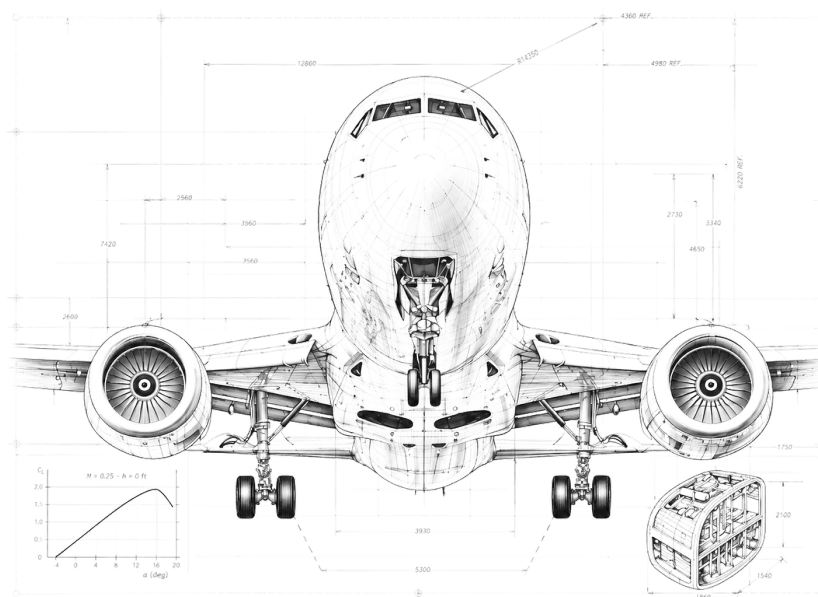


Una descrizione fisica del volo

Dalla portanza al velivolo completo: leggi di Newton, progetto dell'ala, stabilità, propulsione, alta velocità e struttura



Appunti di Aerodinamica e Meccanica del volo

Prof. Biagio Raucci

Istituto Tecnico — Trasporti e Logistica

Sommario

La maggior parte di noi ha imparato a spiegare il volo ricorrendo al principio di Bernoulli e alla diversa lunghezza dei due percorsi sulla faccia superiore e inferiore dell'ala. È una spiegazione elegante, facile da memorizzare e, purtroppo, sostanzialmente fuorviante. In queste pagine seguiamo una strada diversa, proposta da David Anderson e Scott Eberhardt in *Understanding Flight*: descrivere il volo a partire dalle tre leggi della dinamica di Newton e da un fenomeno fisico concreto, l'effetto Coanda. Vedremo che l'ala genera portanza perché devia verso il basso una grande massa d'aria, che questa deviazione richiede potenza, e che da questo unico principio discendono in modo naturale fenomeni altrimenti misteriosi: il volo rovesciato, la velocità di stallo che cresce con il carico, i vortici alle estremità alari, l'effetto suolo, perfino la spinta di una vela. Un motore a getto, un'elica, il rotore di un elicottero e un'ala obbediscono in fondo alla stessa fisica: *accelerano aria nella direzione opposta alla forza desiderata*. L'obiettivo non è demolire Bernoulli, che resta corretto, ma fornire uno strumento mentale più potente e più vicino all'intuizione del pilota e del progettista.

Da questo nucleo la trattazione si allarga, passo dopo passo, all'intero velivolo: come da quei principi discenda il *progetto dell'ala* (profilo, strato limite, ipersostentatori, allungamento, winglet); come il velivolo si mantenga docile e governabile (*stabilità e controllo*); come si generi la spinta (*propulsione*, dall'elica al turbofan); che cosa cambi quando l'aria non è più incompressibile (*volo ad alta velocità*, onde d'urto, freccia); e infine come la struttura regga i carichi che la portanza stessa impone (*introduzione alle strutture aeronautiche*). Una chiusura in appendice smonta gli usi impropri del principio di Bernoulli. Il tutto come *rudimenti robusti e completi*, pensati per avviare gli studenti allo studio dei corsi specialistici.

Indice

1	Introduzione: tre modi di raccontare la portanza	4
2	La “descrizione comune” e i suoi limiti	5
2.1	Una verifica numerica impietosa	5
2.2	Che cosa manca davvero	6
3	La portanza e le leggi di Newton	7
3.1	La seconda legge in forma utile: il <i>downwash</i>	8
3.2	I due punti di vista: pilota e osservatore al suolo	8
3.3	La portanza è una reazione: la Terra non sostiene l'aereo	9
3.4	Quanta aria, in concreto?	9
4	L'effetto Coanda: perché l'aria segue il profilo	10
4.1	Viscosità, strato limite, distacco	11
5	La portanza in funzione dell'angolo d'incidenza	12
6	L'ala come una “paletta” (<i>virtual scoop</i>)	13
6.1	Mettendo tutto insieme	14
7	Produrre portanza richiede potenza	15
7.1	La potenza indotta	16
7.2	La potenza parassita	16

7.3	L'effetto della quota sulla curva di potenza	17
8	La resistenza	18
9	Il rendimento dell'ala e l'allungamento alare	19
10	Potenza e carico sulle ali	20
10.1	Carico e velocità di stallo	21
11	Un'obiezione: sostenersi costa davvero lavoro?	22
12	Vortici, scia e circolazione	22
12.1	Come si arrotola la scia	23
12.2	La circolazione: conseguenza, non causa	23
13	L'effetto suolo	25
14	La portanza di una vela	26
15	Dalla fisica del volo al progetto dell'ala	27
15.1	La scelta del profilo: spessore, bordo d'attacco, curvatura	27
15.2	Lo strato limite e il distacco	28
15.3	Flusso laminare, turbolento e resistenza di forma	29
15.4	I generatori di vortici	31
15.5	Gli ipersostentatori	32
15.6	La pianta dell'ala	34
16	Stabilità e controllo	38
16.1	Stabilità statica: stabile, instabile, neutra	38
16.2	Stabilità longitudinale ed equilibrio	39
16.3	Il trim (equilibratura)	41
16.4	Le ali volanti	41
16.5	Dimensionare il piano di coda	41
16.6	Stabilità direzionale	42
16.7	Stabilità dinamica	43
16.8	I modi dinamici: fugoide, dutch roll, spirale	43
16.9	Velivoli instabili e aumento di stabilità	44
16.10	Qualità di volo e comandi elettrici (fly-by-wire)	44
16.11	Quadro d'insieme	45
17	La propulsione: come si genera la spinta	45
17.1	Di nuovo le leggi di Newton: la spinta	45
17.2	Potenza propulsiva, potenza del getto, potenza dissipata	46
17.3	Il rendimento propulsivo	47
17.4	L'elica: un'ala che ruota	48

17.5	Il motore a pistoni	49
17.6	Il motore a turbina, cuore del getto	50
17.7	Il turbogetto e il rendimento del getto	51
17.8	Il turbofan	52
17.9	Il turboelica	53
17.10	Inversori, vettoriamento e postbruciatori	54
17.11	Quadro d'insieme	55
18	Il volo ad alta velocità	55
18.1	Il numero di Mach e i regimi di volo	55
18.2	La portanza resta una reazione (ma l'upwash svanisce)	55
18.3	L'aria comprimibile	56
18.4	Le onde d'urto	56
18.5	Resistenza e potenza d'onda	57
18.6	Il volo transonico e la divergenza della resistenza	58
18.7	La freccia alare	60
18.8	La regola delle aree	60
18.9	Volo ipersonico e riscaldamento	62
18.10	Quadro d'insieme	63
19	Introduzione alla struttura dell'ala	63
19.1	Fattore di carico, carico limite e carico ultimo	64
19.2	L'ala come trave a sbalzo	64
19.3	Sforzo, trazione e compressione	67
19.4	Dalla centina al guscio lavorante: breve storia costruttiva	68
19.5	Il cassone alare	69
19.6	Torsione e taglio: l'esperimento del tubo	70
19.7	I materiali compositi	70
19.8	Fatica e ispezioni	71
19.9	La struttura ideale e quella reale	72
20	Conclusioni	73
A	Usi impropri del principio di Bernoulli	74
A.1	L'equazione di Bernoulli e la pressione dinamica	74
A.2	Perché Bernoulli non si applica all'ala reale	75
A.3	La presa statica: l'aria veloce non ha pressione statica minore	75
A.4	Esperimenti che dimostrano la portanza, non Bernoulli	76
A.5	La palla che curva: l'effetto Magnus	76

I Introduzione: tre modi di raccontare la portanza

Oggi quasi tutti, prima o poi, sono saliti su un aeroplano. Molti, guardando fuori dal finestrino, si sono chiesti come sia possibile che un oggetto di decine o centinaia di tonnellate resti sospeso nell'aria. Le risposte che si ricevono sono spesso vaghe, talvolta apertamente sbagliate. Lo scopo di questi appunti è fornire una spiegazione che sia al tempo stesso corretta, intuitiva e *operativa*: una spiegazione, cioè, che permetta non solo di capire perché si vola, ma anche di prevedere come cambia il comportamento del velivolo al variare della velocità, dell'altitudine e del carico.

Conviene partire da un'osservazione che fa da filo conduttore a tutto il resto. Un motore a getto e un'elica producono spinta soffiando aria all'indietro; il rotore di un elicottero produce portanza soffiando aria verso il basso; e un'ala, allo stesso modo, produce portanza deviando aria verso il basso. Sotto la diversità apparente, il principio fisico è uno solo:

Nota

Il principio unificante. Getto, elica, rotore e ala funzionano tutti con la stessa fisica: *l'aria viene accelerata nella direzione opposta a quella della forza che si vuole ottenere*. Per spingere in avanti, si manda aria all'indietro; per sostenersi, si manda aria verso il basso.

Esistono almeno tre modi diversi di descrivere la portanza, e ciascuno ha un suo pubblico naturale.

La descrizione aerodinamica matematica. È quella usata dagli ingegneri aeronautici e implementata nei codici di calcolo. La portanza viene determinata calcolando l'accelerazione impressa all'aria mediante un concetto matematico raffinato, la *circolazione*, che quantifica la rotazione netta dell'aria intorno al profilo. È uno strumento potente e rigoroso, ma poco adatto a costruire un'immagine mentale immediata: dice *quanto*, non *perché*.

La descrizione comune. È quella fondata sul principio di Bernoulli, la più diffusa nei manuali di addestramento e nei testi divulgativi. Ha il pregio enorme della semplicità, ma poggia su un'ipotesi mai dimostrata — il cosiddetto “principio degli uguali tempi di transito” — e lascia inspiegati troppi fenomeni: il volo rovesciato, la potenza necessaria a sostenersi, l'effetto suolo, la dipendenza della portanza dall'angolo d'incidenza.

La descrizione fisica. È quella che adotteremo. Si fonda sulle tre leggi della dinamica e sull'effetto Coanda. Spiega in modo unitario sia il meccanismo della portanza sia le relazioni fra le grandezze in gioco — come la portanza cambi con velocità, densità, carico, angolo d'incidenza e superficie alare — e vale tanto nel volo a bassa velocità quanto in quello supersonico. Si presta a stime rapide “sul retro di una busta” e, soprattutto, costruisce l'intuizione di cui un pilota ha bisogno ai comandi.

Nota

La tesi centrale, che svilupperemo passo dopo passo, si riassume in una frase: *l'ala produce portanza perché devia verso il basso una grande massa d'aria*. Tutto il resto — pressioni, velocità, circolazione — è conseguenza o descrizione alternativa di questo unico fatto fisico.

Da questo nucleo il percorso si sviluppa in modo ordinato. Prima costruiamo la *fisica della portanza* (leggi di Newton, effetto Coanda, l'ala come “paletta”, potenza e resistenza, rendimento, vortici, effetto suolo); poi la

mettiamo al lavoro nel *progetto dell'ala* e nello studio della *stabilità e del controllo* del velivolo; quindi vediamo come si genera la spinta (*propulsione*) e che cosa accade quando l'aria diventa comprimibile (*alta velocità*); infine guardiamo alla *struttura* che tutti questi carichi deve sopportare. Ogni parte poggia su quella precedente, e i rimandi nel testo aiutano a tenere insieme il filo. Cominciamo, allora, dalla domanda di fondo: perché si vola?

2 La “descrizione comune” e i suoi limiti

Agli studenti di fisica si insegna che gli aerei volano grazie al principio di Bernoulli, secondo cui, in un flusso, dove la velocità aumenta la pressione diminuisce. Il principio in sé è ineccepibile. Il problema nasce da come lo si usa per spiegare la portanza: si afferma che l'aria scorre più velocemente sopra l'ala che sotto, e che in quella regione si crea quindi una zona di depressione che “risucchia” l'ala verso l'alto.

La spiegazione soddisfa la maggior parte delle persone. Ma il lettore curioso si chiede subito: *perché* l'aria sopra l'ala dovrebbe andare più veloce? Ed è qui che la descrizione comune mostra la corda. Per giustificare quella maggiore velocità si ricorre alla geometria: i due filetti d'aria che si separano sul bordo d'attacco — si dice — devono ricongiungersi nello stesso istante al bordo d'uscita; poiché il cammino sul dorso è più lungo, l'aria sul dorso deve andare più rapida. È il “principio degli uguali tempi di transito”. Il guaio è che nessuno ha mai dimostrato che i due filetti debbano ricongiungersi simultaneamente: è un'ipotesi gratuita, e per giunta falsa per qualunque ala che generi portanza.

2.1 Una verifica numerica impietosa

Mettiamo alla prova la descrizione comune con un caso concreto, lo stesso proposto da Anderson ed Eberhardt: il Cessna 172, un piccolo monomotore ad ala alta a quattro posti, molto diffuso nelle scuole di volo.

Esempio

Il Cessna 172 e il principio degli uguali tempi.

A pieno carico, le ali devono sostenere una massa di circa 1 050 kg. Il percorso lungo il dorso del profilo è maggiore di quello lungo il ventre soltanto dell'1,5%. Se applichiamo l'ipotesi degli uguali tempi di transito e calcoliamo la differenza di velocità che ne deriva, alla velocità di circa 100 km/h — che per questo aeroplano è già “volo lento” — l'ala produrrebbe appena il 2% della portanza necessaria.

