

Come volano gli aeroplani¹⁾

Introduzione²⁾

Wilbur e Orville Wright, con una serie di voli il 17 dicembre 1903, furono i primi uomini a pilotare un aeroplano a motore. Come si sa bene, essi stessi avevano progettato e costruito l'apparecchio.³⁾

Nel dicembre del 2003, per commemorare il centenario del primo volo dei fratelli Wright, il New York Times pubblicò un articolo intitolato "Rimanere in volo: cosa li tiene lassù?". Il punto dell'articolo era una semplice domanda: cosa mantiene gli aerei in aria? Per rispondere, il Times si rivolse a **John D. Anderson Jr.**, curatore di aerodinamica presso il National Air and Space Museum e autore di diversi manuali in materia.

Anderson ha però affermato che in realtà non c'è accordo su cosa generi la forza aerodinamica nota come **portanza**. "Non esiste una risposta semplice e univoca a questa domanda", ha dichiarato al Times. Le persone danno risposte diverse, alcune con "fervore religioso". A più di 15 anni da quella dichiarazione, esistono ancora diverse teorie su cosa generi la portanza, ognuna con un nutrito gruppo di zelanti sostenitori. A questo punto della storia del volo, questa situazione è alquanto sconcertante. Dopotutto, i processi naturali dell'evoluzione, agendo in modo casuale, senza una comprensione della fisica, hanno risolto il problema meccanico della portanza aerodinamica per gli uccelli in volo millenni fa. Perché dovrebbe essere così difficile per gli scienziati spiegare cosa mantenga gli uccelli e gli aerei di linea in aria?

Ad aumentare la confusione c'è il fatto che le teorie sulla portanza esistono su due livelli di astrazione distinti: quello tecnico e quello non tecnico. Sono complementari piuttosto che contraddittorie, ma differiscono nei loro obiettivi. Una esiste come teoria strettamente matematica, un regno in cui il mezzo di analisi è costituito da equazioni, simboli, simulazioni al computer e numeri. C'è poco o nessun disaccordo serio su quali siano le equazioni appropriate o le loro soluzioni. L'obiettivo della teoria matematica tecnica è quello di fare previsioni accurate e di proiettare risultati che siano utili agli ingegneri aeronautici impegnati nel complesso compito della progettazione di aeromobili. Ma di per sé, le equazioni non sono spiegazioni, e nemmeno le loro soluzioni. Esiste un secondo livello di analisi, non tecnico, che ha lo scopo di fornirci una spiegazione fisica e di buon senso della portanza. L'obiettivo dell'approccio non tecnico è quello di darci una comprensione intuitiva delle forze e dei fattori reali che sono all'opera per mantenere un aereo in volo. Questo approccio non esiste a livello di numeri e di equazioni ma piuttosto a livello di concetti e principi che sono familiari e comprensibili ai non specialisti.

È su questo secondo livello, non tecnico, che risiedono le controversie. Due diverse teorie vengono comunemente proposte per spiegare la portanza, e i sostenitori di entrambe

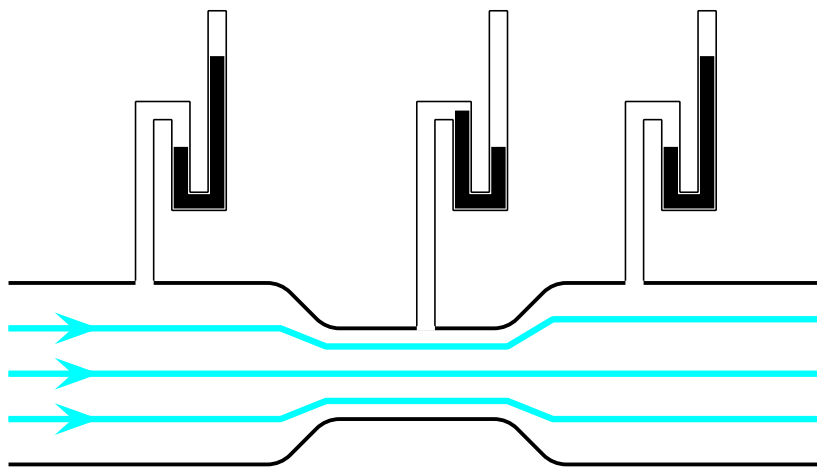
¹⁾ Doug McLean: Understanding Aerodynamics - Wiley, 2012, pagine 286÷302.

²⁾ Scientific American, February 2020, pag.46., Le Scienze, Aprile 2020, n.620, pag.66, Ed Regis: L'enigma della portanza.

³⁾ F. E. C. Culick: Le origini del primo aeroplano a motore pilotato - Le Scienze, Settembre 1979, n.133, pag.54.

le parti difendono i propri punti di vista in articoli, libri e online. Il problema è che ciascuna di queste due teorie non tecniche è corretta di per sé. Ma nessuna delle due fornisce una spiegazione completa della portanza, una che offra una descrizione esaustiva di tutte le forze, i fattori e le condizioni fisiche fondamentali che governano la portanza aerodinamica, senza lasciare questioni in sospeso, inspiegate o sconosciute. Una teoria del genere esiste davvero?

Né Bernoulli (Daniel Bernoulli: Groningen, Olanda, 8 febbraio 1700 - Basilea, 17 marzo 1782), né Newton (Sir Isaac Newton: Woolsthorpe-by-Colsterworth, 25 dicembre 1642 - Londra, 20 marzo 1726) cercavano consapevolmente di spiegare cosa sostenesse gli aerei, ovviamente, perchè vissero molto prima dell'effettivo sviluppo del volo meccanico. Le loro rispettive leggi e teorie furono semplicemente riutilizzate una volta che i fratelli Wright volarono, rendendo la comprensione della portanza aerodinamica un compito serio e urgente per gli scienziati. La maggior parte di queste teorie proveniva dall'Europa. Nei primi anni del XX secolo, diversi scienziati britannici proposero delle teorie tecniche e matematiche sulla portanza che trattavano l'aria come un fluido perfetto, ovvero incompressibile e con viscosità pari a zero. Queste erano ipotesi irrealistiche, ma forse comprensibili per gli scienziati che si trovavano di fronte al nuovo fenomeno del volo meccanico controllato e motorizzato. Queste ipotesi rendevano anche la matematica sottostante più semplice e diretta di quanto non fosse in realtà. Altrimenti sarebbe stato così, ma quella semplicità ebbe un prezzo: per quanto accurate fossero le descrizioni dei profili alari che si muovono in gas ideali dal punto di vista matematico, esse rimanevano empiricamente imperfette. **In Germania, uno degli scienziati che si dedicò al problema della portanza fu nientemeno che Albert Einstein.** Nel 1916 Einstein pubblicò un breve articolo sulla rivista *Die Naturwissenschaften* intitolato "Teoria elementare delle onde d'acqua e del volo", che cercava di spiegare cosa giustificasse la capacità di carico delle ali degli aerei e degli uccelli in volo. "C'è molta oscurità intorno a queste questioni", scrisse Einstein. "A dire il vero, devo confessare di non aver mai trovato una risposta semplice, nemmeno nella letteratura specialistica". Einstein procedette quindi a fornire una spiegazione che presupponeva un fluido incompressibile e privo di attrito, ovvero un fluido ideale. Senza menzionare Bernoulli per nome, ha fornito un resoconto coerente con il principio di Bernoulli affermando che la pressione dei fluidi è grande dove la sua velocità è più bassa, e viceversa.



Equazione di Bernoulli

$$p_1 + \frac{\rho}{2}v_1^2 = p_2 + \frac{\rho}{2}v_2^2 = costante$$

essendo ρ la densità del fluido, p la pressione e v la velocità.⁴⁾

Per sfruttare queste differenze di pressione, Einstein propose un profilo alare con una protuberanza sulla parte superiore, in modo che la forma aumentasse la velocità del flusso d'aria sopra la protuberanza e quindi diminuisse anche la pressione in quel punto. Probabilmente Einstein pensava che la sua analisi dei fluidi ideali si sarebbe applicata altrettanto bene ai flussi di fluidi reali. Nel 1917, sulla base della sua teoria, Einstein progettò un profilo alare che in seguito divenne noto come **ala a dorso di gatto**, per la sua somiglianza con la gobba di un gatto che si stiraccia. Presentò il progetto al costruttore aeronautico LVG (Luftverkehrsgesellschaft) di Berlino, che costruì un nuovo velivolo attorno ad esso. Un pilota collaudatore riferì che il velivolo si muoveva goffamente in aria come "un'anatra incinta". Molto più tardi, nel 1954, lo stesso Einstein definì la sua incursione nell'aeronautica una "follia giovanile". L'individuo che ci ha fornito teorie radicalmente nuove, che penetravano sia le componenti più piccole che quelle più grandi dell'universo, non è tuttavia riuscito a dare un contributo positivo alla comprensione della portanza o a ideare un profilo alare pratico.

