di nebbia sorvolato da un velivolo a volo radente.

**Fig 5**

Aria deviata verso il basso e vorticosità prodotte dalle ali nella nebbia. (Foto Paul Bowen, per gentile concessione di Cessna Aircraft, Co.)

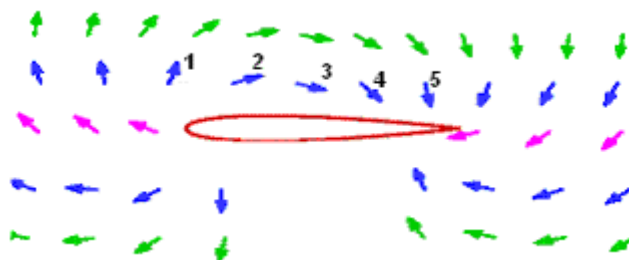


Come può una sottile ala deviare tanta aria? Come vedremo meglio nel prossimo paragrafo, alla base del fenomeno c'è la viscosità dell'aria che fa sì che i successivi filetti fluidi al di sopra dell'ala interagiscano tra loro. Infatti l'aria che è a contatto con l'ala, scendendo lungo l'ala stessa, tende a produrre un vuoto sopra di sé in conseguenza del quale anche il secondo filetto scende e così via, con curvature sempre meno pronunciate (e depressioni sempre più deboli) fino all'altezza dove l'aria è indisturbata. La depressione sopra l'ala non è quindi conseguenza della velocità relativa tra l'ala e l'aria, ma dell'accelerazione verso il basso che l'aria subisce.

Come mostra la figura 3, in corrispondenza del bordo anteriore dell'ala l'aria risale. Il fatto che lo spostamento in avanti dell'ala produca anche una deviazione verso l'alto complica il quadro. Infatti la risalita genera una deportanza e per compensarne l'effetto una maggior quantità di aria dev'essere deviata in giù. Riprenderemo questo punto quando discuteremo l'effetto suolo.

**Fig 6**

Moti dell'aria intorno a un'ala visti da un osservatore al suolo.



Di solito il comportamento dell'aria che scorre sull'ala viene studiato nel riferimento del pilota, per il quale l'ala è in quiete ed è l'aria a muoversi, mentre un osservatore al suolo vedrebbe un flusso d'aria che scende in direzione pressoché verticale. Ma cosa succede all'aria che passa sotto l'ala? Per capirlo conviene mettersi nel riferimento del suolo. La figura 6 rappresenta un'istantanea delle velocità delle molecole d'aria intorno all'ala in movimento, nel riferimento dell'aria. A un istante successivo il vettore "1" diventa vettore "2" e così via. Davanti all'ala la velocità dell'aria ha una componente verso l'alto, dietro ha una componente verso il basso. L'aria che si trova sopra l'ala accelera decisamente verso il bordo posteriore; quella che sta sotto ha una piccola velocità in avanti.

Quali le cause di questo schema di circolazione? Diciamo innanzitutto che a basse velocità di volo l'aria può essere trattata come un fluido incompressibile: il suo volume non può cambiare e non devono crearsi vuoti. Ma poiché sopra l'ala si è prodotta una diminuzione di pressione, altra aria (che poi sarà espulsa verso il basso dietro) viene succhiata da davanti. Di conseguenza una certa quantità d'aria gira intorno all'ala da sotto per andare a riempire il vuoto lasciato da quest'aria. Il fenomeno è simile alla circolazione d'acqua che si verifica intorno alla pala di un remo o pagaia.

Come l'acqua che circola intorno alla pala non produce forza motrice, così l'aria che circola intorno all'ala non produce portanza. Però la portanza è proporzionale alla quantità di aria che circola e quantificando la circolazione si può calcolare la portanza.