Le conseguenze sono assurde. Perché l'ala sviluppi davvero la portanza richiesta, quel modello imporrebbe una velocità superiore a 640 km/h; e se, viceversa, volessimo sostenere il velivolo in volo lento, la differenza fra i due percorsi del profilo dovrebbe salire fino al 50%: l'ala dovrebbe essere spessa quasi quanto è larga.

Il fatto che l'ipotesi conduca a numeri tanto irrealistici è già un indizio robusto che qualcosa non va. La conferma sperimentale arriva dalla visualizzazione del flusso.

Quando in galleria del vento si immettono sbuffi di fumo a intervalli di tempo uguali, si osserva che l'aria sul dorso arriva al bordo d'uscita *molto prima* di quella sul ventre. L'accelerazione del flusso superiore è dunque assai maggiore di quanto prevedrebbe l'ipotesi degli uguali tempi; e, a un esame attento, l'aria che lambisce il ventre risulta perfino *rallentata* rispetto alla corrente indisturbata. Il principio degli uguali tempi di transito varrebbe solo per un'ala a portanza nulla.

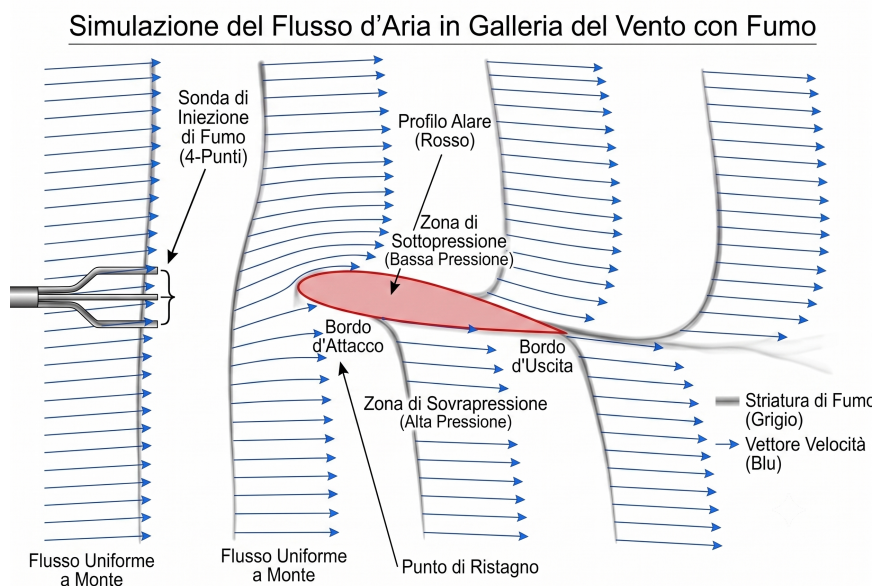


Figura 1 – Visualizzazione del flusso intorno a un profilo portante in galleria del vento con immissione di sbuffi di fumo a intervalli regolari. L'aria che scorre sul dorso raggiunge il bordo d'uscita *nettamente prima* di quella che passa sul ventre: i due filetti non si ricongiungono affatto nello stesso istante.

Attenzione

La descrizione comune, presa alla lettera, implica che il volo rovesciato sia impossibile e non sa spiegare il funzionamento delle ali simmetriche degli aerei acrobatici, né come un'ala possa reggere variazioni di carico enormi (per esempio in uscita da una picchiata o in virata stretta). Sono proprio i casi che la nuova descrizione gestirà senza sforzo.

2.2 Che cosa manca davvero

La spiegazione comune ha attraversato indenne decenni di insegnamento per la sua semplicità, ma le sue lacune sono due, e profonde.

La prima è logica. Conoscendo le velocità sopra e sotto l'ala, il principio di Bernoulli ci permette di calcolare le pressioni; ma rimane senza risposta la domanda decisiva: *chi determina quelle velocità?* Vedremo che la relazione causale corretta è l'opposto di quella suggerita dalla descrizione comune: sul dorso l'aria accelera *perché* la pressione diminuisce, e la pressione diminuisce perché l'aria viene accelerata verso il basso.

La seconda lacuna è energetica. La descrizione comune ignora del tutto il *lavoro* compiuto. Sostenere un aeroplano costa energia nel tempo, cioè *potenza*, e proprio l'analisi energetica — come vedremo — è la chiave per capire i fenomeni più interessanti legati alla portanza.

Vale la pena anticipare che il principio di Bernoulli, in sé corretto, viene spesso invocato a sproposito non solo per l'ala, ma anche per una serie di esperimenti “da tavolo” (la striscia di carta sollevata col fiato, la pallina da ping-pong sospesa in un getto d'aria, la palla che curva) che in realtà dimostrano la portanza newtoniana, non Bernoulli. A questo, e alle ragioni profonde per cui Bernoulli non si applica a un'ala reale, dedichiamo l'Appendice A in chiusura.

3 La portanza e le leggi di Newton

Ripartiamo dalle fondamenta. Le tre leggi della dinamica di Newton sono gli strumenti più potenti per capire il volo: semplici e di validità universale, valgono per il moto di una galassia come per il volo di una zanzara. Per cominciare ci bastano la prima e la terza; la seconda entrerà in gioco poco dopo.

Prima e terza legge di Newton

Prima legge (inerzia). Un corpo in quiete resta in quiete e un corpo in moto prosegue in linea retta a velocità costante, finché non interviene una forza esterna. Dunque, se una massa d'aria inizialmente ferma si mette in moto, o se un flusso d'aria si incurva (come sopra un'ala), su di esso ha agito una forza. In un mezzo continuo come l'aria, quella forza si manifesta come una differenza di pressione.

Terza legge (azione e reazione). A ogni azione corrisponde una reazione uguale e contraria. Se l'ala spinge l'aria verso il basso (azione), l'aria spinge l'ala verso l'alto (reazione): *questa* reazione è la portanza.

Per fissare le idee, conviene confrontare due rappresentazioni dei filetti d'aria intorno a un profilo.



Figura 2 – Rappresentazione comune (e scorretta) del flusso: l'aria arriva orizzontale e riparte orizzontale. Non vi è alcuna deviazione netta verso il basso e dunque, per le leggi di Newton, nessuna portanza.



Figura 3 – Andamento reale del flusso intorno a un profilo portante: si riconoscono la risalita al bordo d'attacco (*upwash*) e, soprattutto, la marcata deviazione verso il basso al bordo d'uscita (*downwash*). È questa deviazione a generare la portanza.

Nella prima rappresentazione l'aria entra orizzontale e se ne va orizzontale, nelle medesime condizioni in cui era arrivata: nessuna variazione netta della quantità di moto, quindi nessuna forza e nessuna portanza. È proprio lo schema che si trova, erroneamente, in tanti manuali. Nella seconda rappresentazione, invece, l'aria abbandona l'ala diretta verso il basso. Per la prima legge ciò richiede una forza (l'azione dell'ala sull'aria); per la terza legge l'aria reagisce con una forza uguale e diretta verso l'alto (la portanza). In una parola: *per generare portanza, l'ala deve deviare verso il basso una grande quantità d'aria*.

3.1 La seconda legge in forma utile: il *downwash*

Per quantificare introduciamo la seconda legge, $F = ma$, riscrivendola però in un modo più comodo al nostro scopo. La forza è la variazione nel tempo della quantità di moto; se l'ala, nell'unità di tempo, intercetta e devia verso il basso una portata massica $\dot{m}$ d'aria, imprimendole una componente verticale di velocità v_z (il *downwash*), allora la portanza vale

$$L = \dot{m} v_z. \quad (1)$$

Nota

La relazione (1) è l'analogo, per un flusso continuo, del bilancio della quantità di moto che in propulsione fornisce la spinta $T = \dot{m} (V_e - V_0)$ (sez. 17). In entrambi i casi la forza nasce dalla variazione, nell'unità di tempo, della quantità di moto di una massa d'aria: l'ala la devia verso il basso, il motore la accelera all'indietro.

La lettura della formula (1) è immediata e ricca di conseguenze: per aumentare la portanza ho due sole leve. Posso *deviare più aria* (aumentare $\dot{m}$) oppure *deviarla più in basso* (aumentare v_z). È lo stesso principio di un razzo, di cui parleremo trattando l'efficienza: si può ottenere la stessa forza accelerando molta massa di poco, oppure poca massa di molto.

3.2 I due punti di vista: pilota e osservatore al suolo

La componente verticale v_z può sembrare, a prima vista, un'astrazione. Diventa concreta non appena ci si rende conto che una stessa scena appare molto diversa a seconda del riferimento da cui la si osserva.

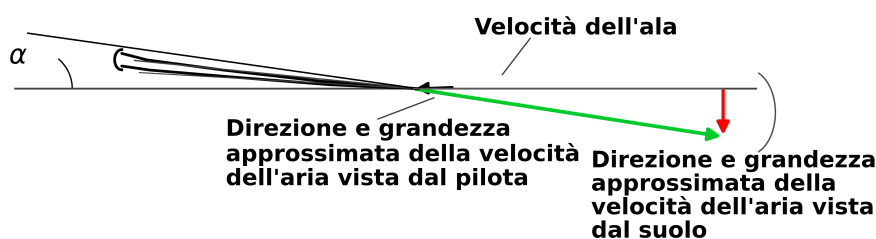


Figura 4 – La velocità con cui l'aria lascia l'ala vista nei due riferimenti. Per il pilota (riferimento solidale all'aereo) l'aria esce con direzione vicina all'angolo d'incidenza e velocità prossima a quella di volo. Per un osservatore al suolo l'aria si muove quasi verticalmente verso il basso, con modulo modesto: è la componente v_z a produrre la portanza.

Siamo abituati a pensare il flusso come lo vede il pilota (o la galleria del vento): l'ala è ferma e l'aria le scorre attorno. Ma immaginiamo di trovarci in cima a una montagna e di poter fotografare, nell'istante in cui l'aereo ci passa accanto, tutte le velocità delle particelle d'aria. La prima cosa che noteremmo è che, *dietro* l'ala, l'aria scende quasi verticale verso il basso (con una piccola componente in avanti dovuta all'attrito). Per il pilota, invece, l'aria esce dall'ala con un'inclinazione vicina all'angolo d'incidenza e una velocità prossima a quella di

volo. I due descrivono lo stesso fenomeno: sommando alla “foto da terra” la velocità del vento relativo si riottengono i familiari filetti con *upwash* e *downwash*.

La plausibilità del fatto che l’aria esca quasi verticale si verifica con un piccolo ventilatore domestico: la colonna d’aria che ne esce è ben compatta e cilindrica. Se le pale — che sono ali rotanti — espellessero l’aria a un angolo apprezzabile rispetto al loro asse, il getto si allargherebbe a cono. Lo stesso si osserva sotto il rotore di un elicottero in volo stazionario sopra l’acqua: l’impronta sull’acqua è larga quanto il disco del rotore.

3.3 La portanza è una reazione: la Terra non sostiene l’aereo

L’ala, dunque, sostiene il velivolo *trasferendo quantità di moto all’aria*, e in volo rettilineo e orizzontale quella quantità di moto viene in ultima analisi trasferita al suolo.

Esempio

Il proiettile e il rinculo.

La portanza è come il rinculo di un fucile: lo sparatore avverte il rinculo sia che il proiettile colpisca l’albero, sia che lo manchi. Se l’aereo sorvolasse un’enorme bilancia, questa lo “peserebbe”: la quantità di moto ceduta all’aria finisce per scaricarsi a terra, e la Terra non diventa più leggera quando un aereo decolla.

Attenzione

La Terra non “sostiene” l’aereo. Che la quantità di moto si scarichi al suolo non significa che sia la superficie terrestre a tenere su l’aereo. Due controprove. *Primo:* l’elica, che è un’ala rotante, sviluppa spinta anche lontano da ogni superficie; e la componente orizzontale della portanza in una virata stretta non ha nulla a che fare con il suolo. *Secondo:* il Concorde crociera a Mach 2 a circa 16 000 m di quota; l’informazione di pressione non può propagarsi fino a terra e tornare indietro più veloce del suono, sicché quando il suolo “viene a sapere” del Concorde, l’aereo è già lontano. La portanza, insomma, è un fatto locale fra ala e aria.

3.4 Quanta aria, in concreto?

Vale la pena rendersi conto delle masse d’aria realmente in gioco, perché sono sorprendentemente grandi.

Esempio

Cessna 172: quanta aria devia ogni secondo?

Riprendiamo il Cessna 172, massa $\approx 1\,050$ kg, in volo a 220 km/h. Supponendo un angolo d’incidenza efficace di circa 5° , si stima che l’aria lasci l’ala, proprio in corrispondenza di questa, con una velocità verticale dell’ordine di 18 km/h. Assumendo che la componente verticale *media* dell’aria deviata sia circa la metà di questo valore, la seconda legge applicata a (1) richiede che l’ala devii dell’ordine di *cinque tonnellate d’aria al secondo*.

In crociera, dunque, questo piccolo aeroplano sposta ogni secondo una massa d’aria pari a circa cinque volte la propria. Si pensi allora a quanta aria debba deviare un Airbus A380 da 600 t.

Questo numero è un argomento decisivo contro l'idea — implicita nella descrizione comune — che la portanza sia un fenomeno “di superficie”, confinato a un sottile velo d'aria a ridosso del profilo. Poiché al livello del mare la densità dell'aria è circa 1 kg/m^3 , per deviare ogni secondo quella massa l'ala del Cessna deve agire sull'aria contenuta in un volume che la sovrasta per un'altezza dell'ordine di *sette metri*. La portanza coinvolge una colonna d'aria spessa, non una pellicola. Concentrarsi solo sulle pressioni di superficie dà un quadro incompleto del fenomeno.



Figura 5 – Effetto del flusso deviato verso il basso su un banco di nebbia sorvolato a bassa quota: il velivolo è passato *sopra* la nebbia, non dentro, eppure l'aria discendente scava un solco ben visibile, ai cui margini si avvolgono i vortici d'estremità.

4 L'effetto Coanda: perché l'aria segue il profilo

Resta da spiegare il meccanismo con cui una lamiera sottile e quasi piatta riesce a piegare verso il basso una colonna d'aria alta diversi metri. È forse la domanda più impegnativa di tutta la teoria del volo, e la risposta si può osservare in cucina.