⁴⁾ Klaus Weltner: A comparison of explanations lifting force - American Journal of Physics, 55 (1), January 1987, pag.50.

13.1 - Una spiegazione di base del profilo alare, accessibile a un pubblico non tecnico.

Quando una superficie portante piana e relativamente sottile - come un'ala, la vela di una barca a vela o la pinna di uno squalo - si muove nell'aria o nell'acqua, può generare una forza perpendicolare alla direzione del moto. Tale forza è denominata portanza, in inglese *lift*, indipendentemente dal fatto che sia diretta verso l'alto.

Le teorie matematiche della portanza sono condivise dagli esperti fin dai primi anni del Novecento, ma esiste una lunga storia di disaccordi su come spiegarla in termini fisici semplici, senza ricorrere alla matematica. Nel corso degli ultimi cento anni circa, sono apparse molte spiegazioni non matematiche diverse, nei libri, riviste divulgative, materiali per l'addestramento dei piloti, esposizioni museali e così via. Tali spiegazioni adottano approcci diversi, ma in genere tentano di semplificare eccessivamente il concetto di portanza, fornendo informazioni insufficienti sul flusso e lasciando inspiegati aspetti importanti del fenomeno. Esamineremo i comuni esempi riportati di seguito nella sezione "In che modo le principali spiegazioni diffuse risultano incomplete". E alcune spiegazioni ricorrono ad argomentazioni errate per spiegare le caratteristiche del flusso. Di seguito vengono trattati alla voce "Comuni idee errate". Naturalmente, l'esistenza di numerose spiegazioni diverse è stata fonte di confusione e controversie.

Quella che segue è una spiegazione non matematica della portanza che tenta di risolvere le controversie; per risultare scientificamente completa e corretta, è necessariamente più complessa e articolata rispetto alle precedenti spiegazioni divulgative.

13.2 - Forma del profilo alare e angolo di incidenza

La forma della sezione trasversale di una superficie portante, come illustrato nella figura 13.2-1, è denominata **Profilo alare**. **La quantità di portanza generata da una superficie portante dipende dalla forma del profilo alare, dall'angolo di incidenza con cui esso incontra il flusso incidente, nonché dalla velocità e dalla densità del flusso. Un angolo di attacco positivo significa che il bordo d'attacco (anteriore) del profilo alare è posizionato più in alto rispetto al bordo d'uscita (posteriore) rispetto alla direzione del flusso incidente, come mostrato nella figura 13.2-1.**

Quasi qualsiasi forma, purchè non eccessivamente spessa, può fungere da profilo alare e generare portanza quando l'angolo di incidenza rientra nell'intervallo corretto. **Le principali tipologie di forme di profilo alare sono illustrate nella figura 13.2-2.** Una semplice forma a lamina piana (a) viene utilizzata in molti alianti giocattolo. I fratelli Wright adottarono un profilo alare a lamina curva (b) per le ali dei loro primi aeroplani, poichè scoprirono che aggiungere curvatura - o la bombatura - aumentava la portanza. Un aliante giocattolo volerà anche molto meglio con un profilo alare a lastra curva rispetto a uno a lastra piana. Anche le vele delle barche a vela assumono generalmente la forma di una lamina curva. Infine, i grandi aeromodelli e gli aerei a grandezza naturale utilizzano profili alari aerodinamici, arrotondati sul bordo d'attacco e affilati sul bordo d'uscita, (c) e (d). Gli aerei acrobatici utilizzano spesso il profilo simmetrico (e), che

funziona altrettanto bene sia in volo normale che rovescio, mentre la maggior parte degli altri aerei impiega profili aerodinamici dotati di curvatura (d). I profili alari aerodinamici, in particolare quelli dotati di curvatura (camber), possono generare maggiore portanza con minore resistenza rispetto ad altre forme e consentono a un aereo di volare in un più ampio intervallo di velocità. Le ali degli uccelli tendono a presentare una combinazione di forme a lamina curva e forme aerodinamiche (e).

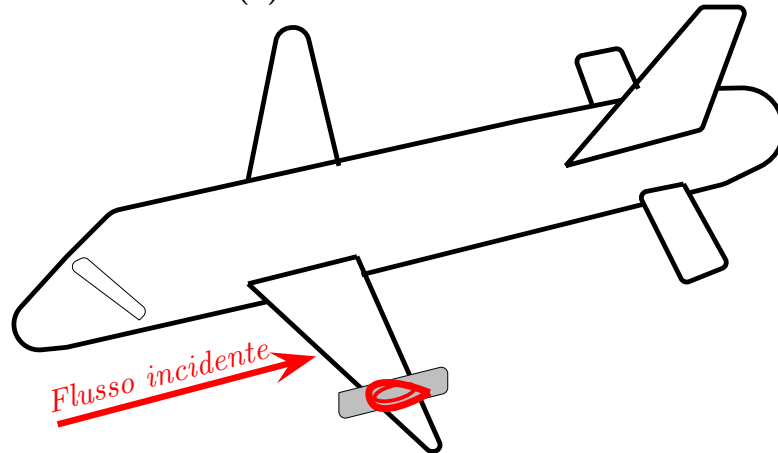


Fig.13.2-1: La forma della sezione trasversale di un'ala è detta profilo alare, mentre l'angolo con cui il flusso d'aria incidente la investe è chiamato angolo di attacco.

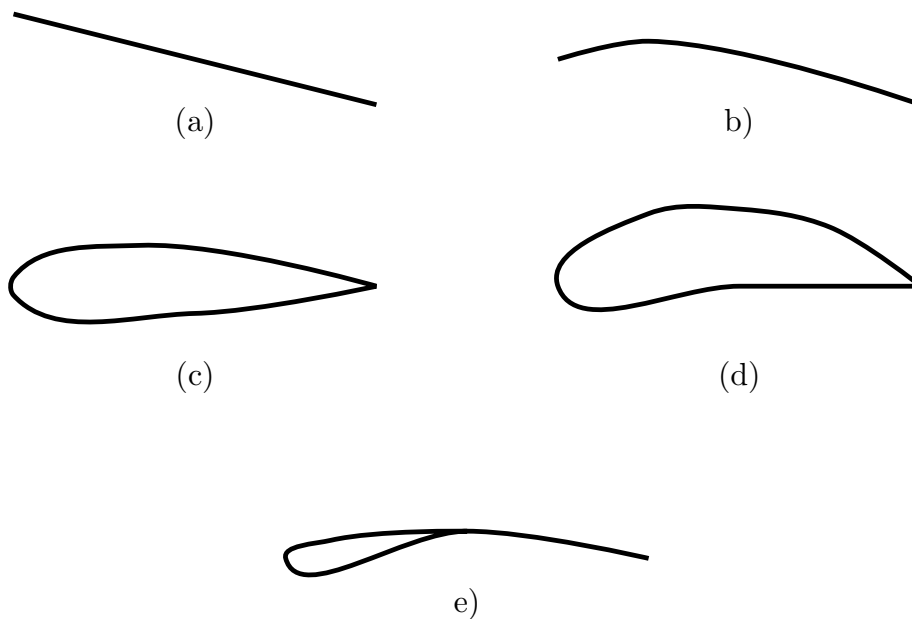


Fig.13.2-2: Tipologie di forme di profili alari. (a) Piastra piana, (b) Piastra curva (profilo incurvato), (c) Profilo aerodinamico simmetrico, (d) Profilo aerodinamico incurvato, (e) Ala di uccello.

13.3 - Il sistema di riferimento del profilo alare

Il fenomeno della generazione della portanza è lo stesso, indipendentemente dal sistema di riferimento adottato per osservarlo. Potremmo osservare il profilo alare muoversi nell'aria, ma tutto risulta più semplice da comprendere se immaginiamo di muoverci insieme ad esso: in tal modo, il profilo ci appare fermo, mentre il fluido sembra scorrervi attorno. Per semplicità, faremo riferimento alle superfici "superiore" e "inferiore" del profilo alare, assumendo che l'ala sia disposta orizzontalmente e generi portanza verso l'alto.