La figura 6 mostra che la faccia superiore dell'ala muove molta più aria della faccia inferiore perciò dal punto di vista progettuale la faccia superiore è quella più critica. Per questo motivo gli aerei possono trasportare carichi esterni, per esempio serbatoi supplementari, appesi sotto le ali ma non sopra dove interferirebbero con il flusso dell'aria, ed è ancora per questo che le strutture di rinforzo delle ali possono sporgere inferiormente ma, storicamente, non sono quasi mai state fatte sporgere di sopra. Qualsiasi sporgenza sopra l'ala può ridurre la portanza.

#### 4. Effetto Coanda

È ovvio chiedersi per quale meccanismo l'aria devia verso il basso. Venendo in contatto con una superficie curva i fluidi in movimento - aria o acqua - tendono a seguirne la curvatura. Ciò si dimostra facilmente avvicinando un bicchiere orizzontale ad un filo d'acqua che scende da un rubinetto. Quando l'acqua sfiora il bicchiere, invece di cadere dritta ci si avvolge intorno come in figura 7. La tendenza dei fluidi a seguire la curvatura delle superfici è detta "effetto Coanda". La prima legge della dinamica dice che per incurvare la traiettoria del fluido occorre una forza. La terza legge dice che il fluido deve esercitare sulla superficie una forza opposta.

**Fig 7**  
Effetto Coanda



Il fenomeno è dovuto alla viscosità del fluido: la resistenza allo scorrimento che conferisce all'aria un certo grado di "appiccicosità". La viscosità dell'aria è molto piccola ma purtuttavia sufficiente a far sì che le molecole tendano a restare attaccate alla superficie, in corrispondenza della quale la velocità relativa tra l'aria e il corpo che essa lambisce è nulla. (Questo è anche il motivo per cui con un getto d'acqua non si riesce a togliere la polvere dalla carrozzeria di un'automobile.) Lo strato d'aria che aderisce alla superficie dell'ala è detto "strato limite" e, anche per ali di grandi dimensioni, il suo spessore non supera 2 cm; ma poiché le forze che fanno incurvare gli strati fluidi sono forze di taglio, il fluido riesce a seguire la superficie solo finché la curvatura non è troppo pronunciata.<sup>4</sup> La velocità relativa all'ala dei successivi strati fluidi che la sovrastano cresce con la distanza e raggiunge il suo valore massimo dove l'aria è talmente lontana dall'ala da non esserne più disturbata.

Torniamo a guardare la figura 3. L'intensità delle forze che agiscono sull'aria (e sull'ala) deve crescere in proporzione inversa al raggio di curvatura della superficie. Possiamo osservare che la maggior parte della portanza è generata nella parte anteriore dell'ala: tipicamente nel primo quarto della sua larghezza.

---

<sup>4</sup>NdT: Come si vedrà nel prossimo paragrafo, al di sopra di un certo angolo d'incidenza il distacco dell'aria fa diminuire la portanza. L'aereo può andare in stallo.



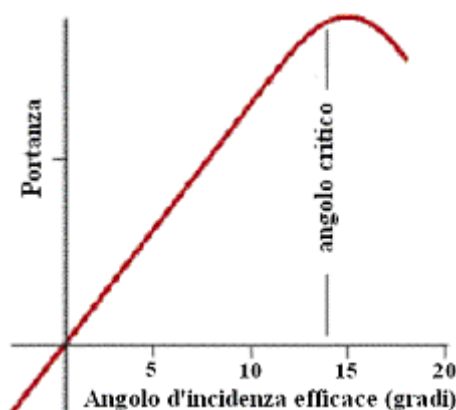
## 5. La portanza in funzione dell'angolo d'incidenza

Esistono molti tipi di ali: tradizionali, simmetriche, per volo rovesciato; le ali dei primi biplani somigliavano a tavole incurvate e si sono anche viste ali piane, prive di curvatura. Tutte queste ali spingono aria verso il basso o, più precisamente, la tirano giù da sopra (sebbene nelle primissime ali ci fosse un contributo non trascurabile dovuto alla forma della faccia inferiore). La proprietà comune a tutte le ali è il fatto di essere inclinate rispetto all'aria che le investe. L'inclinazione rispetto all'orizzontale o angolo d'incidenza è il parametro principale per calcolare la portanza.