Effetto Coanda

Un fluido in movimento, venendo a contatto con una superficie curva, tende a seguirne la curvatura anziché proseguire in linea retta. È l'effetto Coanda. La prima legge di Newton ci dice che per incurvare la traiettoria del fluido occorre una forza; la terza legge ci dice che il fluido esercita sulla superficie una forza uguale e contraria.

Avvicinando il dorso curvo di un bicchiere a un filo d'acqua che scende dal rubinetto, si vede l'acqua aderire alla superficie e avvolgersi intorno invece di cadere dritta. Per la prima legge, l'incurvarsi del getto richiede una forza diretta verso il centro di curvatura; per la terza, il getto esercita sul bicchiere una forza uguale e contraria che, sorprendentemente, tende a *tirarlo dentro* il flusso. È lo stesso meccanismo che fa sì che l'aria “segua” il dorso del profilo, piegandosi verso il basso.

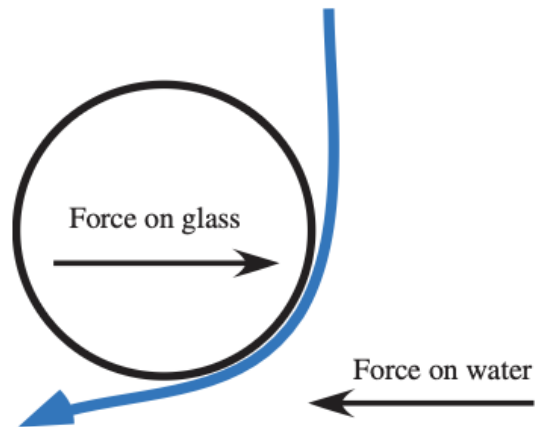


Figura 6 – Dimostrazione dell’effetto Coanda: un filo d’acqua che cade da un rubinetto, sfiorando la superficie curva di un bicchiere, vi si avvolge attorno invece di proseguire dritto. Si noti il verso delle forze: l’acqua *attira* il bicchiere verso il getto, non lo respinge.

4.1 Viscosità, strato limite, distacco

All’origine dell’effetto Coanda c’è la *viscosità*: quella resistenza allo scorrimento che conferisce all’aria un minimo di “adesività”. La viscosità dell’aria è piccola, ma sufficiente a far sì che le molecole a diretto contatto con la superficie vi restino, in pratica, attaccate: in quel punto la velocità relativa fra aria e parete è nulla. (È lo stesso motivo per cui un getto d’acqua non basta a rimuovere la polvere ben adesa alla carrozzeria di un’automobile.)

Strato limite

Lo straterello d’aria a ridosso della superficie, entro il quale la velocità del fluido passa da zero (alla parete) al valore della corrente esterna, si chiama *strato limite*. Anche su ali di grandi dimensioni il suo spessore non supera qualche centimetro. È qui che agisce la viscosità e si trasmette, strato dopo strato, la curvatura del flusso.

Le forze che incurvano i filetti fluidi sono forze di taglio, trasmesse per viscosità da uno strato al successivo. Proprio perché sono limitate, il fluido riesce a seguire la superficie soltanto finché la curvatura non diventa troppo brusca: oltre un certo limite il flusso si stacca, e questo distacco è — lo vedremo — la causa fisica dello stallo.

Nota

L’effetto Coanda spiega anche perché l’aria sul dorso accelera. L’aria a contatto con il profilo, scendendo lungo il dorso, tende a lasciarsi dietro un vuoto; il filetto immediatamente sovrastante scende a riempirlo, e così via verso l’alto, con curvature via via più dolci e depressioni via via più deboli, fino alla quota in cui l’aria è indisturbata. La depressione sul dorso non è quindi causa della velocità relativa, ma conseguenza dell’accelerazione verso il basso impressa all’aria.

Guardando di nuovo il flusso reale, si nota infine che l’intensità delle forze cresce al diminuire del raggio di curvatura della superficie. Ne segue una conseguenza progettuale importante: la maggior parte della portanza

si genera nella regione anteriore del profilo, tipicamente entro il primo quarto della corda, dove la curvatura del dorso è più accentuata.

5 La portanza in funzione dell'angolo d'incidenza

Esistono profili di ogni foggia: tradizionali, simmetrici, pensati per il volo rovesciato; le ali dei primi biplani erano poco più che tavole incurvate, e si sono viste anche ali del tutto piatte. Tutte, però, deviano l'aria verso il basso, e tutte condividono una proprietà: sono *inclinate* rispetto alla corrente che le investe. Questa inclinazione — l'angolo d'incidenza — è il parametro principale da cui dipende la portanza. È utile però distinguere con cura due modi di misurarla.

Angolo d'incidenza geometrico ed efficace

L'angolo d'incidenza *geometrico* è l'angolo fra la corda media del profilo (la retta che unisce bordo d'attacco e bordo d'uscita) e la direzione del vento relativo: è quello cui si riferiscono di norma gli ingegneri. L'angolo d'incidenza *efficace*, che useremo qui, si misura invece a partire dall'assetto di portanza nulla. Un profilo *a curvatura* (camber) genera portanza già a incidenza geometrica nulla, perché devia comunque l'aria verso il basso; per esso i due angoli differiscono. Per un profilo *simmetrico*, invece, geometrico ed efficace coincidono.

Il pregio dell'angolo efficace è l'estrema generalità. Se, partendo dall'assetto di portanza nulla, si ruota il profilo verso l'alto e verso il basso misurando la portanza, si ottiene sempre la stessa risposta: per piccoli angoli la portanza è direttamente proporzionale all'angolo efficace, positiva quando il profilo è inclinato all'insù, negativa quando è inclinato all'ingù. Corretta per area e allungamento, la curva è praticamente la stessa per qualunque ala — da quella di un jet moderno a una lastra piana, a un aeroplano di carta, all'ala di un uccello — e per la stessa ala in volo rovesciato (basta capovolgere il grafico).

È l'angolo d'incidenza, e non la forma del profilo, a governare in prima battuta la portanza: il pilota lo regola di continuo. La velocità si controlla con la potenza (e con il rateo di salita o discesa); l'angolo d'incidenza si controlla con l'equilibratore, la superficie mobile posta in coda allo stabilizzatore orizzontale, che funziona esattamente come un'ala — spinge aria in alto o in basso e fa cabrare o picchiare l'intero velivolo. La forma del profilo conta, naturalmente, ma soprattutto per le caratteristiche di stallo e per la resistenza alle alte velocità. Il fatto che un'ala rovesciata voli senza problemi, purché le si dia l'opportuno angolo d'incidenza, è la prova più semplice che il profilo non è protagonista assoluto: una circostanza che la descrizione comune non sa raccontare.

Attenzione

Lo stallo. Superato un angolo critico di circa 15° , la portanza non cresce più ma diminuisce. La deflessione richiesta all'aria diventa infatti troppo brusca perché la viscosità riesca a tenerla aderente al dorso: il flusso si stacca dalla superficie superiore e il velivolo va in stallo. Lo stallo è quindi un fenomeno di *angolo*, non semplicemente di velocità. L'angolo critico è una proprietà del profilo e non dipende dal carico né dalla densità dell'aria: è un fatto che tornerà utile più volte.

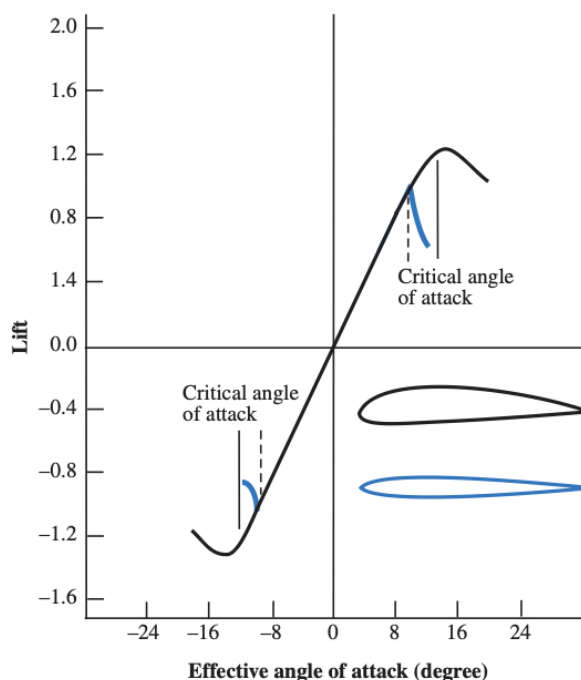


Figura 7 – Portanza in funzione dell'angolo d'incidenza efficace. Per piccoli angoli la relazione è lineare e identica (a meno di area e allungamento) per tutti i profili, anche capovolti; superato l'angolo critico (tipicamente intorno ai 15°) il flusso si stacca, la portanza crolla e cresce la resistenza: è lo stallo. Un profilo sottile e simmetrico stalla prima e più bruscamente di uno spesso e a curvatura.

6 L'ala come una “paletta” (*virtual scoop*)

La formula (1) ci dice che la portanza dipende dalla massa d'aria deviata e dalla sua velocità verticale. Abbiamo già chiarito che v_z cresce con la velocità e con l'angolo d'incidenza; resta da capire *che cosa regoli la portata $\dot{m}$* . Per questo conviene sostituire l'immagine dell'ala-lama con una più fedele alla fisica: l'ala come una grande *paletta* (in inglese *virtual scoop*) che, mentre avanza, raccoglie una certa quantità d'aria e la devia verso il basso, alla direzione del *downwash*.

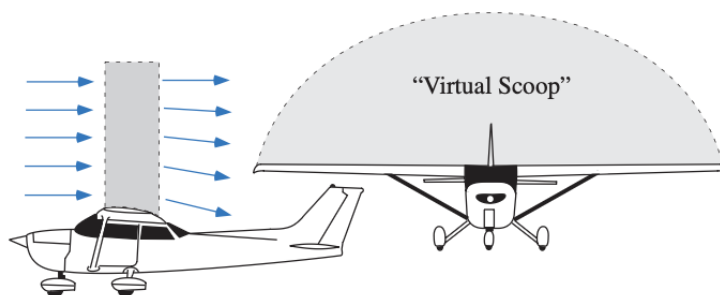


Figura 8 – L'ala come “paletta” virtuale. La quantità d'aria intercettata è massima alla radice e si annulla all'estremità: di qui la forma all'incirca semiellittica. Non è una paletta reale dai contorni netti, ma un sussidio visivo che cattura correttamente come la massa deviata dipenda da velocità e densità.

Nota

Un fondamento fisico. La paletta non è solo una metafora: poggia, in modo qualitativo, sulla legge di Biot–Savart dell’aerodinamica teorica, che fornisce la perturbazione di velocità indotta dall’ala sommando il contributo delle varie parti della superficie portante. Poiché il carico è massimo alla radice e si annulla alle estremità, l’influenza sull’aria — e dunque la massa deviata — segue lo stesso andamento, da cui la forma affusolata della paletta. Il suo pregio è che, unita alla seconda legge di Newton, restituisce la corretta dipendenza funzionale dell’angolo d’incidenza e della potenza indotta da velocità, carico e quota.

Quanta aria intercetta la paletta? Ragioniamo per proporzioni. A parità di tutto il resto, a velocità doppia intercetta aria doppia: la massa deviata è proporzionale alla velocità. Se la portiamo in quota, dove l’aria è meno densa, a parità di velocità intercetta meno massa: la massa deviata è proporzionale alla densità. E ovviamente è proporzionale all’area dell’ala. In sintesi:

$$\dot{m} \propto \rho S V_0. \quad (2)$$

Attenzione

Un punto tutt’altro che ovvio: per le normali escursioni dell’angolo d’incidenza in volo, la *massa* d’aria intercettata dalla paletta non dipende dall’angolo d’incidenza (né, quindi, dal carico). È la *velocità verticale* v_z a dipendere dall’angolo d’incidenza, non la portata $\dot{m}$. Tenere distinte le due dipendenze è la chiave per non sbagliare i ragionamenti che seguono.

6.1 Mettendo tutto insieme

Abbiamo così due mattoni. La massa deviata $\dot{m} \propto \rho S V_0$ [eq. (2)] dipende da velocità e densità, non dall’angolo d’incidenza. La velocità verticale v_z dipende dalla velocità e dall’angolo d’incidenza. La portanza è il loro prodotto, $L = \dot{m} v_z$. La tabella seguente riassume le proporzionalità.

Tabella 1 – Da che cosa dipendono i due fattori della portanza $L = \dot{m} v_z$.

	Velocità V_0	Angolo d’incidenza	Densità ρ
Massa deviata $\dot{m}$	proporzionale	—	proporzionale
Velocità verticale v_z	proporzionale	proporzionale	—

Con questo schema in mano si leggono senza fatica le manovre quotidiane del pilota, che la descrizione comune lascia oscure.

Nota

Un ponte verso la formula dei coefficienti. Negli altri corsi e in ogni manuale incontrerete la portanza scritta nella forma

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

dove C_L è il *coefficiente di portanza* e S la superficie alare. Non è una descrizione diversa, ma la stessa cosa “impacchettata” in altro modo. Il prodotto $\frac{1}{2} \rho V_0^2$ è la pressione dinamica; moltiplicato per l’area S

dà una forza di riferimento, e C_L è il fattore adimensionale che dice quale frazione di quella forza l'ala effettivamente sviluppa. Il legame con la nostra descrizione è diretto: la nostra $\dot{m} \propto \rho S V_0$ contiene già ρ , S e V_0 , e la dipendenza di v_z dall'angolo d'incidenza si ritrova nel fatto che, finché non si stalla, C_L cresce linearmente con l'incidenza. In breve: $L = \dot{m} v_z$ spiega perché si vola e come cambiano le cose; $L = \frac{1}{2} \rho V_0^2 S C_L$ è la forma con cui si *calcola* nella pratica ingegneristica. Conoscere entrambe, e saperle far parlare tra loro, è il vero obiettivo.

Esempio

Virata a 2g. In una virata corretta a *fattore di carico* 2 — cioè con portanza pari al doppio del peso, $n = L/W = 2$, che approfondiremo trattando le strutture (sez. 19) — il carico raddoppia. A velocità e quota costanti la massa deviata non cambia; per raddoppiare la portanza occorre quindi raddoppiare v_z , e ciò si ottiene raddoppiando l'angolo d'incidenza.