13.4 - La portanza coinvolge azione e reazione (terzo principio della dinamica di Newton)

Un modo intuitivo per comprendere come si generi la portanza consiste nel considerare la forma del profilo alare e l'angolo di incidenza come elementi che agiscono in sinergia, spingendo il fluido verso il basso mentre questo scorre attorno al profilo stesso. Il fluido deve quindi esercitare una forza di reazione uguale e contraria (diretta verso l'alto), che costituisce la portanza. Questo è un esempio del terzo principio di Newton, secondo cui a ogni azione corrisponde una reazione uguale e contraria. Pertanto, la portanza è un'interazione in cui il profilo alare e il fluido si scambiano forze uguali e contrarie. Gli aspetti dell'interazione che richiedono ulteriori spiegazioni riguardano il modo in cui il fluido in movimento esercita concretamente la spinta di reazione.

13.5 - La portanza si manifesta come una differenza di pressione sulle superfici del profilo alare

Un fluido esercita sempre una pressione, il che significa semplicemente che spinge sempre contro se stesso e contro qualsiasi superficie con cui entra in contatto. Quando il fluido attorno a un profilo alare è in quiete, la pressione è praticamente uniforme ovunque, di conseguenza, la spinta esercitata verso l'alto sulla superficie inferiore e quella verso il basso sulla superficie superiore si equivalgono, e non si genera alcuna portanza. **Quando il fluido è in movimento e si genera portanza, il fluido esercita la forza di portanza direttamente sulle superfici del profilo alare sotto forma di differenza di pressione: la pressione sulla superficie inferiore è maggiore di quella sulla superficie superiore.** In condizioni di portanza, la pressione media sulla superficie inferiore è solitamente superiore a quella ambiente, a meno che il profilo alare non sia molto spesso, mentre la pressione media sulla superficie superiore è sempre inferiore a quella ambiente.

Quanto è grande, in genere, questa differenza di pressione? Nell'atmosfera al livello del mare, la pressione ambiente è di circa 2100 libbre per piede quadrato ($976,486 \text{ Kg/m}^2$). Rispetto a questo, non serve una grande differenza di pressione per generare una quantità di portanza significativa. Persino l'aereo più pesante non richiede più di circa 150 libbre di portanza per piede quadrato di superficie alare ($732,364 \text{ Kg/m}^2$). Pertanto, la differenza di pressione che un profilo alare deve generare per sostenere un aereo è molto inferiore alla pressione atmosferica di base; inoltre, anche quando l'ala genera portanza, la pressione sulla superficie superiore spinge verso il basso con un'intensità quasi pari in termini assoluti a quella con cui la pressione sulla superficie inferiore spinge verso l'alto. È la differenza a contare, e anche una differenza di pressione relativamente piccola, distribuita su un'area

sufficientemente ampia, può avere un effetto significativo su un Boeing 747.

13.6 - La portanza implica forza e accelerazione (seconda legge di Newton)

Spiegare come il flusso mantenga la differenza di pressione sopra descritta richiede di esaminare le forze esercitate sull'aria e le conseguenti accelerazioni della stessa, non solo sulla superficie del profilo alare, ma in un'ampia regione circostante il profilo. Nella spiegazione che segue, individuiamo innanzitutto le caratteristiche principali del flusso essenziali per mantenere la differenza di pressione e successivamente esaminiamo in che modo l'insieme soddisfi tali requisiti della seconda legge di Newton.

Lo schema della spiegazione è il seguente:

- **Il fluido scorre come se fosse un materiale continuo che si deforma per seguire i profili dell'ala.**
- **Il profilo alare influenza la direzione e la velocità del flusso in un'ampia zona al di sopra e al di sotto del profilo stesso, in quella che viene definita campo di velocità. Il flusso, sia sopra che sotto il profilo, viene deviato verso il basso. Il flusso al di sopra del profilo accelera sempre, mentre quello al di sotto solitamente rallenta.**
- **Il profilo alare influenza la pressione su un'ampia zona, in quella che viene definita campo di pressione. Quando viene generata portanza, si forma sempre una nube diffusa di bassa pressione al di sopra del profilo alare, mentre al di sotto si forma solitamente una nube diffusa di alta pressione. Quando queste nubi sono a contatto con il profilo alare, danno origine alla differenza di pressione che esercita la portanza sul profilo stesso.**
- **Il campo di velocità e il campo di pressione si sostengono a vicenda in una relazione reciproca di causa-effetto, un'interazione conforme alla seconda legge del moto di Newton.**

Esaminiamo più nel dettaglio ciascuna parte.

13.7 - Il fluido scorre come se fosse un materiale continuo che si deforma per seguire i profili dell'ala

I fluidi, come l'aria e l'acqua, sono costituiti da un numero enorme di singole molecole che si muovono in modo casuale in tutte le direzioni, anche quando il fluido appare in quiete. Nell'acqua, le molecole sono costantemente a contatto con quelle vicine mentre si muovono. Nell'aria, le molecole non sono in contatto costante, ma si urtano frequentemente e percorrono distanze brevissime tra una collisione e l'altra. Se non avessero questo moto casuale e non interagissero tra loro, si dirigerebbero direttamente verso le parti del profilo alare rivolte in avanti, senza toccare quelle rivolte all'indietro, come mostrato nella figura 13.7-1.

Al contrario, a causa del moto casuale e dei frequenti contatti tra le molecole, il fluido scorre come se fosse un mezzo continuo. Esso si deforma e varia la propria traiettoria per aggirare il profilo alare, riempiendo tutto lo spazio circostante e venendo a contatto con tutte le sue superfici, come illustrato nella figura 13.7-2.

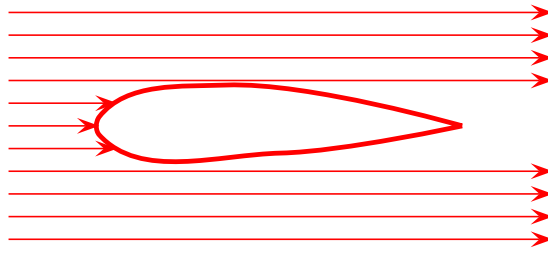


Fig.13.7-1: *Se le molecole non avessero alcun moto casuale e non interagissero mai tra loro, colpirebbero direttamente le parti del profilo alare rivolte in avanti, senza toccare quelle rivolte all'indietro.*

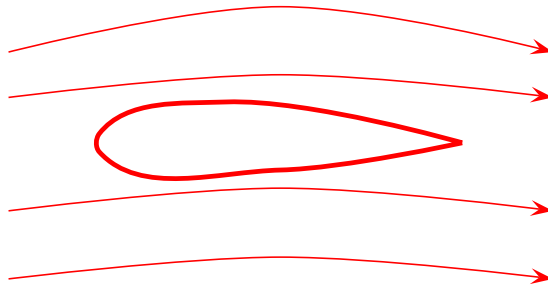


Fig.13.7-2: *A causa del moto casuale e delle numerose collisioni tra le sue molecole, un fluido scorre effettivamente come un mezzo continuo, deformandosi e variando la propria traiettoria per aggirare il profilo alare, in quella che viene definita configurazione di flusso.*

13.8 - Il profilo alare influenza la direzione e la velocità del flusso in un'ampia zona al di sopra e al di sotto del profilo stesso, all'interno di quello che viene definito campo di velocità. Il flusso situato sopra e sotto il profilo viene deviato verso il basso; il flusso sovrastante accelera sempre, mentre quello sottostante solitamente rallenta.

Poichè il fluido si deforma continuamente mentre scorre, i cambi di direzione avvengono gradualmente e la velocità e la direzione del flusso variano in un'ampia zona attorno al profilo alare. Una tale configurazione diffusa di variazioni viene spesso definita campo di moto o campo di velocità.

La superficie solida del profilo alare costringe il flusso che scorre a stretto contatto con essa a seguire l'andamento del profilo stesso; di conseguenza, la velocità e la direzione del flusso risultano influenzate su un'ampia zona. Il flusso viene così condizionato sia dalla forma del profilo alare sia dall'angolo di incidenza.

Quando un profilo alare genera portanza, devia il flusso del fluido verso il basso, come indicato dalle linee di corrente che si inclinano verso il basso e a destra nella figura 13.7-2 e dalle frecce rivolte verso il basso nella figura 13.8-1. Per produrre tale deviazione verso il basso, la parte posteriore delle superfici del profilo alare deve presentare un'inclinazione prevalentemente rivolta verso il basso. Pertanto, per generare portanza, il profilo alare deve presentare una curvatura o un angolo di incidenza positivo, oppure una combinazione dei due.

Appare evidente che i profili alari inclinati verso il basso debbano costringere il flusso a deviare verso il basso in prossimità della superficie; tuttavia, è importante comprendere che non è solo il flusso vicino alla superficie a subire tale effetto, bensì che la deviazione verso il basso interessa un ampio strato di fluido sia al di sopra che al di sotto del profilo alare. L'entità di tale deviazione è massima in prossimità del profilo e si attenua gradualmente man mano che ci si allontana verso l'alto e verso il basso.