Per meglio capirne l'importanza è utile definire l'angolo d'incidenza "efficace", che si misura ponendo uguale a zero l'angolo che genera una portanza nulla. Come si vede nella figura 8, per piccoli angoli la portanza è direttamente proporzionale all'angolo efficace. Questa relazione vale per ali di qualsiasi forma: l'ala di un 747 come un'ala rovesciata come una mano sporta fuori dal finestrino di un'automobile. Il funzionamento di un'ala rovesciata si spiega ricorrendo all'angolo d'incidenza, cosa che la spiegazione comune della portanza non dice. I piloti regolano l'angolo d'incidenza in funzione della velocità del mezzo e dell'entità del carico. L'angolo d'incidenza influisce sulla portanza più della forma del profilo alare, che invece è importante perché influisce sulle condizioni di stallo e sulla resistenza del mezzo alle alte velocità.

Tipicamente, al di sopra di un angolo critico di circa  $15^\circ$  la portanza decresce. Poiché la forza occorrente per far compiere all'aria una deflessione così pronunciata è più intensa di quella trasmissibile dalla viscosità, l'aria comincia a staccarsi dalla superficie superiore dell'ala e il velivolo va in stallo.

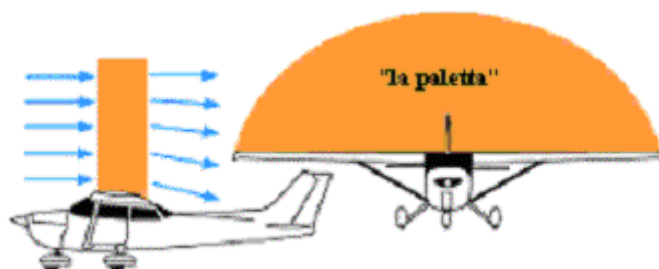
**Fig 8**  
Portanza in funzione  
dell'angolo d'incidenza  
efficace.



## 6. L'ala fa da "paletta"

Introduciamo ora una nuova immagine mentale dell'ala. Siamo abituati a pensarla come una lama sottile che taglia l'aria e genera portanza quasi per magia. Vorremmo che cominciaste a pensarla come una specie di paletta che raccoglie una certa quantità di aria e la devia dalla direzione orizzontale ad una direzione prossima all'angolo d'incidenza, come mostra la figura 9. Per gli aeroplani più comuni si può dire che la paletta spazza un'area di forma circa semiellittica per una profondità che è circa uguale alla larghezza dell'ala. La portanza, che è direttamente proporzionale alla quantità di aria deviata, è dunque anche direttamente proporzionale all'area della superficie alare.

**Fig 9**  
L'ala come paletta.



Quando la velocità dell'aereo cresce, cresce anche la quantità di aria deviata dalla paletta e ciò farebbe aumentare la portanza. Poiché il carico non cambia ciò non è desiderabile: per compensare si riduce la componente verticale della velocità dell'aria riducendo l'angolo d'incidenza. All'aumentare dell'altitudine, invece, la densità dell'aria diminuisce e con essa la massa d'aria deviata. Per compensare, a parità di velocità dell'aereo l'angolo d'incidenza deve aumentare. La spiegazione comune della portanza non aiuta a capire il motivo di queste manovre.

## 7. Produrre portanza richiede potenza

Un aereo che vola trasferisce energia cinetica all'aria che, inizialmente in quiete, viene deviata verso il basso. Questo richiede di compiere un certo lavoro in un tempo adeguato e quindi un'adeguata potenza. La potenza è fornita dai motori del velivolo (o, per gli alianti, dalle termiche e dal campo di gravità).