Esempio

La velocità aumenta del 10%. Se l'aereo accelera mantenendo l'assetto, sia $\dot{m}$ sia v_z crescono del 10% e la portanza salirebbe di $1,1 \times 1,1 \approx 1,21$, cioè del 21%: l'aereo salirebbe. Per mantenere la portanza costante il pilota riduce l'angolo d'incidenza efficace a circa l'82,5% del valore iniziale, poiché $1,1 \times 1,1 \times 0,825 \approx 1$.

Esempio

La densità diminuisce del 10% (salita di quota). A parità di velocità, la massa deviata cala del 10%. Per compensare e mantenere la portanza, la velocità verticale v_z deve crescere di circa l'11% (poiché $0,9 \times 1,11 \approx 1$), il che si ottiene aumentando l'angolo d'incidenza efficace di altrettanto.

Nota

Perché l'armamento va sotto l'ala. La grande massa d'aria coinvolta dalla parte superiore spiega un dettaglio progettuale ricorrente: nei biplani l'ala inferiore disturba quella superiore (riduce la pressione sul suo ventre), e per questo l'ala superiore è spesso avanzata. Più in generale, sui velivoli militari serbatoi e armamenti si appendono *sotto* l'ala, dove producono solo un aumento di resistenza parassita; un'ostruzione *sopra* l'ala interferirebbe invece con la portanza. È lo stesso motivo per cui i montanti di rinforzo, storicamente, stanno sotto e non sopra.

7 Produrre portanza richiede potenza

Arriviamo al cuore energetico del problema. Per un pilota, ancor prima che per il progettista, la grandezza decisiva non è la resistenza ma la *potenza*: è la potenza che misura la richiesta sul motore e che fissa i limiti di prestazione. Conviene perciò, contrariamente a molti testi, discutere prima la potenza e poi ricavarne la resistenza.

Potenza, potenza indotta e parassita

La *potenza* è il lavoro compiuto nell'unità di tempo — in pratica, il ritmo a cui si consuma carburante. Per il volo si distinguono due contributi: la *potenza indotta* Π_{ind} , associata alla produzione di portanza (dove leggi “indotto”, pensa “portanza”), e la *potenza parassita* Π_{par} , associata all'urto dell'aria contro il velivolo in moto. La potenza totale è la loro somma, $\Pi_{\text{tot}} = \Pi_{\text{ind}} + \Pi_{\text{par}}$.

7.1 La potenza indotta

Vale la pena distinguere con cura due grandezze proporzionali a $\dot{m}$ ma con ruoli diversi. La portanza è proporzionale alla massa d'aria deviata *per* la sua velocità verticale; l'energia ceduta all'aria, invece, è proporzionale alla massa deviata *per il quadrato* di quella velocità — come per un proiettile di massa m sparato a velocità v , la cui energia cinetica è $\frac{1}{2}mv^2$. Essendo la potenza indotta il ritmo a cui si cede energia all'aria,

$$\Pi_{\text{ind}} \propto \dot{m} v_z^2 = (\dot{m} v_z) v_z \propto L v_z. \quad (3)$$

La potenza indotta decresce con la velocità

A carico costante, la potenza indotta è inversamente proporzionale alla velocità di volo:

$$\Pi_{\text{ind}} \propto \frac{1}{V_0}. \quad (4)$$

Dimostrazione. A peso costante la portanza $L = \dot{m} v_z$ deve restare uguale al peso, quindi L è fissato e per la (3) si ha $\Pi_{\text{ind}} \propto L v_z \propto v_z$. Ma la massa deviata cresce in proporzione alla velocità di volo, $\dot{m} \propto V_0$ [eq. (2)]; affinché il prodotto $\dot{m} v_z$ resti costante deve allora valere $v_z \propto 1/V_0$, da cui $\Pi_{\text{ind}} \propto 1/V_0$. $\square$

È un risultato di grande forza intuitiva: *più l'aereo va piano, più potenza serve per sostenerlo*. Man mano che il velivolo rallenta, bisogna dare sempre più motore e alzare sempre più il muso, finché — a piena potenza e con un grande angolo d'incidenza — si vola “sul rovescio della curva di potenza”. Il senso fisico è che, rallentando, occorre cedere sempre più energia a sempre meno aria.

7.2 La potenza parassita

Volare più veloci, in realtà, richiede più potenza: la (4) non è tutta la storia. La potenza parassita nasce dall'energia persa nelle collisioni con l'aria. L'energia ceduta a ciascuna molecola urtata è proporzionale al quadrato della velocità; il numero di urti nell'unità di tempo è a sua volta proporzionale alla velocità. Il prodotto dà una dipendenza dal *cubo* della velocità:

$$\Pi_{\text{par}} \propto V_0^3. \quad (5)$$

Esempio

Perché raddoppiare la velocità è così costoso. Per la (5), raddoppiare la velocità richiede una potenza parassita *otto* volte maggiore ($2^3 = 8$). È il motivo per cui, per aumentare davvero la velocità di crociera, non basta un motore più grande: bisogna ridurre la resistenza parassita (carrello retrattile, fusoliera più

affusolata, ala migliore). Un motore più potente migliora molto salita e virata, ma sposta di poco la velocità massima.

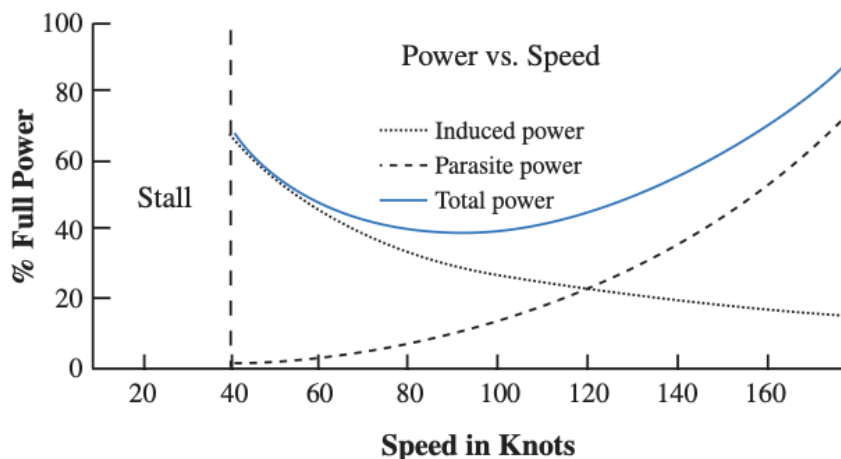


Figura 9 – Potenza impegnata in funzione della velocità: la potenza indotta (inversamente proporzionale alla velocità), la potenza parassita (proporzionale al cubo della velocità) e la loro somma, la potenza totale, con la caratteristica forma a “U”. Il minimo individua la velocità di minima potenza richiesta.

La potenza totale è la somma dei due contributi:

$$\Pi_{\text{tot}} = \Pi_{\text{ind}} + \Pi_{\text{par}} \propto \frac{1}{V_0} + V_0^3. \quad (6)$$

Nota

Consumo specifico. Poiché in crociera domina la potenza parassita, il consumo orario va come V_0^3 ; ma siccome anche la distanza percorsa nell’unità di tempo cresce con V_0 , il consumo *per unità di distanza* (i “chilometri per litro”) peggiora come V_0^2 . È lo stesso motivo per cui un’automobile che a velocità autostradale sembra avere potenza in abbondanza ha comunque una velocità massima non altissima, e perché rallentare un poco in autostrada migliora sensibilmente i consumi.

7.3 L’effetto della quota sulla curva di potenza

Salire di quota agisce in modo *opposto* sui due contributi, ed è istruttivo vederlo con i numeri.

In quota la densità diminuisce, quindi l’ala devia meno aria e, per sostenersi, deve aumentare v_z (e l’angolo d’incidenza). Poiché $\Pi_{\text{ind}} \propto v_z$, la *potenza indotta cresce* con la quota: salendo da circa 900 m a 3 600 m la densità cala di circa il 30% e l’indotta aumenta di circa il 40% (essendo $1/0,7 \approx 1,4$). Per la parassita vale l’opposto: meno densità significa meno collisioni, dunque la *parassita diminuisce* (circa –30% nello stesso salto di quota). Ne segue che in crociera, dove comanda la parassita, conviene volare alti.

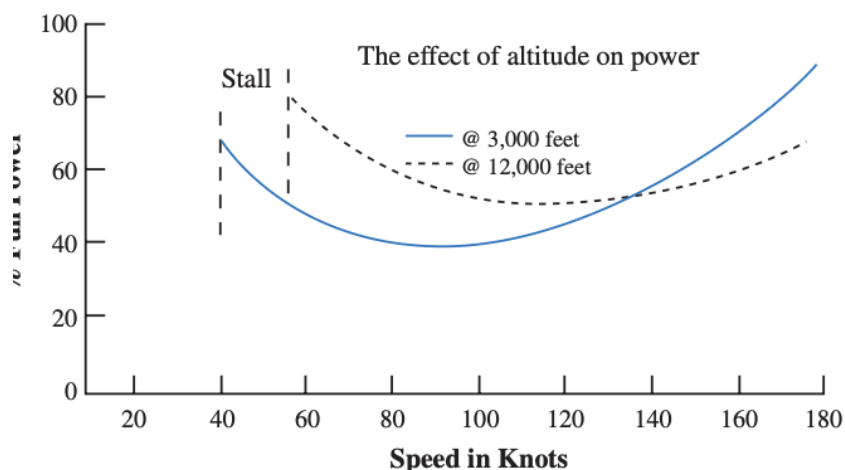


Figura 10 – Curva di potenza totale a due quote diverse. In quota la minore densità fa crescere la potenza indotta (a bassa velocità) ma diminuire la parassita (in crociera); l'intera curva si sposta e con essa la velocità di stallo.

Attenzione

La velocità di stallo aumenta con la quota. Poiché l'angolo critico non cambia con la densità, ma in quota serve un angolo d'incidenza maggiore a parità di velocità, l'angolo critico si raggiunge a una velocità più alta: nello stesso salto di quota la velocità di stallo cresce di circa il 40%. Inoltre, sui motori non sovralimentati anche la potenza disponibile cala in proporzione alla densità (meno ossigeno, meno carburante bruciabile), sicché volare più in alto non si traduce automaticamente in volare più veloci.

8 La resistenza

Capita la potenza, la resistenza si ricava in due righe. La potenza è il prodotto di una forza per una velocità; la resistenza è dunque la potenza divisa per la velocità, $D = \Pi/V_0$. Dividendo per V_0 le (4) e (5) si ottiene l'andamento delle due resistenze:

$$D_{\text{ind}} \propto \frac{1}{V_0^2}, \quad D_{\text{par}} \propto V_0^2. \quad (7)$$

Tabella 2 – Dipendenza di potenza e resistenza dalla velocità di volo.

	Potenza	Resistenza
Indotta	$1/V_0$	$1/V_0^2$
Parassita	V_0^3	V_0^2

Tutto ciò che sappiamo sulla potenza si trasferisce alla resistenza dividendo per la velocità. In particolare, poiché $\Pi_{\text{ind}} \propto L^2$ (lo dimostreremo fra poco), anche la resistenza indotta cresce come il quadrato del carico.

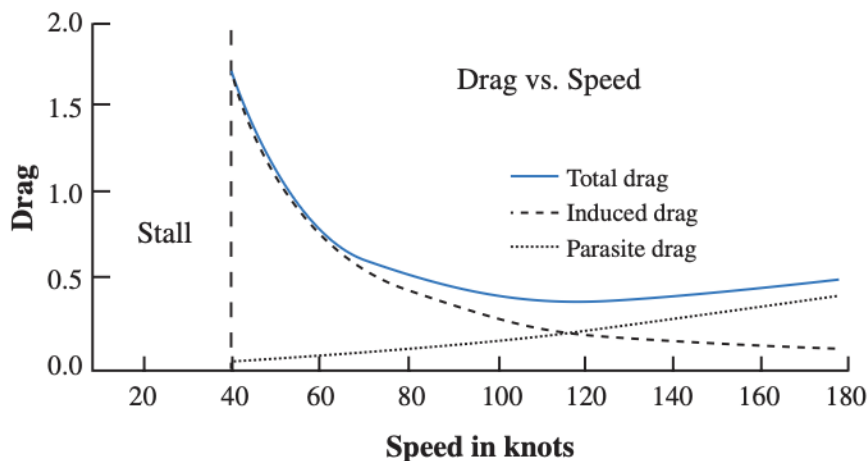


Figura 11 – Resistenza in funzione della velocità: la resistenza indotta (inversamente proporzionale al quadrato della velocità), la parassita (proporzionale al quadrato della velocità) e la totale. Il minimo della resistenza totale corrisponde all'efficienza aerodinamica massima (massima finezza).

Nota

“Resistenza” o “potenza”? Nel gergo dei piloti la parola “resistenza” è onnipresente, ma spesso ciò che conta davvero è la potenza. Un esperimento mentale lo chiarisce. Un aereo con carrello retrattile, a tutta manetta e carrello represso, accelera fino a una certa velocità massima: il pilota dirà che è “limitato dalla resistenza”. Estraiamo carrello e flap lasciando la manetta tutta avanti: resistenza e potenza richieste salgono di colpo e l'aereo rallenta. Si scopre allora che l'aereo si stabilizza alla velocità corrispondente alla *stessa potenza* di prima, mentre la resistenza totale è ora ben maggiore. La velocità massima, cioè, era fissata dalla potenza disponibile, non dalla resistenza: una stessa resistenza “costa” metà potenza se la si vince a velocità doppia.

9 Il rendimento dell'ala e l'allungamento alare

Abbiamo visto che la potenza indotta va come $1/V_0$ a carico fissato e come il quadrato del carico a velocità fissata. Resta da capire come il *progetto* dell'ala influenzi Π_{ind} : in altre parole, qual è il rendimento dell'ala nel produrre portanza.

Il rendimento riguarda la potenza indotta necessaria a produrre una data portanza: meno indotta serve, più l'ala è efficiente. E il modo più diretto per ridurre l'indotta lo conosciamo già: *deviare più aria a minore velocità verticale*. Per la (3), a portanza fissata $\Pi_{\text{ind}} \propto v_z$, dunque conviene massimizzare $\dot{m}$ per minimizzare v_z . Lo si ottiene aumentando la superficie alare — e, soprattutto, a parità di area, allungando l'ala.