Oltre alla deviazione verso il basso, il flusso al di sopra della superficie superiore subisce sempre un'accelerazione, come indicato dalla freccia inferiore sopra il profilo alare nella figura 13.8-1, mentre il flusso al di sotto del profilo viene solitamente rallentato, come indicato dalla freccia più corta. Analogamente alla deviazione verso il basso descritta in precedenza, anche questo effetto è più marcato in prossimità delle superfici del profilo e si attenua gradualmente allontanandosi verso l'alto e verso il basso.

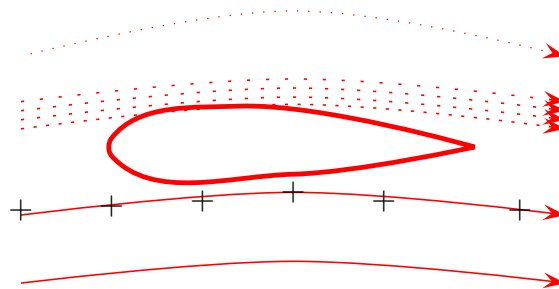


Fig.13.8-1: *Illustrazione del campo di pressione e del campo di velocità attorno a un profilo alare che genera portanza. I segni meno indicano una pressione inferiore a quella ambiente, mentre i segni più indicano una pressione superiore a quella ambiente. Più ravvicinati sono i simboli, maggiore è la differenza di pressione.*

13.9 - Il profilo alare influenza la pressione su un'ampia zona, creando quello che viene definito campo di pressione. Quando si genera portanza, si forma sempre una zona diffusa di bassa pressione al di sopra del profilo alare, mentre al di sotto si crea solitamente una zona diffusa di alta pressione; il contatto di queste zone con il profilo alare determina la differenza di pressione che esercita la portanza sul profilo stesso.

Poichè il fluido si muove come se fosse un mezzo continuo, il profilo alare interagisce con una massa di fluido ben più ampia di quella a diretto contatto con le sue superfici, generando variazioni di pressione su un'area estesa. Quando un profilo alare genera portanza, si forma sempre una zona diffusa di bassa pressione al di sopra del profilo e, solitamente, una zona diffusa di alta pressione al di sotto, come illustrato dagli insiemi di segni meno e più nella figura 13.8-1. Si noti che i segni meno non indicano una pressione negativa, bensì una pressione inferiore a quella ambiente. Tali differenze di pressione sono generalmente più marcate sulla superficie del profilo alare, dove effettivamente generano la forza di portanza, mentre si attenuano gradualmente allontanandosi dal profilo in tutte le direzioni (sopra e dietro di esso). Una configurazione estesa di differenze di pressione di questo tipo viene spesso definita "campo di pressione".

Distribuzione della pressione in pascal lungo la superficie di un profilo alare. **Risultati sperimentali.** Profondità del profilo alare 13 cm. Velocità del flusso d'aria 7 m/s.¹⁾

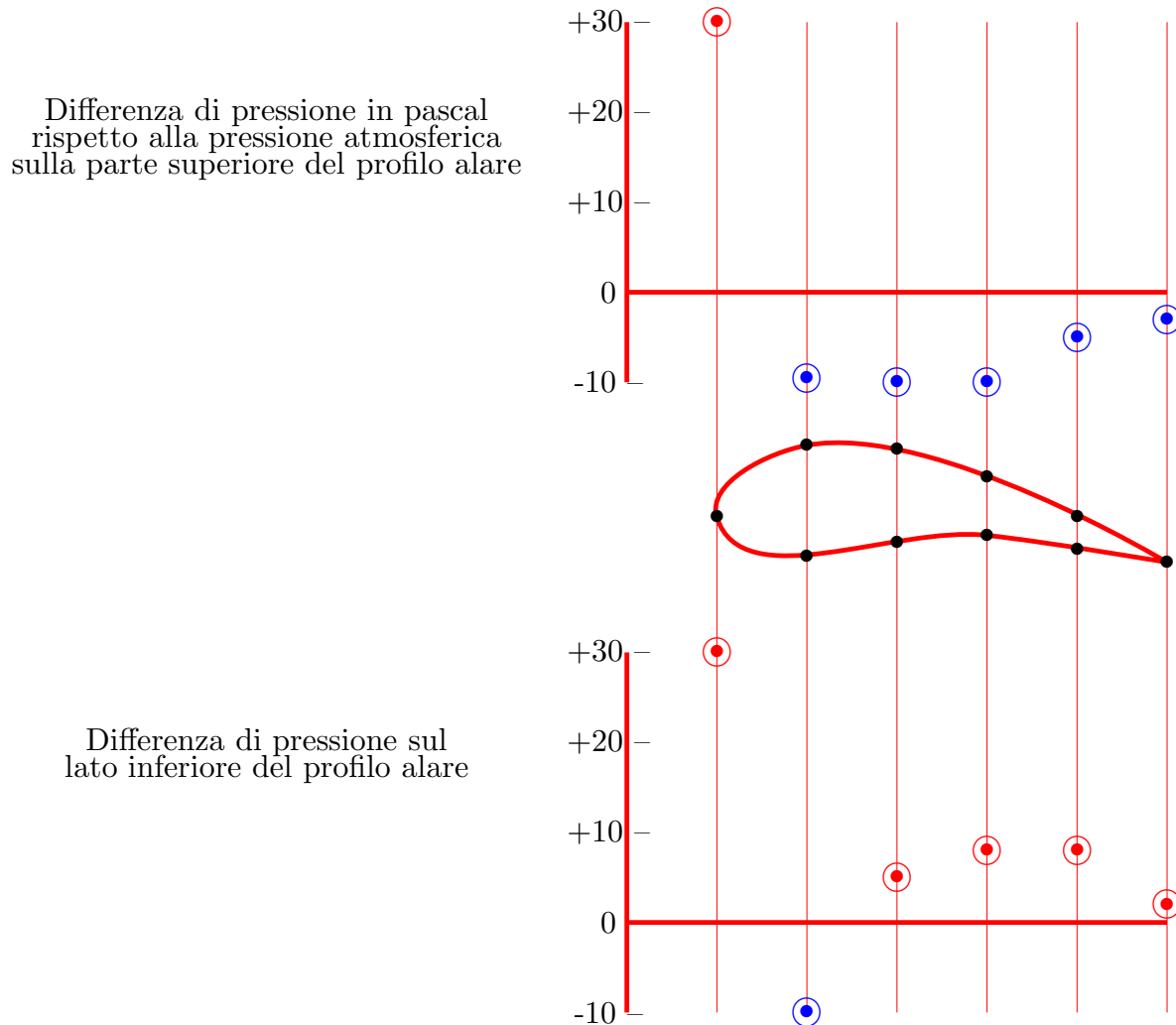


fig.13.9-1

13.10 - Il campo di velocità e il campo di pressione si sostengono a vicenda in una relazione reciproca di causa-effetto, un'interazione conforme alla seconda legge del moto di Newton.

La deviazione del flusso verso il basso, le variazioni della velocità del flusso e le zone di bassa e alta pressione sopra descritte sono tutte necessarie per la generazione della

¹⁾ Klaus Weltner: A comparison of explanations lifting force - American Journal of Physics, 55 (1), January 1987, pag.51.

portanza. Si sostengono a vicenda in un rapporto di causa-effetto reciproco e nessuno di essi esisterebbe senza gli altri. Le differenze di pressione esercitano la forza di portanza sul profilo alare, mentre la deviazione del flusso verso il basso e le variazioni della velocità del flusso mantengono tali differenze di pressione.

Sebbene le nubi di flusso e di alta pressione rappresentate nella figura 13.8-1 non presentino confini nettamente definiti, esse risultano comunque efficacemente "confinare" in un'area limitata, sia in senso verticale che orizzontale. "Sostenere" le differenze di pressione significa essenzialmente mantenere il "confinamento" spaziale sia in direzione verticale che in quella orizzontale. Non si può dire che una direzione sia più importante dell'altra. Entrambe sono essenziali.