Quanta potenza occorre per volare? Un proiettile di massa  $m$  sparato alla velocità  $v$  acquista l'energia  $\frac{1}{2}mv^2$ . Mentre la portanza è proporzionale alla massa d'aria deviata moltiplicata per la componente verticale della velocità, l'energia ceduta dall'ala all'aria è proporzionale alla massa d'aria deviata moltiplicata per il quadrato di tale componente. Ne deriva che *la potenza occorrente per tenere su un aeroplano è proporzionale al carico (cioè al suo peso) moltiplicato per la componente verticale della velocità dell'aria deviata*. Poiché quando la velocità dell'aereo raddoppia raddoppia anche la massa d'aria deviata verso il basso, per mantenere invariata la portanza si riduce l'angolo d'incidenza in modo da dimezzarne la componente verticale della velocità. Ne consegue che la potenza occorrente per tener su il velivolo si dimezza. Dunque questa potenza decresce al crescere della velocità: è, infatti, inversamente proporzionale alla velocità dell'aeroplano.

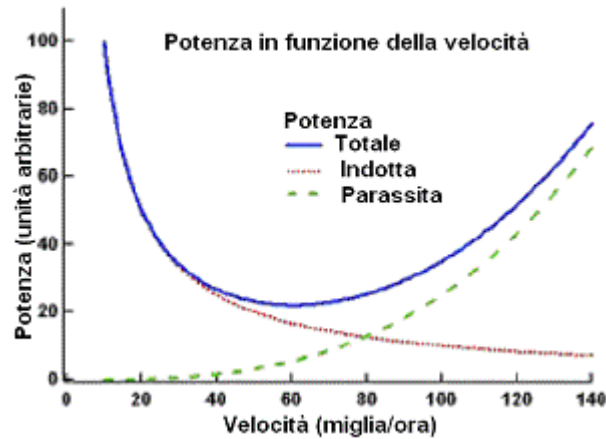
In realtà per volare più in fretta occorre maggiore potenza. La potenza spesa per generare portanza, spesso indicata come “potenza indotta”, non esaurisce il calcolo energetico. Per vincere le resistenze originate dalla necessità di portare con sé ruote, tiranti, antenna ecc. bisogna spendere altra potenza (detta “parassita”): infatti l'aereo trasferisce alle molecole d'aria che incontra sulla sua strada un'energia proporzionale al quadrato della sua velocità. Quanto maggiore la velocità dell'aereo, tanto maggiore il numero di molecole che urta nell'unità di tempo, perciò la potenza occorrente per contrastare la resistenza del mezzo risulta proporzionale al cubo della velocità dell'aeroplano.

Nella figura 10 sono tracciati gli andamenti dei grafici della potenza indotta, della potenza parassita e della somma delle due (potenza totale), da cui appare in modo evidente che la potenza indotta è inversamente proporzionale alla velocità e la potenza parassita è proporzionale al cubo della velocità. A bassa velocità l'energia è soprattutto spesa nella potenza indotta. Quanto più l'aereo è lento tanto minore è la quantità d'aria deviata e tanto maggiore dev'essere l'angolo d'incidenza per aumentare la velocità verticale di quell'aria. I piloti in addestramento si esercitano a volare sul tratto discendente della curva della potenza, un esercizio che serve a capire che per star su a velocità molto basse occorrono molta potenza e un grande angolo d'incidenza.

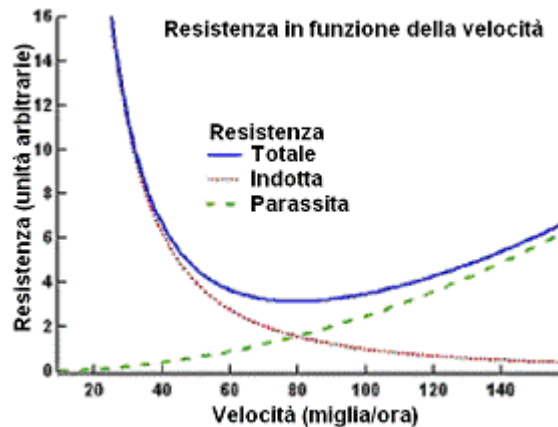
Alla velocità di crociera la richiesta è dominata dalla potenza parassita, che va come il cubo della velocità. Perciò, mentre un aumento della potenza dei motori può migliorare in modo significativo la velocità iniziale di salita, non può contribuire molto ad aumentare la velocità di crociera. Raddoppiando la potenza sviluppata dai motori la velocità di crociera aumenta solo di circa 25%.