Allungamento alare (*aspect ratio*)

L'allungamento alare AR è il rapporto fra il quadrato dell'apertura alare b e l'area in pianta S dell'ala (per un'ala rettangolare, equivale al rapporto fra apertura e corda):

$$AR = \frac{b^2}{S}. \quad (8)$$

A parità di area, un'ala più allungata (con AR maggiore) è aerodinamicamente più efficiente, perché una corda lunga è meno efficace nel deviare aria.

Esempio

Chi ha bisogno di ali allungate. Gli alianti operano a velocità dove domina la potenza indotta: per questo i più prestanti hanno ali estremamente allungate e raggiungono efficienze di 60 : 1 (sessanta metri in avanti per ogni metro di discesa, in aria calma). Anche gli uccelli marini, che devono percorrere lunghe distanze senza posarsi, hanno ali molto allungate; i rapaci, che privilegiano la manovra e la robustezza, le hanno invece corte e tozze.

C'è però un limite. Alle velocità di crociera, dove domina la parassita (che cresce con la superficie), ingrandire l'ala oltre un certo punto non conviene più; e ali molto lunghe sono pesanti e strutturalmente meno robuste. Per questo gli aerei veloci hanno tipicamente ali corte. Un'eccezione storica è l'aereo da ricognizione U-2, dotato di ali lunghissime proprio perché, alle quote estreme a cui operava, la bassissima densità rendeva dominante la potenza indotta anche in crociera.

Nota

Perché un elicottero è meno efficiente, e perché l'aereo non "si appende" all'elica. Il rotore di un elicottero è piccolo rispetto al peso da sostenere: deve quindi accelerare poca aria ad alta velocità (alta energia cinetica), il che è poco efficiente. Per la stessa ragione un aereo normale non riesce a "stare appeso" all'elica: il motore ha pure la potenza per sollevarlo con le ali, ma l'elica accelera troppa poca aria a velocità troppo alta per sostenerlo da sola. Riescono a farlo i convertiplani come il V-22 Osprey, le cui enormi eliche (*proprotori*) deviano moltissima aria.

10 Potenza e carico sulle ali

Esaminiamo ora come la potenza dipenda dal carico sopportato dalle ali — peso del velivolo più eventuali forze d'inerzia, per esempio la forza centripeta in virata. A parità di velocità, ogni aumento del carico va compensato aumentando l'angolo d'incidenza, in modo da imprimere all'aria una maggiore velocità verticale.

La potenza indotta cresce come il quadrato del carico

A velocità costante, la potenza indotta è proporzionale al quadrato del carico sopportato dalle ali.

Dimostrazione. A velocità di volo fissata, la massa d'aria intercettata $\dot{m}$ è costante [eq. (2)]. Per sostenere un carico $L = \dot{m} v_z$ occorre dunque $v_z \propto L$. Per la (3), $\Pi_{\text{ind}} \propto L v_z \propto L \cdot L = L^2$. $\square$

Esempio

Virata a $2g$.

In una virata corretta a fattore di carico $2g$ il carico sulle ali raddoppia. Per il teorema, la velocità verticale impressa all'aria deve a sua volta raddoppiare, e la potenza indotta, proporzionale al prodotto carico $\times$ velocità verticale, *quadruplica*. Una semplice virata stretta quadruplica dunque la spesa di

potenza indotta rispetto al volo rettilineo.

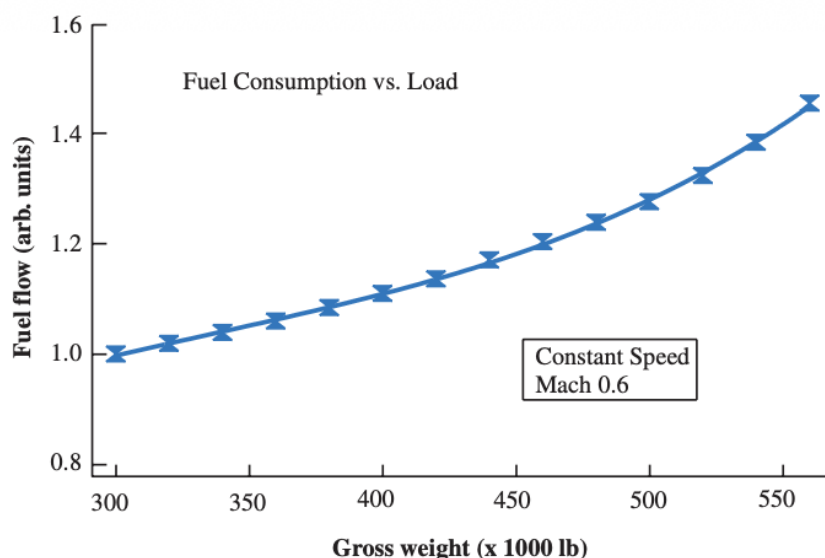


Figura 12 – Consumo di carburante in funzione del carico, da dati reali di un grande aereo da trasporto a velocità costante (consumo ad aereo scarico posto pari a 1). La curva interpolante ha un termine costante (resistenze passive) più un termine quadratico nel carico, in pieno accordo con la previsione newtoniana $\Pi_{\text{ind}} \propto L^2$.

Il consumo di carburante è un ottimo indicatore della potenza totale. Misurato a velocità costante in funzione del peso, su un grande aereo da trasporto, esso si dispone lungo una curva con un termine costante — dovuto alle resistenze passive — e un termine proporzionale al *quadrato* del carico: esattamente l'andamento previsto dall'interpretazione newtoniana. Dai dati si stima, per esempio, che a un peso lordo di circa 227 000 kg e a Mach 0,6 la potenza si ripartisca grossomodo in 40% indotta e 60% parassita.

10.1 Carico e velocità di stallo

L'aumento dell'angolo d'incidenza richiesto da un carico maggiore ha un secondo effetto, meno gradito.

L'angolo critico di stallo non dipende dal carico: è una proprietà del profilo. L'angolo d'incidenza necessario a sostenere il velivolo, invece, cresce con il carico. Poiché la velocità di stallo è proporzionale alla radice quadrata del carico, aumentando il carico aumenta la velocità alla quale l'ala stalla:

$$V_{\text{stallo}} \propto \sqrt{L}. \quad (9)$$

Esempio

Stallo accelerato.

In una virata a 2g il carico raddoppia: per la (9) la velocità di stallo aumenta di un fattore $\sqrt{2} \approx 1,41$, cioè di circa il 40%. È il fenomeno dello *stallo accelerato*: un aereo può stallare a qualunque velocità, perché a ogni carico corrisponde la propria velocità di stallo. I piloti si addestrano espressamente a riconoscere questa eventualità.

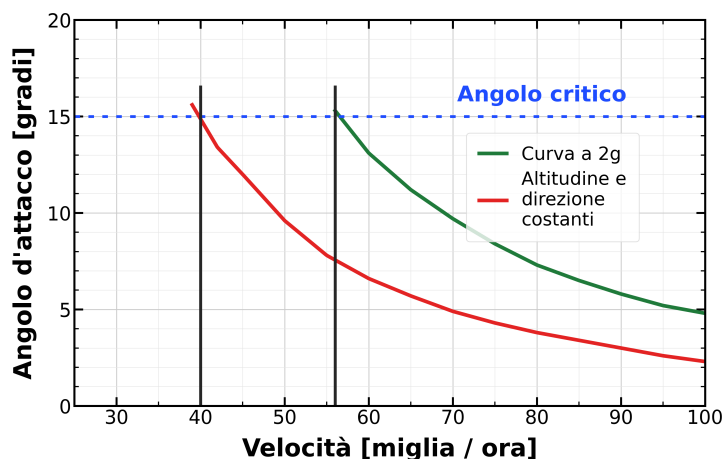


Figura 13 – Angolo d'incidenza in funzione della velocità, a carico costante (volo rettilineo) e a carico raddoppiato (virata a $2g$). L'angolo critico è indipendente dal carico; raggiungerlo a carico doppio richiede una velocità maggiore: la velocità di stallo cresce con la radice del carico.

II Un'obiezione: sostenersi costa davvero lavoro?

Conviene affrontare di petto un'obiezione tanto diffusa quanto istruttiva: “in volo rettilineo e orizzontale l'ala non cambia quota, dunque non compie lavoro contro la gravità; quindi sostenere il velivolo non costa lavoro”. L'errore è sottile, ma c'è.

Nota

L'ala infinita. Nell'aerodinamica bidimensionale classica si dimostra che un profilo non richiede lavoro per produrre portanza e che dietro di esso non vi è *downwash* netto. Ma un profilo bidimensionale è, di fatto, un'ala di apertura infinita: dato che l'efficienza cresce con l'apertura, un'ala infinita devia una quantità infinita d'aria a velocità verticale quasi nulla, ed è perciò infinitamente efficiente. La velocità verticale netta del *downwash* è essenzialmente nulla, e con essa la potenza indotta. È un caso limite ideale: un'ala reale ha apertura finita e v_z non nulla, quindi la potenza indotta *esiste*.

Dimostrazione. Il lavoro è forza per spostamento. È vero che in volo livellato non si compie lavoro contro la gravità; ma si pensi a spingere una cassa pesante su un pavimento piano: pur non sollevandola, si compie lavoro contro l'attrito. La *resistenza indotta* è proprio la forza orizzontale che nasce come conseguenza della portanza e che, come l'attrito della cassa, si oppone al moto. Il lavoro speso per produrre portanza è dunque la resistenza indotta moltiplicata per la distanza percorsa: non nullo. È questo lavoro che la potenza indotta fornisce nell'unità di tempo. □

12 Vortici, scia e circolazione

Il flusso deviato verso il basso che lascia l'ala assomiglia a una lamina fluida — la *lamina di scia* (*downwash sheet*) — la cui forma dipende da come il carico è distribuito lungo l'apertura. Questa distribuzione non è affatto uniforme: in prossimità della radice (l'attacco alla fusoliera) le ali muovono masse d'aria assai maggiori che alle estremità, proprio come suggeriva la forma della paletta.



Figura 14 – La condensazione del vapore acqueo sul dorso dell’ala, durante una manovra ad alto fattore di carico, rende visibile la distribuzione della portanza lungo l’apertura: massima alla radice, decrescente verso l’estremità (la fusoliera interrompe la condensazione lungo la mezzeria).

12.1 Come si arrotola la scia

Nello stesso modo in cui, sopra l’ala, l’aria più veloce piega verso quella più lenta, anche nella lamina di scia la velocità verticale — massima alla radice, minima all’estremità — fa sì che, dopo il passaggio dell’ala, la parte centrale della lamina si pieghi verso le estremità. L’intera lamina finisce per arrotolarsi in *due vortici controrotanti*, uno per ciascun lato della fusoliera. Il tratto più serrato e visibile è il *vortice d’estremità*, dove la portanza varia più rapidamente azzerandosi oltre la punta; il suo nucleo è una sorta di piccolo tornado a bassissima pressione e temperatura, e in condizioni adatte l’umidità vi condensa rendendolo visibile. Non sempre il punto di massima variazione è l’estremità: in atterraggio, con i flap estratti, i vortici più marcati nascono al bordo esterno del flap.

Attenzione

Turbolenza di scia. L’intensità dei vortici di scia cresce con la portanza: un aereo pesante lascia vortici più forti di uno leggero. Per questo, in atterraggio dietro a un velivolo di grandi dimensioni, occorre mantenere una separazione sufficiente perché i vortici abbiano il tempo di scendere e dissiparsi; in caso contrario il velivolo che segue rischia di essere ribaltato. I vortici di scia “scendono” perché, nel riferimento del suolo, ogni loro elemento si muove quasi verticalmente verso il basso.

12.2 La circolazione: conseguenza, non causa

Arriviamo così alla *circolazione*, lo strumento principe dell’aerodinamica matematica — e una delle nozioni più fraintese.

Circolazione

La circolazione è una misura della rotazione netta dell’aria intorno all’ala, osservata nel riferimento in cui l’aria è inizialmente ferma e l’ala si muove. Conoscendo la circolazione si può calcolare la portanza: le due grandezze sono legate. Ma — attenzione — la circolazione è una *descrizione* della portanza, non la

sua *causa*.

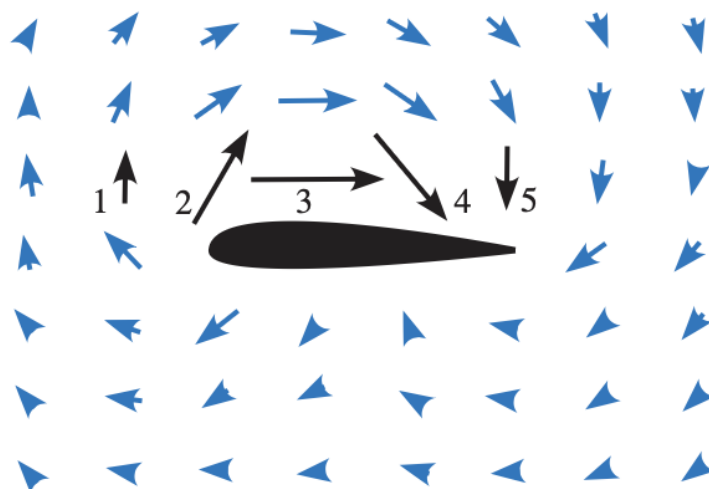


Figura 15 – Istantanea delle velocità dell'aria intorno all'ala nel riferimento del suolo: davanti all'ala l'aria ha una componente verso l'alto (*upwash*), dietro verso il basso (*downwash*); sopra accelera verso il bordo d'uscita, sotto si muove poco. Sommando il vento relativo si ottengono i filetti consueti.

Riprendiamo la nostra “foto da terra”. Aggiungendo a ciascun vettore il vento relativo si ritrovano le linee di corrente con *upwash* davanti e *downwash* dietro. Perché questo schema rotatorio? L'aria, alle velocità ordinarie, si comporta come un fluido incomprimibile: non può creare vuoti. Sopra l'ala la pressione si abbassa e l'aria accelera; questo richiama aria da davanti e la espelle indietro e in basso, e altra aria gira intorno all'ala per riempire. È la stessa circolazione d'acqua che si osserva intorno alla pala di una pagaia: e come quella circolazione non è il “motore” che spinge la pagaia, così la circolazione intorno all'ala non è il motore della portanza.