Per comprendere come funzioni questo "confinamento" delle differenze di pressione, iniziamo immaginando che il flusso sia suddiviso in due "porzioni" di fluido che attraversano la regione circostante il profilo alare. L'interazione che coinvolge tali porzioni riflette la seconda legge della dinamica di Newton, una relazione generale tra massa, forza e moto. Ciascuna porzione è soggetta alla seconda legge di Newton poichè il fluido in essa contenuto possiede una massa e poichè le porzioni adiacenti possono esercitare su di essa una forza risultante, in virtù delle differenze di pressione. Quando la pressione su un lato di una porzione d'aria è maggiore rispetto all'altro, le forze che spingono la porzione in direzioni opposte non si equilibrano e si genera una forza risultante che la spinge dalla zona a pressione più alta verso quella a pressione più bassa. Esempi di ciò sono illustrati nella figura 13.10-1.

Le forze risultanti agenti sulle particelle di fluido possono derivare anche dall'attrito interno dovuto alla viscosità del fluido stesso. Tuttavia, quando il flusso attorno a un profilo alare aderisce a entrambe le superfici fino al bordo d'uscita - come solitamente accade - la viscosità ha un'influenza trascurabile sulla configurazione complessiva del flusso; pertanto, ai fini della comprensione della portanza, è sufficiente considerare le forze dovute alle differenze di pressione.

La seconda legge di Newton ci dice che quando una differenza di pressione impone una forza netta su una particella di fluido, deve causare un cambiamento nella velocità o nella direzione di entrambe le particelle. Ma nei flussi di fluidi, questa relazione causa-effetto è una strada a senso unico.

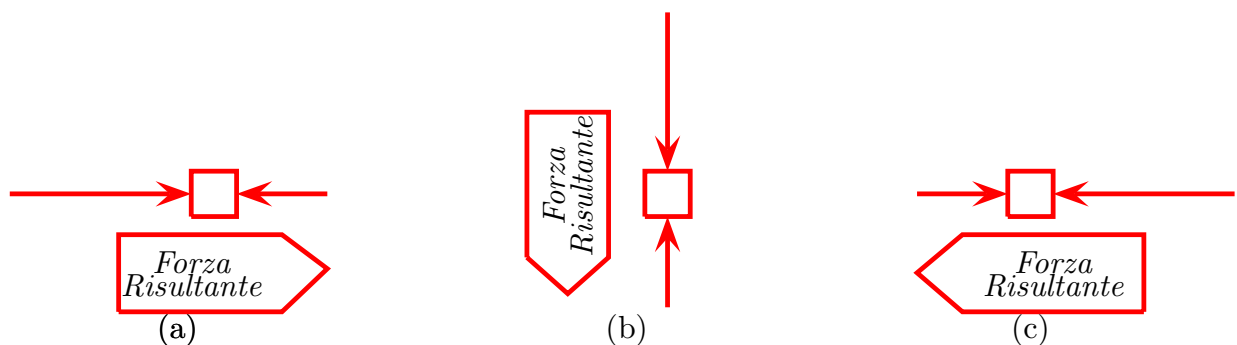


Fig.13.10-1: Esempi di differenze di pressione nel flusso che esercitano forze nette su porzioni di fluido: (a) pressione maggiore a sinistra: forza risultante a destra; (b) pressione maggiore sopra: forza risultante verso il basso; (c) pressione maggiore a destra: forza risultante a sinistra.

La differenza di pressione provoca una variazione nel moto della particella di fluido, ma l'esistenza stessa di tale differenza dipende dal moto della particella. Si tratta dunque di una relazione reciproca: una particella di fluido varia la propria velocità o direzione in risposta a una differenza di pressione, mentre la sua resistenza a tale variazione (ovvero la sua inerzia, legata alla massa) contribuisce a mantenere la differenza di pressione. La differenza di pressione può sussistere solo se c'è qualcosa che "spinge in senso opposto", e ciò che esercita questa spinta contraria è l'inerzia del fluido; ecco perchè la massa del fluido è così importante.

Per mostrare come ciò si applichi al campo di moto attorno al profilo alare, la Figura 13.10-1 illustra come la pressione agisca su tipiche particelle di fluido in diverse zone del campo. Nelle diverse zone delle masse d'aria ad alta e bassa pressione, la pressione aumenta o diminuisce in direzioni differenti, esercitando forze sulle particelle di fluido come indicato dalle frecce.

Le porzioni di fluido situate immediatamente sopra e sotto il profilo alare sono soggette a una pressione maggiore nella parte superiore rispetto a quella inferiore; di conseguenza, subiscono una forza risultante diretta prevalentemente verso il basso. A tale forza si oppone l'accelerazione (o deviazione) del flusso verso il basso. L'interazione tra pressione e deviazione del flusso è di natura reciproca: la differenza di pressione agente sulla porzione di fluido ne devia la traiettoria verso il basso, mentre tale differenza di pressione si mantiene proprio perchè la porzione di fluido possiede una massa e, pertanto, oppone resistenza alla deviazione della propria traiettoria rispetto alla linea retta.

Nella parte superiore sinistra, dove il flusso entra nella zona di bassa pressione al di sopra del profilo alare, la forza risultante agente sulla particella è diretta da sinistra verso destra; ciò si traduce in un'accelerazione nella direzione del flusso, ovvero in un aumento della velocità di quest'ultimo. Nella parte superiore destra, dove il flusso esce dalla zona di bassa pressione, esso incontra una differenza di pressione di segno opposto e subisce un rallentamento. Pertanto, una particella che attraversa la zona di bassa pressione sopra il profilo alare accelera per poi rallentare nuovamente. Viceversa, una particella che attraversa la zona di alta pressione al di sotto del profilo alare subisce la sequenza opposta: rallenta per poi tornare ad accelerare.

Queste variazioni della velocità del flusso seguono la relazione nota come principio di Bernoulli, esprimibile matematicamente attraverso l'equazione di Bernoulli. Il principio di Bernoulli si applica a regioni di flusso stazionario non significativamente influenzate dall'attrito viscoso. Esiste una piccola porzione del campo di moto attorno al profilo alare in cui il principio di Bernoulli non è applicabile: si tratta del sottile strato limite viscoso a ridosso della superficie del profilo e della sottile scia viscosa a valle, zone in cui il flusso è fortemente influenzato dalla viscosità e solitamente turbolento. Tuttavia, il campo di pressione è determinato in larga misura dalla parte più estesa del campo di moto - quella esterna allo strato limite e alla scia - dove gli effetti viscosi sono trascurabili. Qui trova applicazione il principio di Bernoulli, secondo cui una bassa pressione corrisponde a un'elevata velocità e un'alta pressione a una bassa velocità. Tale relazione è reciproca: le differenze di pressione in direzione orizzontale determinano le variazioni della velocità del flusso, mentre la resistenza del fluido all'accelerazione, dovuta alla sua massa,

mantiene le differenze di pressione.

Per riassumere queste interazioni: la curvatura verso il basso del flusso determina il "confinamento" verticale delle nubi di bassa e alta pressione, mentre le variazioni di velocità del flusso ne determinano il "confinamento" orizzontale.

Pertanto, la deviazione del flusso verso il basso e le diverse velocità del flusso al di sopra e al di sotto del profilo alare sono entrambe componenti essenziali della relazione di causa-effetto reciproca che sostiene (o "mantiene") le differenze di pressione. Le differenze di pressione provocano variazioni nella velocità e nella direzione del flusso, mentre tali variazioni, a loro volta, mantengono le differenze di pressione. Questo rapporto di causa-effetto circolare potrebbe ricordare, a prima vista, il concetto di "ottenere qualcosa dal nulla" o il "moto perpetuo", ma non è così. Tali differenze di pressione derivano naturalmente dalla seconda legge di Newton e dal fatto che il flusso in prossimità della superficie è costretto a seguire il profilo del corpo alare, caratterizzato da un andamento prevalentemente discendente. Naturalmente, anche la massa del fluido gioca un ruolo fondamentale in questa interazione.

Per certi versi, è sorprendente che la massa sia così importante, dato che l'aria ci appare estremamente leggera. Tuttavia, l'aria possiede in realtà una massa (e quindi un peso) superiore a quanto la nostra intuizione ci porti a credere. A livello del mare, un volume d'aria di appena 14 piedi cubi circa (un cubo con lato di 2,4 piedi) pesa una libbra. Anche un volume d'aria così modesto racchiude una massa considerevole; di conseguenza, un oggetto che si muove nell'aria può influenzare una grande massa d'aria in brevissimo tempo. Ad esempio, l'ala di un piccolo aereo (come un Cessna biposto) che vola a 100 miglia orarie provoca variazioni significative di velocità e direzione in migliaia di libbre d'aria ogni secondo.