**Fig 10**  
Potenza impegnata  
in funzione della  
velocità.



**Fig 11**  
Resistenza  
in funzione della  
velocità.



Ora che sappiamo come variano le richieste di potenza con la velocità possiamo calcolare come varia la resistenza al volo incontrata dall'aereo. L'intensità della forza è infatti uguale al rapporto tra la potenza e la velocità. La figura 11 mostra, in funzione della velocità, le resistenze indotta (inversamente proporzionale al quadrato della velocità), parassita (direttamente proporzionale al quadrato della velocità) e totale. I grafici come questo danno indicazioni sugli accorgimenti da adottare quando si progettano i diversi tipi di velivoli. Nei più lenti, per esempio gli alianti, si deve cercare di minimizzare la potenza indotta, che domina a bassa velocità. L'importanza della potenza parassita cresce negli aerei a elica e diventa dominante in quelli spinti da motori a reazione.

## 8. Il rendimento delle ali

C'è chi ritiene erroneamente che si possa ottenere portanza senza fornire potenza. L'idea deriva dal fatto che tra gli argomenti di studio teorico delle scienze aeronautiche ci sono le sezioni alari ideali. La teoria considera ali di lunghezza infinita: poiché al crescere dell'area dell'ala diminuisce la potenza occorrente per produrre portanza, è chiaro che un'ala infinita potrebbe produrre portanza senza ricevere potenza. Ma se la portanza non richiedesse potenza gli aerei percorrerebbero le stesse distanze indipendentemente dal carico trasportato, le eliche (che sono ali rotanti) non avrebbero bisogno di potenza per produrre spinta e gli elicotteri potrebbero mantenersi in aria a qualsiasi altitudine e con qualsiasi carico. Sfortunatamente viviamo in un mondo reale, in cui portanza e spinta richiedono potenza.

Come abbiamo visto, alla velocità di crociera la resistenza sentita da un'ala di concezione moderna è dovuta soprattutto alle resistenze indotte legate alla portanza. La resistenza parassita sentita dalle ali di un Boeing 747 non è superiore a quella che sarebbe sentita da un cavo di uguale lunghezza spesso poco più di 1 cm. Da quali parametri è determinato il rendimento di un'ala? Poiché la potenza indotta è proporzionale alla velocità verticale dell'aria deviata, l'ala dev'essere progettata

in modo da deviare quanta più aria possibile per poter ridurre tale velocità agendo sull'angolo d'incidenza: per esempio, aumentando la superficie dell'ala crescerebbe la portata della paletta. Dunque, sia pure al costo di un peggioramento della resistenza parassita, l'efficienza dell'ala nel produrre portanza migliora all'aumentare della sua superficie.

Come vedremo brevemente nel paragrafo dedicato all'effetto suolo il sovraccarico sull'ala in volo in linea retta e ad altitudine costante dovuto alla risalita dell'aria in corrispondenza del suo bordo anteriore (upwash) è uguale al peso dell'aereo moltiplicato  $2/AR$  dove  $AR$ , che sta per "aspect ratio" (in italiano "allungamento alare"), è il rapporto tra il quadrato della lunghezza e l'area dell'ala. Ne deriva che tra due ali di ugual area ma diverso  $AR$  quella con il maggior  $AR$  è la più efficiente.