Nota

La condizione del bordo d'uscita. Resta da capire *quanta* circolazione si instauri attorno a un dato profilo. La risponde un principio fisico semplice, noto come *condizione del bordo d'uscita* (o condizione di Kutta): l'aria non può “girare l'angolo” attorno allo spigolo vivo del bordo d'uscita: lo richiederebbe una velocità infinita. La natura sceglie allora l'unico valore della circolazione per cui le due correnti, quella del dorso e quella del ventre, si ricongiungono *dolcemente* e lasciano il profilo proprio sul bordo d'uscita, senza contornarlo. È questa condizione a fissare la portanza di un profilo assegnato a una data incidenza, e la ritroveremo — richiamata più volte — parlando del volo transonico, dove proprio la necessità di raccordarsi alla pressione del bordo d'uscita fa nascere l'onda d'urto.

Nota

Una conseguenza ad alta velocità. L'effetto più evidente della circolazione è che l'aria si avvicina all'ala *dal basso*: è l'origine dell'*upwash*. A Mach 1 o più, però, l'informazione di pressione non può propagarsi in avanti: l'ala non genera *upwash*. Alle velocità dei piccoli aeroplani, invece, l'*upwash* è ben pronunciato. Si noti infine che quasi tutta l'azione avviene *sopra* l'ala: ecco perché le ostruzioni sul dorso

penalizzano la portanza, mentre sotto disturbano poco.

Nota

Il volo degli insetti. Si è talvolta affermato che la teoria aerodinamica “classica” dimostrerebbe l'impossibilità del volo degli insetti. In realtà quelle affermazioni si appoggiano alla circolazione, che è un modello tagliato sui grandi velivoli e mal si adatta ai piccoli insetti. Gli insetti obbediscono alle stesse leggi della fisica degli aerei: producono portanza soffiando aria verso il basso. Si osservi un'ape che impollina: quando sorvola una foglia, la foglia si abbassa come se l'ape vi si fosse posata.

13 L'effetto suolo

L'*effetto suolo* è l'aumento di rendimento alare che si manifesta quando la distanza dal terreno scende al di sotto, all'incirca, dell'apertura alare, e cresce al ridursi di tale distanza. In atterraggio, su velivoli ad ala bassa, la resistenza indotta può ridursi fino al 50% appena prima del contatto. Lo sfruttano i grandi uccelli che volano radenti all'acqua e i piloti in decollo da piste erbose o cedevoli, che riescono a staccare a una velocità troppo bassa per il volo libero, riducendo la resistenza sulle ruote e accelerando poi fuori dall'effetto suolo.



Figura 16 – Ala lontana dal suolo. La risalita dell'aria al bordo d'attacco (*upwash*) genera sull'ala un carico aggiuntivo diretto verso il basso, che si somma al peso e accresce la potenza indotta necessaria.



Figura 17 – Ala in prossimità del suolo. La vicinanza del terreno ostacola la circolazione sotto l'ala e riduce l'*upwash*: il carico addizionale diminuisce, l'angolo d'incidenza può essere ridotto e la potenza indotta cala. Il rendimento dell'ala aumenta.

A che cosa si deve questa riduzione di resistenza? I contributi sono due, e si sommano. Da un lato il suolo modifica il campo di moto attorno all'ala, che a parità di angolo d'incidenza produce *più* portanza — come se fra ala e terreno aumentasse la pressione — riducendo nel contempo il *downwash*. Dall'altro, poiché a parità di angolo d'incidenza la portanza è maggiore, l'angolo d'incidenza può essere ridotto a parità di portanza, con ulteriore calo del *downwash* e della resistenza indotta.

Attenzione

Un'interazione a tre. Lontano dal suolo la relazione fra portanza, resistenza e *downwash* è lineare e “pulita”. In prossimità del terreno entra in gioco un'interazione azione–reazione a tre fra ala, aria e suolo, talmente intricata che la maggior parte dei testi vi dedica appena un paragrafo: cambia così tanto, allo stesso tempo, che non la si può ridurre a una singola variazione del campo di moto o a un singolo termine di un'equazione.

Esempio

Quanto pesa l'upwash.

Il carico addizionale dovuto alla risalita dell'aria è dell'ordine di due volte il peso del velivolo diviso per l'allungamento alare, $2W/AR$. Per la maggior parte dei piccoli aeroplani AR è compreso fra 7 e 8: in vicinanza del suolo il carico sulle ali può quindi ridursi sensibilmente, e con esso — dato che $\Pi_{\text{ind}} \propto L^2$ — la potenza indotta. È lo stesso sovraccarico che, lontano dal suolo, costringe il Cessna 172 a deviare verso le cinque tonnellate d'aria al secondo invece di poco più di quattro.

14 La portanza di una vela

Un'ultima applicazione mostra quanto sia generale la descrizione fisica. Una barca a vela che procede *in poppa* è semplicemente spinta dal vento: è un altro fenomeno. Ma una barca che *stringe il vento* — per esempio a 45° — obbedisce esattamente alla stessa fisica di un'ala.

La vela ha, per forma e funzione, lo stesso ruolo di un'ala: devia la corrente d'aria e ne riceve in cambio una forza perpendicolare alla direzione iniziale del vento. Gran parte di questa forza, però, è perpendicolare alla direzione di avanzamento della barca: da sola spingerebbe la barca di traverso. Qui entra in gioco la *deriva* (o la chiglia), che è a tutti gli effetti un'ala che “vola” nell'acqua, con angolo d'incidenza regolato dal timone. Pur essendo molto più piccola della vela e con un piccolo angolo d'incidenza, la deriva produce una forza sufficiente perché opera in un fluido circa mille volte più denso dell'aria. La forza sulla deriva, perpendicolare alla rotta in acqua, si combina con quella sulla vela in modo che la risultante punti nella direzione del moto: ed è così che la barca avanza “contro” il vento.

Nota

Il vento apparente. La direzione e la velocità del vento “visto” dalla barca non sono quelle del vento reale: occorre comporre vettorialmente il vento con il moto della barca. Una barca che stringe a 45° un vento reale di 10 km/h viaggiando a 12 km/h percepisce un vento apparente di circa 20 km/h, proveniente da soli 18° rispetto alla prua. Comprendere questa composizione è la chiave anche per l'autorotazione di un elicottero e per le turbine eoliche.

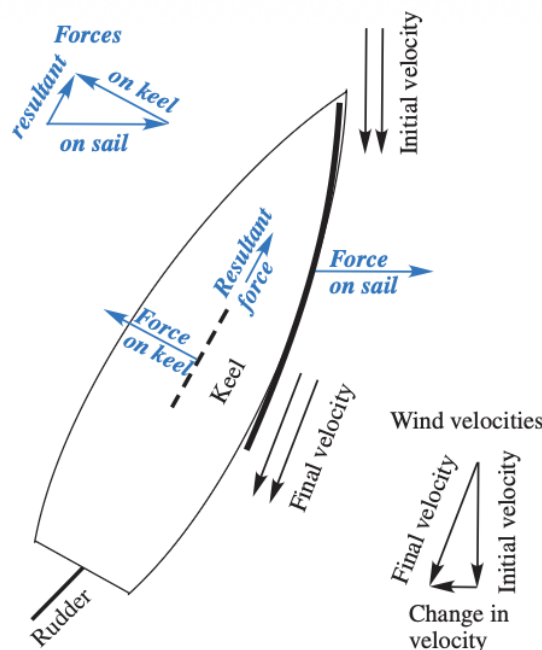


Figura 18 – Forze e velocità su una barca che risale il vento. La vela devia l'aria e ne riceve una forza quasi perpendicolare al vento apparente; la deriva, che è un'ala immersa in acqua, fornisce la componente che, combinata con la forza sulla vela, dà una risultante nella direzione di avanzamento.

15 Dalla fisica del volo al progetto dell'ala

Finora abbiamo costruito una *descrizione fisica* della portanza. Mettiamola ora al lavoro nella direzione opposta: usare quei concetti per capire come si *progetta* un'ala. Conviene tenere a mente la tesi che ci ha accompagnato fin dall'inizio — la forma del profilo non determina la portanza, che dipende in prima battuta dall'angolo d'incidenza (sez. 5) — ma aggiungervi subito la sua naturale conseguenza progettuale: la forma del profilo e la pianta dell'ala determinano invece il *rendimento* e il *comportamento allo stallo*. È su queste due grandezze, non sulla portanza in sé, che si gioca tutto il progetto.

15.1 La scelta del profilo: spessore, bordo d'attacco, curvatura

Prima di disegnare un'ala occorre scegliere un *profilo*, cioè la sua sezione trasversale. Poiché la portanza dipende soprattutto dall'angolo d'incidenza, verrebbe da chiedersi perché non vada bene un profilo qualunque. La risposta sta in tutto ciò che il profilo *non* determina direttamente ma condiziona pesantemente: resistenza, caratteristiche di stallo, estensione del flusso laminare, volume interno disponibile per struttura e combustibile.

È utile, prima ancora, definire l'*angolo di calettamento* dell'ala: la fusoliera ha la minima resistenza quando è allineata al vento relativo, perciò l'ala vi si fissa con un piccolo angolo positivo (pochi gradi nell'aviazione generale), affinché la fusoliera “voli” a incidenza nulla mentre l'ala lavora già a incidenza positiva.

Sullo **spessore** si gioca una tensione classica. Un'ala sottile ha poco volume interno e, storicamente, richiedeva tiranti e montanti esterni per irrigidirsi — con un aumento di resistenza parassita che vanificava il risparmio. Solo verso la fine della Prima guerra mondiale si comprese che le ali più spesse, capaci di contenere la struttura al loro interno, erano complessivamente più efficienti. C'è dunque una competizione naturale fra l'aerodinamico, che vorrebbe l'ala sottile, e lo strutturista, che la vorrebbe “come una bella scatola robusta”.

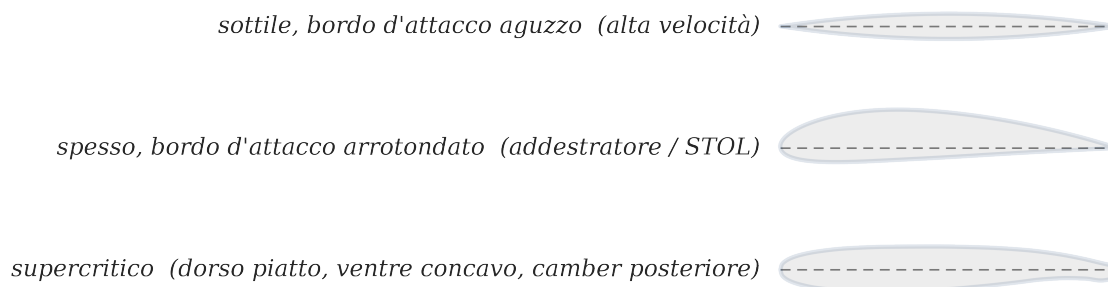


Figura 19 – Tre profili a confronto: sottile a bordo d’attacco aguzzo (alta velocità), spesso a bordo d’attacco arrotondato (addestratore/STOL), supercritico (transonico, dorso quasi piatto). Lo spessore determina il volume strutturale interno e la resistenza; il raggio del bordo d’attacco governa la dolcezza dell’ingresso in stallo.

Nota

Bordo d’attacco e curvatura governano lo stallo. A parità d’altro, maggiore curvatura (camber) significa più portanza massima prima dello stallo, e quindi più carico sostenibile (si riveda la curva di fig. 7). Il *raggio del bordo d’attacco* regola invece la *bruschezza* dello stallo: un bordo aguzzo fa entrare l’ala in stallo di colpo, uno arrotondato in modo graduale, perché il punto di distacco avanza dolcemente dal bordo d’uscita verso il bordo d’attacco al crescere dell’incidenza. Gli addestratori e gli aerei STOL hanno bordi d’attacco tondi e “grassi” (stallo dolce e a bassa velocità); i caccia veloci, come l’F-104, hanno bordi così affilati da tagliare le mani dei meccanici — e uno stallo che arriva quasi senza preavviso.

15.2 Lo strato limite e il distacco

Abbiamo incontrato lo strato limite parlando di effetto Coanda: è il velo sottile, spesso pochi centimetri anche su un’ala grande, entro cui la velocità dell’aria passa da zero (alla parete) al valore della corrente esterna. Per capire il progetto dell’ala dobbiamo aggiungere un ingrediente: l’*energia* di quello strato.

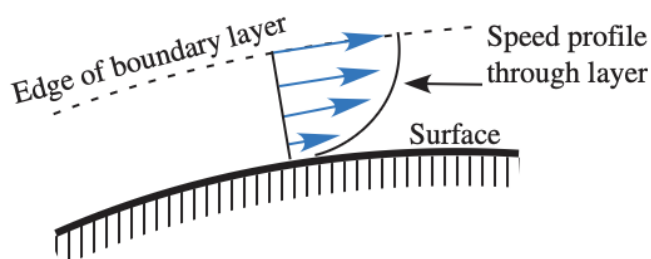


Figura 20 – Profilo di velocità nello strato limite (spessore molto esagerato in figura): alla parete la velocità relativa è nulla per l’attrito viscoso e cresce verso l’esterno fino al valore della corrente. L’aria vicino alla parete ha bassa energia cinetica: è quella più a rischio di distacco.

L’aria vicino alla parete è lenta e dunque povera di energia cinetica. Questo conta perché, percorrendo il dorso, dopo il primo quarto di corda — dove la pressione è minima — l’aria deve risalire verso una pressione

crescente, che al bordo d'uscita torna a quella ambiente. È come una pallina che rotola in salita: se lo strato limite ha energia a sufficienza, segue la superficie; se non ne ha abbastanza, si ferma e *si stacca*.