13.11 - Il ruolo della curvatura (camber), del bordo d'uscita affilato e del bordo d'attacco arrotondato

L'azione di deviazione verso il basso prodotta da un profilo alare dipende sia dalla forma del profilo stesso che dall'angolo di incidenza. Le superfici del profilo non devono necessariamente essere curve; anche la configurazione a piastra piana illustrata nella figura 13.2-2a) è in grado di generare una deviazione verso il basso quando è disposta con un certo angolo di incidenza. Tuttavia, aggiungere curvatura (camber) al profilo alare, come illustrato nelle figure 13.2-2b) e d), allinea meglio le superfici del profilo al flusso curvo desiderato e ne potenzia la capacità di deviare il flusso verso il basso. **Di conseguenza, i profili dotati di curvatura in cui la superficie superiore è più convessa di quella inferiore generano una maggiore portanza, a parità di angolo di attacco, rispetto ai profili privi di curvatura.**

Ciò che accade nel flusso in prossimità del bordo d'uscita svolge un ruolo importante nel controllo dell'azione di deflessione verso il basso. Le figure 13.11-1 e 13.11-2 illustrano le configurazioni delle linee di corrente per angoli di attacco da bassi a medi. Si noti che, in entrambi i casi, il flusso proveniente sia dalla superficie superiore che da quella inferiore si distacca dal profilo in modo regolare in corrispondenza del bordo d'uscita. Se ciò non avvenisse, il flusso proveniente da un lato dovrebbe aggirare il bordo d'uscita

per portarsi sull'altro lato, come illustrato nella figura 13.10-1 a). Tuttavia, la viscosità generalmente impedisce al flusso di aggirare un bordo affilato in questo modo. Pertanto, grazie anche all'effetto della viscosità, il bordo d'uscita orienta il flusso in uscita dal profilo alare facendolo seguire il profilo della parte posteriore dell'ala stessa. Questa tendenza del bordo d'uscita a indirizzare il flusso è una delle ragioni principali per cui l'angolo di incidenza e la curvatura sono così efficaci nell'influencare la portanza.

La situazione in corrispondenza del bordo d'attacco è molto diversa. Facendo nuovamente riferimento alle figure 13.11-1 e 13.11-2, si noti come il flusso attorno al bordo d'attacco cambi drasticamente all'aumentare dell'angolo di incidenza. A un basso angolo di incidenza (figura 13.11-1), il flusso investe il bordo d'attacco quasi frontalmente, mentre a un angolo di incidenza più elevato (medio) (figura 13.11-2) vi giunge dal basso, scorrendo dalla superficie inferiore verso quella interna. Di fatto, la ragione per cui si adotta un bordo d'attacco arrotondato è quella di adattarsi alle diverse configurazioni del flusso associate ai vari angoli di incidenza, riducendo al minimo le perturbazioni.

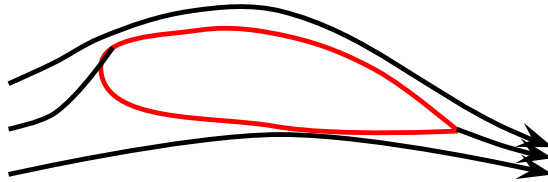


Fig.13.11-1 - *Andamento del flusso a basso angolo di attacco: Il flusso investe la zona prossima al bordo d'attacco e segue la superficie superiore.*

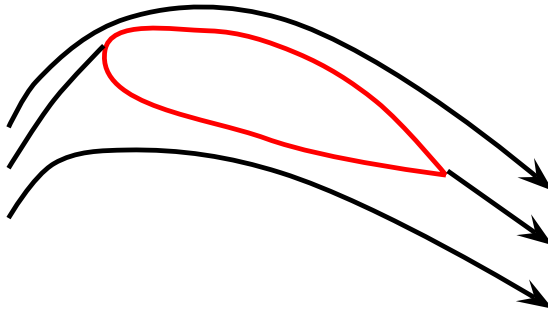


Fig.13.11-2 - *Configurazione del flusso a un angolo di attacco medio: il flusso rimane aderente sotto il bordo d'attacco, lo aggira e segue la superficie superiore.*

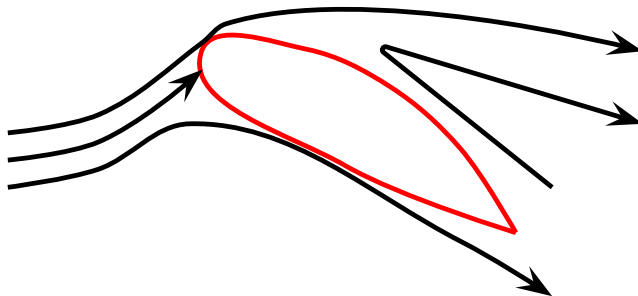


Fig.13.11-3 - *Il flusso attorno a un profilo alare ad alto angolo di incidenza si distacca dalla superficie superiore e si dice che il profilo è in condizione di stallo.*

13.12 - Come viene controllata la portanza

La portanza dipende dalla velocità del flusso. Un aumento della velocità incrementa la portanza accrescendo sia la quantità di fluido influenzata dal profilo alare in un dato intervallo di tempo, sia l'accelerazione verso il basso impressa a ciascuna porzione di fluido. Questi due effetti si moltiplicano tra loro, rendendo la portanza approssimativamente proporzionale al quadrato della velocità, a parità di angolo di incidenza.

La portanza può essere incrementata anche aumentando la curvatura o l'angolo di incidenza, purchè il flusso segua entrambe le superfici del profilo alare, come solitamente avviene ad angoli di attacco da bassi a moderati, come mostrato nelle figure 13.11-1 e 13.11-2. Per una data forma del profilo alare, questo incremento di portanza prosegue fino a raggiungere un angolo di attacco oltre il quale gli effetti della viscosità impediscono al flusso di seguire la superficie superiore. Il flusso si distacca quindi dalla superficie, come mostrato nella figura 13.11-3; questo fenomeno è noto come stallo. Quando un profilo alare supera l'angolo di attacco di stallo, la portanza subisce generalmente una drastica riduzione, pur non scomparendo del tutto.

Il controllo della portanza tramite l'angolo di incidenza è un elemento fondamentale per ottenere un volo controllato in un ampio intervallo di velocità. Per un volo livellato e costante, la portanza totale di un aeroplano deve essere mantenuta pari al suo peso; quando l'aeroplano accelera, riduce l'angolo di incidenza per evitare che la portanza superi il peso. Quando un aereo rallenta, aumenta il proprio angolo di attacco per mantenere la portanza pari al peso, ma ciò è possibile solo fino all'angolo di attacco di stallo. Di conseguenza, un aereo può rallentare solo fino a un certo limite, raggiungendo la cosiddetta velocità di stallo, ovvero la velocità minima alla quale l'aereo è in grado di volare in modo stabile.

La portanza dipende anche dalla densità del fluido. Una diminuzione della densità riduce la portanza a parità di angolo di attacco e velocità, diminuendo la massa del fluido su cui agisce il profilo alare. Pertanto, quando un aereo vola ad alta quota, dove la densità dell'aria è inferiore, deve volare più velocemente oppure aumentare l'angolo di incidenza per mantenere una portanza pari al peso del velivolo.

La portanza può essere controllata anche mediante una cosiddetta "superficie di controllo", ovvero una porzione posteriore di un profilo alare incernierata in modo da poter essere deviata verso l'alto o verso il basso, come illustrato nelle figure 13.12-1 e 13.12-2. La deflessione di una superficie di controllo modifica sia l'angolo di attacco effettivo sia la curvatura del profilo alare, alterando di conseguenza l'azione di deviazione del flusso. Esempi di superfici di controllo sono gli equilibratori (o piani di quota) situati sull'impennaggio orizzontale, che consentono di variare l'assetto longitudinale dell'aereo (cabrata o picchiata); gli alettoni, posti in prossimità delle estremità alari, che permettono di inclinare lateralmente il velivolo (rollio); e il timone di direzione, situato sull'impennaggio verticale, che consente di far ruotare l'aereo attorno al proprio asse verticale (imbardata).

Il flap è simile a una superficie di controllo e viene deflesso verso il basso sul bordo d'uscita dell'ala per aumentare sia la portanza a un dato angolo di attacco, sia la portanza massima generabile senza incorrere nello stallo. I flap consentono a un aeroplano di decol-

lare e atterrare a velocità inferiori rispetto a quanto sarebbe possibile senza di essi. Spesso il flap è dotato di una o più fenditure che convogliano il flusso d'aria dalla superficie inferiore verso la parte posteriore della superficie superiore, come illustrato nella figura 13.12-3, contribuendo così a ritardare lo stallo.

I dispositivi del bordo d'attacco, come i flap di bordo d'attacco o gli slat (mostrati nella figura 13.12-4), contribuiscono inoltre ad aumentare la portanza massima e consentono velocità di decollo e atterraggio più basse.