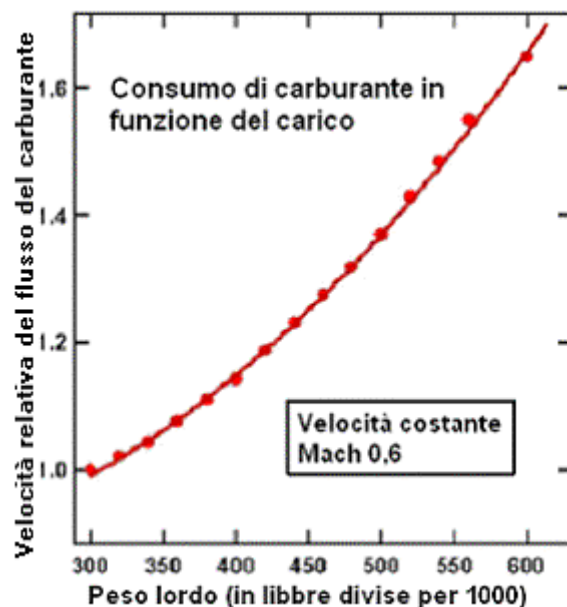
## 9. Potenza e carico sulle ali

Consideriamo ora la relazione che lega la potenza al carico sopportato dalle ali. A pari velocità dell'aereo ogni aumento del carico dev'essere compensato aumentando l'angolo d'incidenza in modo da imprimere all'aria una maggiore velocità verticale. Per esempio quando l'aereo compie una curva a  $2g$  il carico sopportato dalle ali raddoppia: per compensare, deve raddoppiare anche la componente verticale della velocità impressa all'aria. La potenza indotta, che è direttamente proporzionale al carico e a tale velocità, quadruplica! La potenza indotta cresce dunque come il carico al quadrato.

La velocità con cui l'aereo consuma il carburante è un buon indice della potenza totale. La figura 12 è il grafico (ricavato da dati reali) del consumo in funzione del peso per un grosso aereo da trasporto che vola a velocità costante. Poiché la velocità dell'aereo non cambia, i cambiamenti nel consumo riflettono i cambiamenti nella potenza indotta. La curva di best-fit possiede un termine costante che tiene conto delle resistenze passive e un termine di secondo grado proporzionale al quadrato del carico che conferma l'andamento previsto dall'interpretazione newtoniana della relazione tra carico e potenza indotta.

**Fig 12**

Consumo di carburante in funzione del carico per un grosso aereo da trasporto che viaggia a velocità costante. Il consumo ad aereo vuoto è posto uguale a 1.

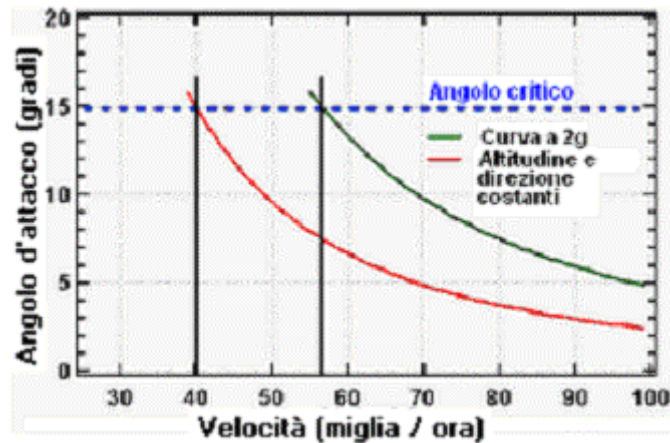


La necessità di aumentare l'angolo d'incidenza al crescere del carico, oltre ad accrescere la potenza occorrente, produce un altro effetto avverso. La figura 13 mostra il valore indipendente dal carico dell'angolo d'incidenza critico, che è quello a cui l'aereo va in stallo perché l'aria non può più mantenersi aderente alla superficie superiore dell'ala, e due diverse situazioni di volo: a carico costante in volo rettilineo e uniforme e a carico raddoppiato durante una curva a  $2g$ .

Mentre l'angolo critico è costante, l'angolo d'incidenza è direttamente proporzionale al carico e la velocità di stallo è proporzionale alla radice quadrata del carico. Ne consegue che aumentando il carico aumenta la velocità di stallo dell'aereo. La figura mostra che in una curva a 2g la velocità di stallo cresce di circa il 40%. Per curvare ad altitudini più elevate bisogna maggiormente aumentare l'angolo d'incidenza. I piloti si preparano all'eventualità esercitandosi in "stalli accelerati", dimostrando che un aereo può entrare in stallo a qualsiasi velocità perché esiste una velocità di stallo per ogni carico.