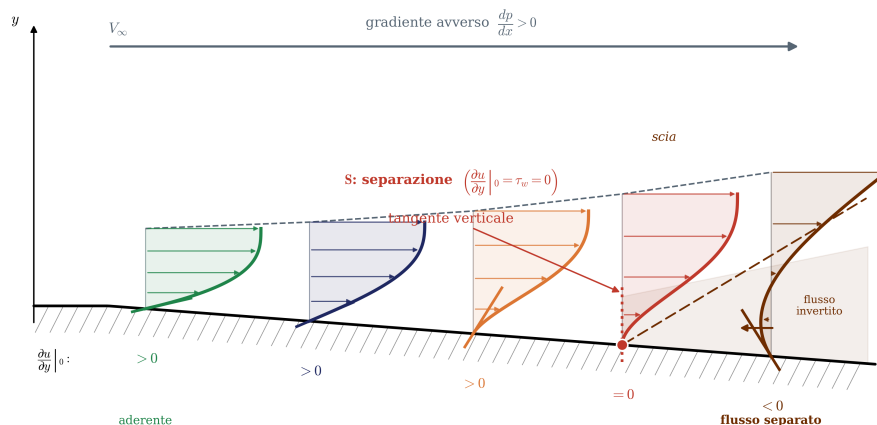


Figura 21 – Il distacco dello strato limite contro un gradiente di pressione avverso. Al crescere dell'angolo d'incidenza il punto di distacco avanza dal bordo d'uscita verso il bordo d'attacco: la portanza cala, la resistenza cresce, l'ala entra in stallo. A valle del punto di distacco compare flusso invertito.

Nota

Lo stallo, finalmente per intero. Avevamo definito lo stallo come il distacco del flusso quando la curvatura richiesta diventa troppo brusca. Ora ne abbiamo la causa energetica: oltre l'angolo critico lo strato limite non ha l'energia per risalire il gradiente di pressione avverso e si stacca, di norma partendo dal bordo d'uscita. Al crescere dell'incidenza il punto di distacco avanza, la portanza diminuisce e la resistenza aumenta. Progettare un'ala che ritarda il distacco significa poter raggiungere un'incidenza maggiore prima dello stallo, e quindi decollare e atterrare più lenti o portare più carico: piste più corte e maggiore capacità di trasporto.

Attenzione

Il ghiaccio sull'ala. Un'ala progettata per stallare dolcemente dal bordo d'uscita può perdere questa qualità in condizioni di formazione di ghiaccio. Il ghiaccio altera la forma del profilo (stallo più brusco e a incidenza minore), aggiunge peso (carico in più, che impone maggiore incidenza) e accresce la resistenza, indotta e parassita. La combinazione può portare l'incidenza richiesta a coincidere con la nuova, ridotta incidenza di stallo: a quel punto l'aereo non vola più.

15.3 Flusso laminare, turbolento e resistenza di forma

Nello strato limite il flusso può essere *laminare* (ordinato, a lamine scorrevoli) o *turbolento* (caotico, rimescolato). Il primo produce molta meno resistenza d'attrito del secondo; un'ala interamente laminare sarebbe ideale, ma è quasi impossibile da realizzare, perché la transizione alla turbolenza è un fenomeno naturale, accentuato da velocità e dimensioni e innescato da rivetti, insetti, gocce di pioggia.

C'è però un risvolto sorprendente: la turbolenza, “energizzando” lo strato limite — cioè rimescolando aria veloce dall'esterno verso la parete — fa sì che il flusso resti aderente più a lungo. Per questo le ali moderne man-

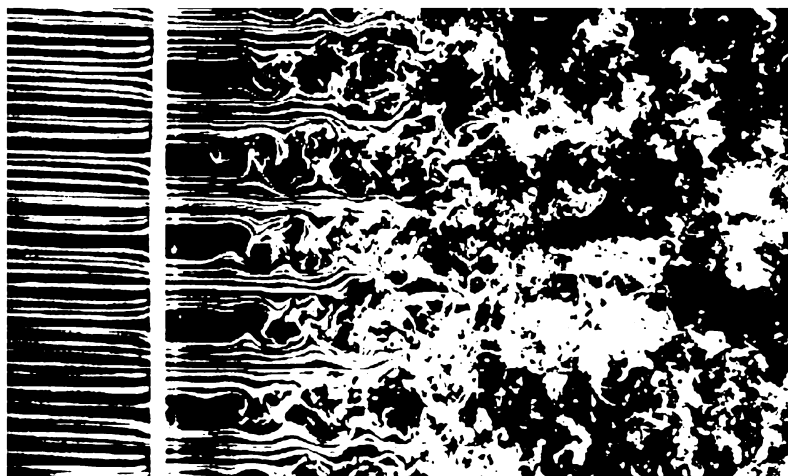


Figura 22 – Transizione da flusso laminare a turbolento: a monte le lamine di fumo sono ordinate e parallele, a valle il flusso diventa caotico. La turbolenza aumenta l'attrito di superficie, ma rimescola aria più energetica verso la parete e ritarda il distacco.

tengono il flusso laminare il più indietro possibile (minore attrito), ma lo lasciano poi transitare a turbolento *prima* che possa staccarsi.

È il momento di distinguere le due componenti della resistenza parassita. Una è l'*attrito di superficie* di cui sopra; l'altra è la *resistenza di forma*, legata alla scia che il corpo si trascina dietro. È quella che istintivamente riconosciamo guardando un'automobile o un camion: più ampia è la scia, maggiore è la resistenza di forma. Su un aereo si cerca di ridurla ovunque, carenando le sporgenze, perché ogni punto in cui l'aria si stacca genera scia. E qui si chiude un cerchio: quando un'ala stalla, alla perdita di portanza si aggiunge un'enorme resistenza di forma dovuta alla scia — proprio mentre servirebbe tutta la potenza disponibile per uscire dallo stallo.

Esempio

La pallina da golf.

È lo stesso principio, capovolto a proprio favore. Una pallina liscia, alle sue dimensioni, avrebbe flusso laminare che si stacca presto, con una scia ampia e molta resistenza di forma. Le *fossette* (dimples) inducono turbolenza nello strato limite: l'aria, più energetica, resta aderente più a lungo, la scia si restringe e la resistenza di forma cala. Risultato: una pallina con le fossette vola molto più lontano di una liscia. (Si confronti con l'effetto Magnus dell'Appendice A: là la rotazione deviava la scia, qui le fossette la restringono.)

Nota

Il numero di Reynolds: perché la scala conta. Quando si dice che la transizione alla turbolenza è “accentuata da velocità e dimensioni”, si sta in realtà parlando del *numero di Reynolds*, il parametro adimensionale che governa il comportamento dello strato limite:

$$\text{Re} = \frac{\rho V_0 \ell}{\mu},$$

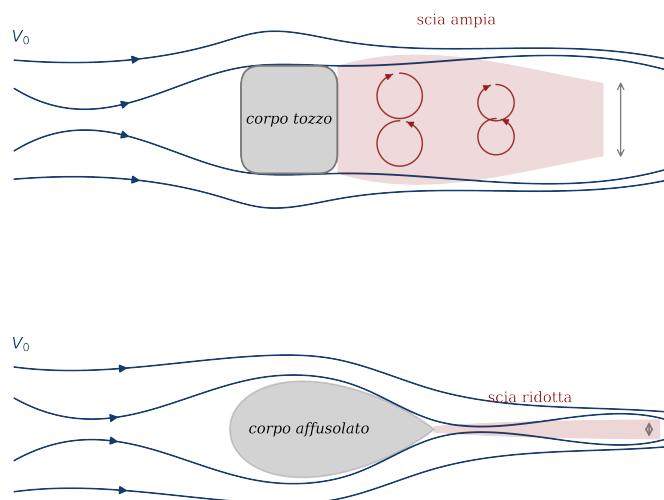


Figura 23 – La resistenza di forma è legata alla scia. Un corpo tozzo, come un camion, trascina con sé una scia ampia e ad alta resistenza; un corpo affusolato riduce la scia. Sul velivolo ogni distacco genera scia: per questo antenne e sporgenze vengono carenate.

dove ℓ è una lunghezza caratteristica (per un'ala, la corda) e μ la viscosità dell'aria. È, in sostanza, il rapporto fra le forze d'inerzia (che tendono a rendere il flusso caotico) e le forze viscose (che tendono a mantenerlo ordinato). A Re bassi domina la viscosità e il flusso resta laminare; a Re alti prevale l'inerzia e subentra la turbolenza. Questo spiega in un colpo solo molti fatti già incontrati: un'ala grande e veloce (Re alto) ha strato limite turbolento; una pallina da golf sta proprio attorno alla transizione, e le fossette bastano a spingerla nel regime turbolento favorevole; un insetto o un aeromodello, piccoli e lenti (Re basso), vivono in un mondo aerodinamico “più viscoso”, in cui l'aria appare densa e appiccicosa come miele — ed è per questo che le loro ali funzionano in modo diverso da quelle di un aereo di linea. Confrontare due situazioni allo stesso numero di Reynolds è ciò che permette di studiare in galleria del vento un modello in scala e trasferirne i risultati al velivolo reale.

15.4 I generatori di vortici

Se uno strato limite più energetico si stacca più tardi, un modo diretto per ritardare lo stallo è energizzarlo deliberatamente. I *generatori di vortici* fanno proprio questo: sono piccole alette piane, perpendicolari alla superficie e disposte a incidenza rispetto al flusso locale, alte quanto lo strato limite è spesso e collocate poco a valle del punto di massima velocità. Rimescolano aria ad alta energia cinetica verso la parete e innalzano l'angolo di stallo.

C'è un prezzo: esercitando una forza sull'aria, i generatori di vortici compiono lavoro senza aggiungere portanza, e quindi costano potenza. Per questo un'ala ben progettata non dovrebbe averne bisogno, e quando si usano è spesso per correggere un problema esistente o per convertire un velivolo in versione STOL — oppure si montano sul bordo d'attacco dei flap, così da nascondersi nell'ala in crociera e comparire solo a flap estesi.

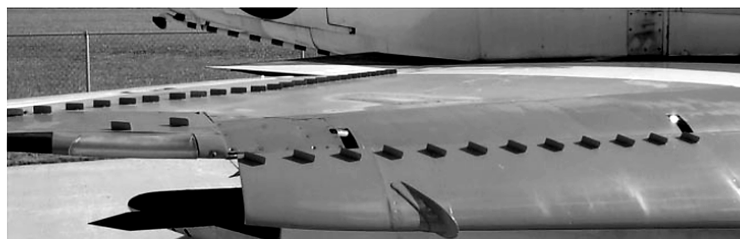


Figura 24 – File di generatori di vortici sul dorso dell'ala (e sullo slat) di un velivolo. Ogni aletta genera un vortice che rimescola aria energetica verso la parete, ritardando il distacco e quindi lo stallo.

15.5 Gli ipersostentatori

Arriviamo ai dispositivi che estendono in modo più diretto la nostra trattazione: gli *ipersostentatori*. Il loro principio, in chiave newtoniana, è limpido: permettere all'ala di *deviare più aria verso il basso senza stallare*. Servono in decollo e atterraggio, dove conviene volare il più lento possibile per usare piste più corte. Si vorrebbe allora un'ala molto ampia e molto curva, che però in crociera avrebbe troppa resistenza: la soluzione è un'ala capace di *cambiare forma*, sostostante in crociera e ipersostentata a bassa velocità.

I flap (bordo d'uscita)

Estendere un flap sul bordo d'uscita equivale ad aumentare la curvatura dell'ala (e, in alcuni disegni, anche la sua superficie). Più curvatura significa maggiore velocità verticale impressa all'aria; più superficie significa più aria deviata: in entrambi i casi, più portanza alla stessa velocità.

I tipi principali, in ordine di sofisticazione, sono il *flap a spacco* (split: si abbassa solo la parte inferiore del tratto posteriore — efficace ma con molta resistenza di forma, usato sui bombardieri in picchiata della Seconda guerra mondiale anche per frenare); il *flap incernierato* (semplice rotazione del tratto posteriore, comune sui velivoli leggeri); il *flap Fowler* (arretra e ruota, aumentando insieme curvatura e superficie — si trova sui Cessna 172 e 182); e il *flap fessurato*.

Esempio

La regola dei 20 gradi.

I primi 20° di estensione del flap aumentano la portanza senza accrescere molto la resistenza: per questo in decollo si usano spesso $10-20^\circ$, per accorciare la corsa. Oltre i 20° , invece, la resistenza di forma cresce rapidamente con poco o nessun guadagno di portanza: ciò aumenta il rateo di discesa, utile in avvicinamento, sicché non è raro atterrare con i flap a 40° .

Il *flap fessurato* (slotted) merita una parola in più, perché usa ciò che abbiamo imparato sullo strato limite. Estendendosi all'indietro e in basso come un Fowler, lascia una fessura fra ala e flap: l'aria del dorso, che vi arriva ormai svuotata di energia, tenderebbe a staccarsi: ma la fessura convoglia sul dorso del flap l'aria del ventre, ancora energetica, che lo mantiene aderente più a lungo. Ripetendo il trucco una o due volte si hanno i flap a doppia e tripla fessura dei grandi jet di linea, capaci della massima portanza al prezzo di meccanismi complicati e pesanti.

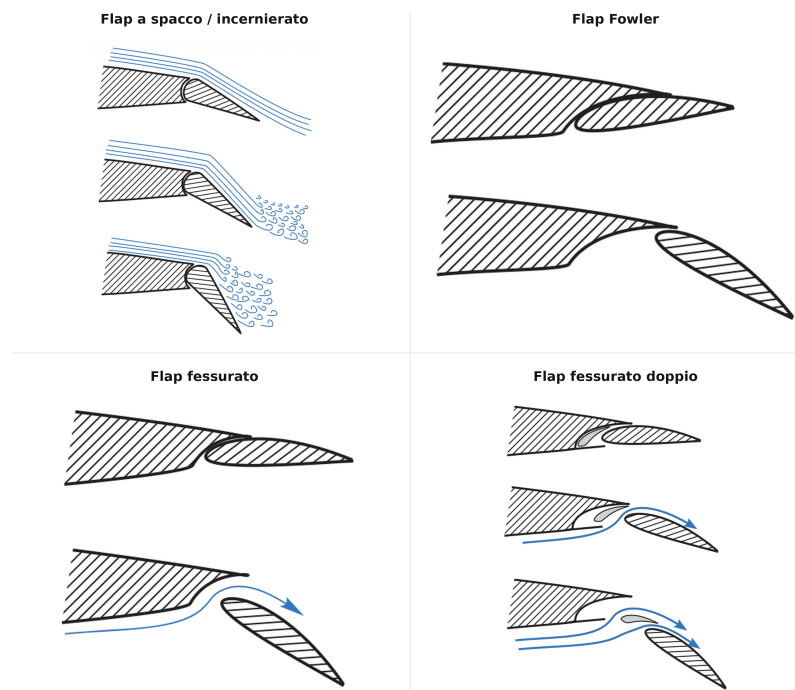


Figura 25 – Quattro tipi di flap a confronto. Il flap a spacco (split) abbassa solo il ventre del tratto posteriore: molta portanza ma molta resistenza di forma. Il flap incernierato aumenta la curvatura. Il flap Fowler arretra e si abbassa, aumentando curvatura e superficie. Il flap fessurato sfrutta la fessura per rienergizzare lo strato limite.