Gli spoiler sono dispositivi incernierati sulla superficie superiore dell'ala (come illustrato nella figura 13.12-5) che perturbano il flusso d'aria deviandolo verso l'alto; ciò provoca una notevole riduzione della portanza e un aumento della resistenza aerodinamica. Quando vengono utilizzati in volo, lo scopo non è ridurre la portanza, bensì aumentare la resistenza per consentire all'aereo di scendere in modo costante senza accelerare. Quando gli spoiler vengono utilizzati in questo modo, la riduzione della portanza da essi causata è compensata da un aumento dell'angolo di incidenza. Quando gli spoiler sono impiegati a terra durante la corsa di atterraggio, lo scopo è sia aumentare la resistenza aerodinamica sia ridurre la portanza alare, trasferendo una quota maggiore del peso del velivolo sulle ruote per consentire una frenata più energica senza slittamenti.



Fig.13.12-1 - *Una superficie di controllo deflessa verso l'alto per ridurre la portanza.*

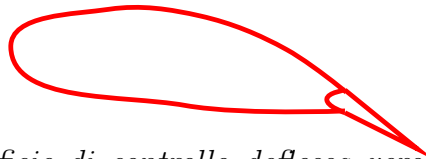


Fig.13.12-2 - *Una superficie di controllo deflessa verso il basso per aumentare la portanza.*

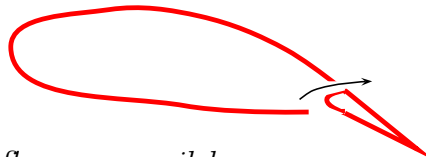


Fig.13.12-3 - *Un flap deflessso verso il basso per aumentare la portanza, dotato di una fenditura che consente all'aria di fluire dalla superficie inferiore a quella superiore.*

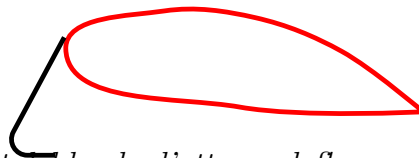


Fig.13.12-4 - *Uno slat del bordo d'attacco deflessso verso il basso aumenta la portanza massima.*

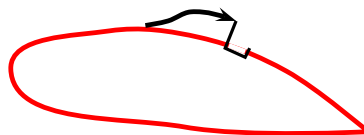


Fig.13.12-5 - *Uno spoiler deflesso verso l'alto per perturbare il flusso sulla superficie superiore, ridurre la portanza e aumentare la resistenza aerodinamica.*

13.13 - In che modo le principali spiegazioni diffuse risultano incomplete

Le due spiegazioni della portanza più diffuse sono quella basata sulla quantità di moto (newtoniana) e quella basata sul principio di Bernoulli. Entrambe contengono elementi di verità, ma nessuna delle due fornisce una spiegazione completa.

La spiegazione basata sulla quantità di moto è, in linea di massima, la seguente. Quando un profilo alare genera portanza, devia il flusso verso il basso come mostrato dalle linee di corrente inclinate verso il basso nella parte destra della figura 13.7-2. Il secondo principio della dinamica di Newton stabilisce che, per deviare il flusso verso il basso, il profilo deve esercitare una spinta verso il basso sul fluido. Di conseguenza, in virtù del terzo principio di Newton - secondo cui a ogni azione corrisponde una reazione uguale e contraria - il fluido deve esercitare una spinta verso l'alto sul profilo alare, generando così la portanza. Questa spiegazione è corretta per quanto riguarda gli aspetti trattati, ma risulta incompleta sotto diversi profili. Innanzitutto, non evidenzia che la forza viene effettivamente trasmessa al profilo alare dalla pressione, né spiega come il profilo riesca a deviare verso il basso una porzione di flusso ben più ampia di quella con cui entra direttamente in contatto. Inoltre, sebbene accenni al modo in cui si mantengono le differenze di pressione in direzione verticale, non spiega affatto come si sostengano quelle in direzione orizzontale; in altre parole, trascura la componente dell'interazione legata al principio di Bernoulli.

Una spiegazione basata sul principio di Bernoulli parte dal presupposto che il flusso sulla superficie superiore subisca un'accelerazione, sia perché il percorso lungo tale superficie è più lungo, sia a causa di un "ostacolo", di una "gobba" o di un effetto "Venturi". In virtù della maggiore velocità, la pressione sulla superficie superiore deve risultare inferiore - secondo il principio di Bernoulli - generando così la portanza. Le spiegazioni di questo tipo sono incomplete in quanto non spiegano adeguatamente o correttamente cosa provochi l'accelerazione del flusso. La spiegazione basata sulla lunghezza del percorso inferiore è semplicemente errata (vedi sotto, alla voce "Idee sbagliate comun"). Le spiegazioni basate su "ostacoli", "humo" o "Venturi" sono migliori, ma solo di poco. Spesso menzionano il "compressione" o il "restringimento" del flusso sulla superficie superiore, ma non forniscono una spiegazione fisica convincente per tale compressione. Un difetto comune a tutte queste spiegazioni è che esse implicano che una differenza di velocità possa originarsi da cause diverse da una differenza di pressione e che tale differenza di velocità provochi, o quantomeno implichi, una differenza di pressione, in base al principio di Bernoulli. Si tratta dell'errata convinzione di una causalità unidirezionale, che discuteremo più avanti. Infine, una spiegazione basata esclusivamente sul principio di Bernoulli non chiarisce realmente come si generino le differenze di pressione in direzione verticale; in altre parole, trascura la componente dell'interazione che determina la deviazione verso il basso del flusso.

Tra i sostenitori delle spiegazioni basate sulla quantità di moto e sul principio di Bernoulli si sono delineate almeno tre scuole di pensiero. Una sostiene che solo una delle due possa essere corretta; un'altra ritiene che entrambe siano valide e si applichino a due diverse tipologie di portanza; una terza afferma che entrambe siano corrette, ma che nessuna delle due sia sufficiente a spiegare la portanza in termini generali. Si tratta, in

tutti i casi, di idee errate che esamineremo a breve.

Una terza importante categoria di spiegazioni riguarda la circolazione attorno al profilo alare. Una spiegazione di questo tipo parte dall'osservazione che, quando un profilo alare inizia a muoversi nel fluido, si genera un vortice di avviamento che rimane indietro. La formazione di tale vortice è accompagnata dall'instaurarsi di un flusso circolatorio o circolazione attorno al profilo, responsabile della portanza secondo una teoria aerodinamica nota come teorema di Kutta-Joukowski. Questa non è una spiegazione fisica appropriata, per due ragioni. In primo luogo, si basa su diversi teoremi matematici e aerodinamici avanzati anzichè su argomentazioni fisiche dirette. In secondo luogo, sebbene il ragionamento sia matematicamente e logicamente corretto, il suo svolgimento generale non riflette il rapporto fisico di causa-effetto e risulta quindi fuorviante. Esso suggerisce che la portanza sia in qualche modo generata dalla formazione del vortice di avviamento e dalla conseguente circolazione; in realtà, il vortice di avviamento e la circolazione vanno considerati più correttamente come sottoprodotti della portanza piuttosto che come sue cause.

13.14 - Luoghi comuni

Abbiamo visto che la generazione della portanza implica sottili relazioni di causa-effetto; non sorprende, quindi, che molti tentativi di spiegarla a un pubblico non specializzato siano incorsi in errori di vario genere. Per consolidare la nostra comprensione e ridurre il rischio di lasciarci fuorviare da idee errate, individuiamo alcuni di questi luoghi comuni e analizziamo dove risiedono gli errori.

Causalità unidirezionale: si tratta di un'idea errata, già discussa, secondo cui è possibile dedurre innanzitutto una differenza di velocità basandosi su un ragionamento indipendente dalla pressione, per poi concludere che la differenza di pressione ne consegue in virtù del principio di Bernoulli.

L'idea che la causalità operi in una sola direzione non è compatibile con la fisica dei flussi di fluido. Se si tenta di spiegare una differenza di velocità senza considerare la differenza di pressione, si finirà inevitabilmente per individuarne erroneamente le cause. Un esempio di ciò ovvero una spiegazione errata dell'elevata velocità sulla superficie superiore di un profilo alare è il prossimo punto della nostra lista.