**Fig 13**

Angolo d'incidenza in funzione della velocità per volo a velocità e altitudine costanti e per una curva a 2g.



## 10. Vorticosità alle ali

Il flusso d'aria in discesa che esce dall'ala è simile a una lamina la cui forma dettagliata dipende da com'è distribuito il carico lungo l'ala. Nella figura 14 questa distribuzione è rivelata dal vapore condensatosi durante una manovra ad alto valore di g. Essa è tutt'altro che uniforme, mostrando che le masse d'aria coinvolte differiscono nelle diverse zone dell'ala. Nei pressi dell'attacco alla carlinga le ali spostano masse d'aria molto maggiori che agli estremi. L'effetto finale dello sbilancio è che presso la carlinga l'aria si avvolge su se stessa (il motivo - il cambiamento di velocità - è analogo a quello che fa incurvare il flusso d'aria quando sormonta la faccia superiore dell'ala). Questo è il vortice alare, avvolto tanto più stretto quanto più rapidamente varia la portanza lungo l'ala. Il piccolo tratto del vortice alare che si sviluppa in corrispondenza della punta dell'ala, che è quello più facilmente osservabile, è molto stretto perché oltre la punta la portanza si azzera. I vortici alari nel flusso in discesa e presso la punta dell'ala sono chiaramente individuabili nella figura 5.

**Fig 14**

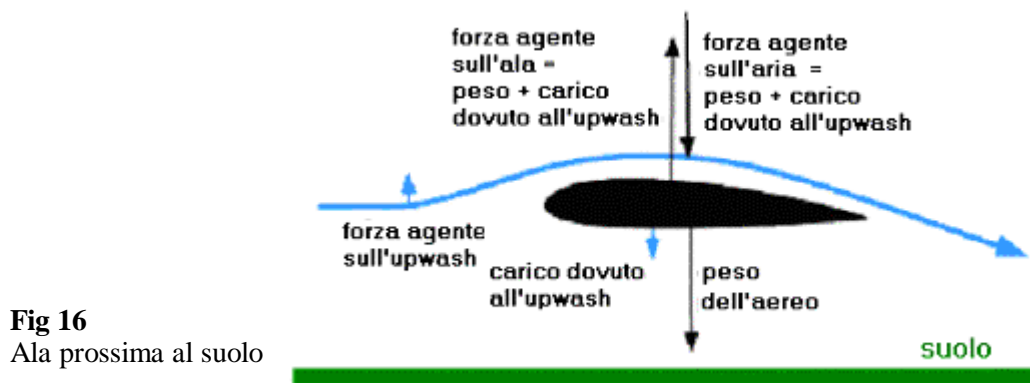
La condensazione rivela la distribuzione della portanza lungo un'ala (da "Patterns in the Sky", J.F. Campbell e J.R. Chambers, NASA SP-514.)



Per migliorare l'efficienza delle ali si possono applicare alette verticali alle punte delle ali. Le alette migliorano l'efficienza delle ali perché, bloccando la comunicazione tra le facce superiore e inferiore dell'ala, ne aumentano la lunghezza efficace, che è come aumentarne l'area efficace. Tuttavia progettare le alette è una faccenda delicata e un'aletta mal progettata produce più danno che beneficio.

## 11. Effetto suolo

L'effetto suolo, consistente nell'accresciuto rendimento alare che si verifica quando la distanza dal terreno è uguale o inferiore alla lunghezza dell'ala, è un altro fenomeno noto e mal compreso. In fase di atterraggio la forza agente sugli aerei con ala bassa può ridursi fino a dimezzarsi. Questo fenomeno viene anche sfruttato, per esempio, dai grandi uccelli marini che spesso volano molto vicini alla superficie dell'acqua e dai piloti che partono da campi erbosi. Molti piloti pensano che l'effetto sia dovuto ad una compressione dell'aria tra le ali e il suolo.



Per comprendere l'origine dell'effetto suolo, la figura 15 riprende in esame la risalita dell'aria al bordo anteriore dell'ala per un aereo in volo normale. L'aria devia verso l'alto e per la prima e terza legge della dinamica l'ala è soggetta ad una forza diretta verso il basso. Il carico sull'ala cresce, l'angolo d'incidenza dev'essere adeguatamente adattato e la potenza indotta aumenta. Man mano che l'aereo si avvicina al suolo la circolazione dell'aria sotto l'ala risulta viepiù ostacolata fino a cessare del tutto. Come mostra la figura 16, questo fa diminuire la portata del flusso d'aria che risale: il carico sull'ala si riduce, si deve agire sull'angolo d'incidenza riducendolo e la potenza indotta diminuisce. Il rendimento dell'ala aumenta.

Come anticipato nel paragrafo 8, il carico addizionale generato dalla risalita dell'aria è uguale al due volte il peso del velivolo fratto l'allungamento alare  $AR$ . Per la maggioranza dei piccoli aeroplani l'allungamento alare è compreso tra 7 e 8. Ne deriva che in vicinanza del suolo il carico sulle ali di un piccolo aeroplano può ridursi fino al 20% rispetto al carico in volo. La potenza indotta, che è proporzionale al quadrato del carico, si riduce notevolmente. Nel paragrafo 3 abbiamo stimato che un Cessna 172 che vola alla velocità di 220 km/h deve deviare più di 4 tonnellate d'aria al secondo per produrre la portanza necessaria, ma trascuravamo la deportanza causata dalla risalita dell'aria in corrispondenza del bordo anteriore dell'ala. Per compensare tale deportanza la massa dell'aria deviata deve aumentare e potrebbe avvicinarsi a 5 tonnellate al secondo.

## Conclusioni

Riassumiamo qui di seguito ciò che abbiamo imparato e come la descrizione fisica del volo aiuta a capirne gli aspetti essenziali.

Abbiamo imparato che:

- La *massa d'aria* deviata dalle ali è proporzionale alla velocità dell'ala e alla densità dell'aria.
- La *componente verticale* della velocità dell'ala deviata è proporzionale alla velocità dell'ala e all'ampiezza dell'angolo d'incidenza.
- La *portanza* è proporzionale alla massa dell'aria deviata moltiplicata per la componente verticale della velocità di tale aria.
- La *potenza* occorrente per produrre portanza è proporzionale alla portanza moltiplicata per la componente verticale della velocità dell'aria deviata.

Vediamo ora come s'interpretano alcune possibili situazioni mettendosi dai punti di vista della descrizione fisica e della descrizione comune del volo.

- L'aeroplano rallenta. La descrizione fisica dice che, poiché la massa d'aria deviata diminuisce, per compensare bisogna aumentare l'angolo d'incidenza e anche la potenza. La descrizione comune non riesce a spiegare perché si deve fare questo.
- Il carico sulle ali aumenta. La descrizione fisica dice che la massa d'aria deviata non cambia per cui l'angolo d'incidenza deve aumentare. Allora anche la potenza aumenta. I motivi di queste azioni non si possono spiegare con la descrizione comune del volo.
- Un aereo vola rovesciato. Nessun problema con la descrizione fisica perché basta adattare l'angolo d'incidenza. La descrizione comune implica l'impossibilità del volo rovesciato.

È dunque evidente che la spiegazione popolare, polarizzata sul profilo delle ali, può sembrare soddisfacente ma non fornisce gli strumenti che aiutano a capire veramente perché si può volare. La descrizione fisica è facile da capire ed è molto più potente.

**Il materiale descritto in questo articolo è tratto dal testo: David Anderson, Scott Eberhardt, "Understanding Flight", McGraw-Hill, 2001, ISBN: 0-07-136377-7**