Percorso più lungo e tempo di transito uguale. Si tratta di un argomento molto diffuso nelle spiegazioni rivolte ai non addetti ai lavori. Si ipotizza che la superficie superiore del profilo alare sia più convessa di quella inferiore, e che il percorso che il fluido deve compiere attorno alla superficie superiore è, di conseguenza, più lungo di quello attorno alla superficie inferiore. Si ipotizza inoltre che le particelle di fluido, separatasi al bordo d'attacco per percorrere le superfici superiore e inferiore, debbano ricongiungersi al bordo d'uscita. Pertanto, le particelle di fluido che seguono i due percorsi devono impiegare lo stesso tempo; ne consegue che la velocità sulla superficie superiore deve essere maggiore di quella sulla superficie inferiore.

Innanzitutto, questa non è una vera spiegazione fisica. Dire semplicemente che qualcosa deve arrivare in un certo punto a un dato istante non spiega perchè tale oggetto possa accelerare. Per spiegare l'accelerazione, occorre individuare e descrivere la forza che la determina. Inoltre, questa spiegazione è errata sotto un altro aspetto: non vi è alcun

motivo per cui particelle di fluido che partono insieme davanti al profilo alare debbano ricongiungersi al bordo d'uscita; di fatto, ciò generalmente non accade. Una particella che scorre lungo il dorso del profilo (la superficie superiore) arriva tipicamente al bordo d'uscita molto prima di una che scorre lungo il ventre (la superficie inferiore). Pertanto, non è necessaria alcuna differenza nella lunghezza dei percorsi; esistono infatti molte situazioni in cui si genera portanza in assenza di tale differenza. E anche nei casi in cui una differenza di percorso sussiste, essa è solitamente troppo esigua per giustificare l'effettiva variazione di velocità che si osserva quando viene generata portanza.

Si può applicare il principio di Bernoulli ma non quello di Newton, o viceversa. Alcuni sostenitori delle spiegazioni basate su Bernoulli sostengono che la portanza sia prodotta esclusivamente da una differenza di pressione - in accordo con il principio di Bernoulli - e che al fluido non venga impressa alcuna quantità di moto verso il basso (Newton). Alcuni sostenitori delle spiegazioni basate sulla quantità di moto sostengono l'opposto: che la quantità di moto impressa sia l'aspetto fondamentale (Newton) e che il principio di Bernoulli non sia applicabile.

Abbiamo visto che la differenza di pressione tra le superfici superiore e inferiore e la deviazione del flusso verso il basso sono entrambe componenti essenziali del quadro complessivo.

Bernoulli e Newton hanno entrambi ragione e spiegano due diversi tipi di portanza. Una terza linea di argomentazione sostiene che la "portanza di Bernoulli" e la "portanza di Newton" rappresentino due meccanismi fisici distinti.

Esiste un solo tipo di portanza, e per spiegarlo sono necessari sia una differenza di pressione sia una deviazione del flusso verso il basso.

Bernoulli e Newton hanno entrambi ragione ed è sufficiente l'uno o l'altro. Secondo questa linea di ragionamento, le spiegazioni basate su Bernoulli e quelle basate sulla quantità di moto sono semplicemente modi diversi, ma equivalenti, di considerare la stessa cosa.

Ancora una volta, abbiamo visto che una spiegazione completa deve includere sia la differenza di pressione sia la deviazione del flusso verso il basso.

Si invoca l'effetto Coanda per spiegare come il flusso riesca a seguire le superfici curve del profilo alare: alcune spiegazioni sostengono che la viscosità svolga un ruolo cruciale nel permettere al flusso di curvare e seguire la superficie superiore curva del profilo, definendo tale interazione tra viscosità e curvatura del flusso come effetto Coanda.

Ciò riflette un'errata comprensione del ruolo della viscosità nei flussi di fluido e di ciò che l'effetto Coanda comporta realmente. Quando un fluido scorre sulla superficie di un profilo alare, non vi è alcun accoppiamento diretto tra viscosità e deviazione del flusso, né esso è necessario. La viscosità svolge un ruolo significativo nella generazione della portanza solo nelle immediate vicinanze del bordo d'uscita del profilo, impedendo al flusso di aggirare il bordo d'uscita passando dalla superficie inferiore a quella superiore. Il vero effetto Coanda si riferisce alla tendenza di un getto turbolento, dotato di energia superiore rispetto al fluido circostante, ad aderire a una superficie adiacente e a seguirne il profilo anche se curvo. Si tratta non tanto di un effetto della viscosità, quanto piuttosto di un effetto indiretto della turbolenza del getto; esso scaturisce dalla tendenza dei getti a

trascinare con sé il fluido circostante e non svolge alcun ruolo nei flussi ordinari attorno a un profilo alare.

La bassa pressione sulla superficie superiore esercita un richiamo verso l'alto sul profilo alare: molte spiegazioni comuni della portanza descrivono l'effetto della bassa pressione in questi termini. L'idea che il profilo alare venga tirato verso l'alto ha una forte attrattiva intuitiva, ma è errata.

La pressione, specialmente nei gas come l'aria, è sempre una spinta e mai una trazione. La pressione sulla superficie superiore di un profilo alare spinge il profilo verso il basso, ma la pressione più elevata sulla superficie inferiore spinge verso l'alto con maggiore forza; l'effetto risultante è la portanza.

Mancato riconoscimento dell'importanza dell'angolo di attacco: alcune spiegazioni, come quella basata sull'argomentazione relativa alla lunghezza del percorso e al tempo di transito, non menzionano mai l'angolo di attacco.

L'angolo di incidenza è un fattore chiave che determina la portanza generata da un profilo alare a una data velocità del flusso ed è un elemento essenziale per ottenere un volo controllato.

13.15 - Perché ci sono stati così tanti malintesi

Spiegare la portanza in termini fisici è più complesso di quanto si pensi, poichè la difficoltà è intrinseca alla natura stessa della meccanica dei fluidi. Ci troviamo di fronte a innumerevoli piccole porzioni di fluido che si muovono in coordinazione con quelle adiacenti ed esercitano forze su di esse, obbedendo al contempo e in modo indipendente alla seconda legge di Newton. È semplicemente impossibile osservare un profilo alare e dedurre, con il solo ragionamento, quale configurazione del flusso soddisfi simultaneamente le leggi fisiche in ogni punto: le relazioni concomitanti da considerare sono troppe. A ciò si aggiunge la complessità derivante dalla natura circolare del rapporto di causa-effetto tra pressione e velocità.

Gestire matematicamente questo tipo di complessità non è affatto semplice. La espressione matematica di tutte le relazioni che un flusso di fluido deve soddisfare porta a un sistema di equazioni alle derivate parziali noto come "equazioni di Navier-Stokes". Risolvendo tali equazioni, è possibile prevedere nel dettaglio il comportamento del flusso attorno a un profilo alare e l'entità della portanza generata. Tuttavia, la risoluzione di queste equazioni comporta la determinazione matematica della pressione e della velocità del flusso in un ampio volume di spazio circostante il profilo alare. Qualunque sia la situazione del flusso, ciò richiede calcoli laboriosi, eseguibili in modo pratico solo mediante computer ad alta velocità. Esistono programmi informatici in grado di effettuare tali calcoli abitualmente; tuttavia, essi si limitano a fornire una simulazione di ciò che accadrebbe nella realtà, senza offrire una spiegazione fisica dei meccanismi sottostanti.

Sono state sviluppate anche teorie semplificate, come la teoria del flusso potenziale (che trascura la viscosità) e quella di Kutta-Joukowski (che mette in relazione la portanza con una componente circolatoria del flusso attorno al profilo alare); tuttavia, neppure queste forniscono una spiegazione fisica diretta della portanza.

Vediamo quindi che prevedere l'esistenza della portanza basandosi esclusivamente sulle proprietà del fluido e sulle leggi della fisica richiederebbe, in sostanza, di risolvere

le equazioni di Navier-Stokes o l'equazione del flusso potenziale per il moto attorno al profilo alare: un compito che non è certo possibile svolgere a mente. Spiegare cosa accade ricorrendo a parole e diagrammi semplici, anzichè a calcoli laboriosi, richiede quindi una certa conoscenza preliminare del comportamento del flusso. La spiegazione precedente è partita dalle caratteristiche fondamentali dei campi di pressione e velocità attorno a un profilo alare, per poi mostrare come tali campi interagiscano in modo coerente con le leggi della fisica, rispettando le corrette relazioni di causa-effetto.

Le spiegazioni errate spesso partono da una conoscenza insufficiente e tentano di ottenere più di quanto sia logicamente possibile affidandosi esclusivamente allo sforzo mentale. Di conseguenza, tendono a lasciare inspiegati aspetti importanti (come la reale causa dell'elevata velocità del flusso sulla superficie superiore) e a ricorrere a fallacie logiche, quali il principio di causalità unidirezionale.