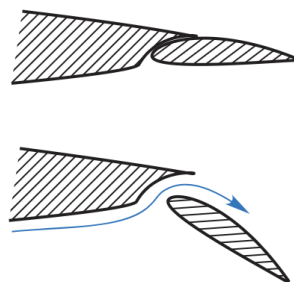


Figura 26 – Il flap fessurato in dettaglio. L'aria del ventre, ad alta energia cinetica, viene convogliata attraverso la fessura sul dorso del flap, dove lo strato limite proveniente dall'ala è ormai povero di energia: così resta aderente più a lungo, ritardando il distacco e aumentando la portanza massima.

Slot e slat (bordo d'attacco)

I dispositivi di bordo d'attacco agiscono diversamente: convogliano l'aria dal ventre al dorso vicino al bordo d'attacco, smussando il picco di depressione. La contropressione netta verso il bordo d'uscita si riduce, lo strato limite risale meglio il gradiente avverso e l'ala stalla a un'incidenza maggiore, con portanza massima accresciuta.



Figura 27 – Dispositivi di bordo d'attacco. Lo *slot* fisso è una fessura permanente che porta aria del ventre sul dorso. Lo *slat* si aggiunge davanti al profilo aumentandone la corda. Lo slat retrattile (Handley-Page) si estende a bassa velocità dando grande curvatura al bordo d'attacco e si ritrae in crociera per non penalizzare la resistenza.

Lo *slot* fisso è una fessura permanente presso il bordo d'attacco; energizza lo strato limite del dorso alle alte incidenze e può innalzare sensibilmente l'angolo critico, ma a costo di resistenza in crociera. Lo *slat* fisso si aggiunge davanti al profilo aumentandone anche la corda. La soluzione al problema della resistenza in crociera è lo *slat retrattile* (Handley-Page), che si estende solo a bassa velocità e alta incidenza — talora automaticamente — e si richiude in crociera.

Nota

Soffio deviato e getto. Un modo più raro di aumentare la portanza a bassa velocità è deviare verso il basso il flusso dell'elica (*soffio deviato*) o lo scarico del motore a getto, per esempio facendo estendere i flap dentro al getto, oppure montando i motori sul dorso dell'ala perché lo scarico ne segua la superficie, con i flap a deviarlo in basso. Sono soluzioni efficaci ma di applicazione limitata.

15.6 La pianta dell'ala

Scelto il profilo, va scelta la *pianta*: il contorno dell'ala vista dall'alto. Quanto grande? Allungata o tozza? A freccia? Rastremata? Le risposte discendono in buona parte da ciò che già sappiamo su rendimento e potenza indotta (sez. 9).

Carico alare

Il primo parametro è il *carico alare*, cioè il rapporto fra peso e superficie alare. Da esso dipendono velocità di stallo, prestazioni di crociera, distanze di decollo e atterraggio.

Tabella 3 – Valori tipici di carico alare per categoria di velivolo.

Tipo di velivolo	Carico alare [N/m ²]
Aliante	30
Aviazione generale (monomotore)	85
Aviazione generale (bimotore)	130
Caccia a reazione	350
Trasporto a reazione	600

Gli addestratori hanno carico alare basso (bassa velocità di stallo, volo più docile); i velivoli veloci lo hanno alto (fino a dieci volte tanto). Un carico alare elevato alza la velocità di stallo ma consente velocità di crociera più alte e rende il velivolo meno sensibile alle raffiche, perché la sua inerzia lo difende meglio dalla turbolenza in aria limpida.

Allungamento, ancora

Sull'allungamento $AR = b^2/S$ [eq. (8)] sappiamo già l'essenziale: ali allungate hanno minore resistenza indotta ma maggiore resistenza parassita, e sono la scelta dei velivoli lenti o d'alta quota (l'U-2). Il progetto, però, aggiunge altri due piatti sulla bilancia. Il primo è *strutturale*: un'ala lunga e sottile richiede più materiale e flette di più; e poiché la potenza indotta cresce come il quadrato del carico [si riveda il teorema in sez. 9], un'ala più corta ma più leggera può ripagare la minore efficienza con un effetto a cascata — ala più leggera, aereo più leggero, ala ancora più piccola. Il secondo è la *manovrabilità*: un'ala tozza rolla più in fretta, vantaggio prezioso per gli acrobatici e i caccia in combattimento manovrato.

Tabella 4 – Allungamento alare di alcuni uccelli (l'esigenza ecologica si legge nella geometria dell'ala).

Uccello	Allungamento AR
Cornacchia	5
Passero domestico	6
Astore	6
Aquila reale	8
Gabbiano reale	10
Sterna comune	12
Albatro urlatore	19

La tabella 4 è una piccola lezione di aerodinamica scritta dall'evoluzione: gli uccelli che volano poco o devono manovrare hanno ali tozze (la cornacchia, l'astore); quelli che percorrono lunghe distanze, specie sull'acqua, hanno ali allungate, con l'albatro urlatore come caso estremo — l'aliante della natura.

Freccia (un anticipo per l'alta velocità)

La maggior parte dei velivoli moderni ha ali *a freccia*. La ragione principale è ridurre la resistenza alle alte velocità di crociera: presso e oltre la velocità del suono la freccia diventa indispensabile per contenere la potenza richiesta, e uno sguardo all'ala di un jet dice già quanto è veloce. La freccia influisce anche sulla stabilità (la freccia all'indietro è stabilizzante, quella in avanti destabilizzante e quindi più manovriera ma difficile da costruire). Sono temi che appartengono propriamente all'alta velocità (sez. 18) e alla stabilità; la freccia, in particolare, la riprendiamo là in dettaglio.

Rastremazione e distribuzione ellittica

Un'ala *rastremata* ha corda minore all'estremità che alla radice. Il motivo strutturale è scaricare l'estremità: un'ala rettangolare ha carico elevato alla punta e quindi un grande momento flettente, che impone una struttura più robusta e pesante. Ma c'è un motivo aerodinamico più profondo, che discende direttamente dalla nostra formula $L = \dot{m} v_z$.

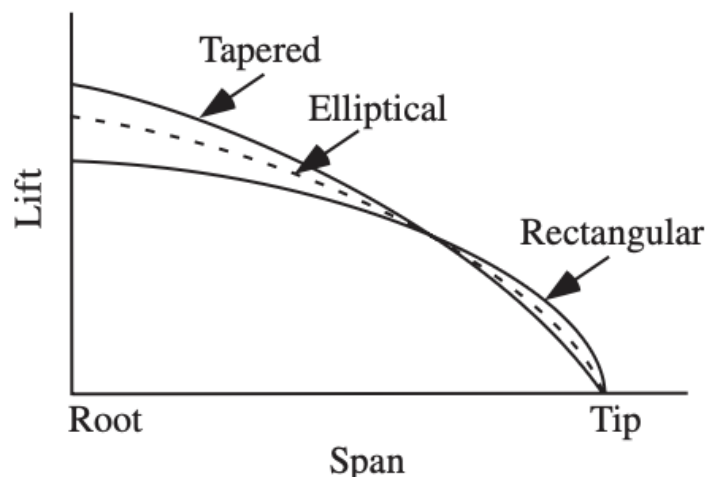


Figura 28 – Distribuzione della portanza lungo l'apertura per tre piante: rettangolare (carico massimo alla punta), ellittica (resistenza indotta minima) e rastremata linearmente (compromesso che scarica la punta). La distribuzione ellittica corrisponde a velocità verticale — e quindi incidenza — costante lungo l'apertura.

Nota

Perché l'ellisse è ottima. Si dimostra, in aerodinamica classica, che la resistenza indotta è minima quando la velocità verticale impressa all'aria — e dunque l'angolo d'incidenza efficace — è *costante* lungo tutta l'apertura. Questo accade quando la portanza si distribuisce in modo *ellittico* dalla radice alla punta, ossia quando l'ala è sagomata in modo che la quantità d'aria deviata cali ellitticamente. È la ragione delle ali ellittiche di caccia come lo Spitfire e il P-47. Oggi sono rare (costose da costruire); sui velivoli veloci, tenuto conto di freccia, diedro, peso strutturale e velocità, si preferisce una distribuzione più triangolare, ottenuta con la rastremazione lineare.

Svergolamento (washout)

Si può modellare la distribuzione del carico anche *svergolando* l'ala, con incidenza maggiore alla radice che all'estremità (washout). Oltre a scaricare la punta, lo svergolamento ha un pregio di sicurezza decisivo: con la radice a incidenza più alta, l'ala *stalla prima alla radice*. Poiché gli alettoni stanno verso l'estremità, il pilota conserva il controllo di rollio anche dopo l'inizio dello stallo, evitando l'autorotazione (la vite). Se stallasse prima la punta, il controllo di rollio si perderebbe proprio nel momento peggiore.

Sui grandi velivoli si preferisce spesso uno svergolamento *aerodinamico*, ottenuto cambiando il profilo dalla radice alla punta (per esempio riducendone la curvatura), così che l'ala si comporti come svergolata pur non essendolo meccanicamente.

Estremità alari e winglet

Anche il disegno dell'*estremità* conta. Un'estremità arrotondata è elegante ma meno efficiente di una squadrata: quest'ultima ostacola meglio il travaso d'aria dal ventre (in sovrappressione) al dorso (in depressione) attorno alla punta, travaso che riduce il rendimento. Per questo gli aerei moderni hanno quasi tutti estremità squadrate.

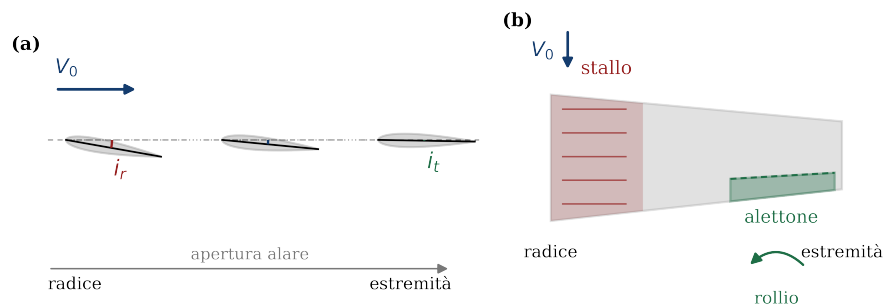


Figura 29 – Svergolamento geometrico (washout): l'incidenza decresce dalla radice all'estremità. La radice stalla per prima, lasciando efficaci gli alettoni all'estremità e preservando il controllo di rollio.



Figura 30 – Una winglet: l'estremità alare rivolta verso l'alto. Bloccando il travaso d'aria dal ventre al dorso attorno alla punta, consente all'ala di portare carico fino all'estremità, aumentando l'apertura efficace e quindi il rendimento senza accrescere l'apertura reale.

Le *winglet* — estremità ripiegate verso l'alto — fanno un passo in più: costituiscono una barriera al travaso e permettono all'ala di portare carico fino alla punta. Come sappiamo, il rendimento cresce con l'apertura (sez. 9); la winglet aumenta l'*apertura efficace*, e quindi il rendimento, senza aumentare l'apertura reale.

Attenzione

Le winglet non sono magia. Il loro effetto migliore equivale, al più, a distendere la winglet sul piano dell'ala, ottenendo altrettanta apertura e superficie. Aggiungono carico all'estremità, e quindi richiedono un'ala più robusta e pesante: non si possono montare su un velivolo esistente senza irrobustire l'ala o ridurne il carico alare. Il loro vantaggio reale emerge quando l'apertura è *vincolata* (un hangar, una piazzola d'aeroporto): allora la winglet compra rendimento dove non si potrebbe allungare l'ala. Si noti infine che, sui jet transonici, la winglet copre solo la parte terminale dell'ala: più avanti il flusso è già vicino al suono e una winglet vi genererebbe un'onda d'urto.

16 Stabilità e controllo

Finora abbiamo chiesto all'ala di produrre portanza; ora chiediamo all'*intero velivolo* di volare in modo docile e prevedibile. Sono due le qualità in gioco, e conviene non confonderle. La *stabilità* è la tendenza del velivolo a tornare alla condizione precedente quando una perturbazione — una raffica, un movimento brusco dei comandi — lo allontana da essa. Il *controllo* è la capacità di comandare al velivolo una manovra, o di mantenere e variare il suo assetto. Questa sezione introduce i fondamenti di entrambi: concetti tanto essenziali quanto, spesso, dati per scontati.

16.1 Stabilità statica: stabile, instabile, neutra

I tre tipi di stabilità statica

Un sistema è *staticamente stabile* se, allontanato dalla sua condizione di equilibrio, tende a tornarvi; *instabile* se tende ad allontanarsene ancora di più; *neutro* se permane nella nuova condizione. L'immagine classica è una pallina: in fondo a una scodella (stabile), in cima a una cupola rovesciata (instabile), su un tavolo piano (neutra).

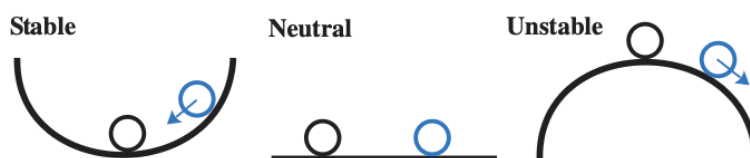


Figura 31 – I tre tipi di stabilità statica. Pallina in fondo a una scodella: spostata, ritorna (stabile). Pallina in cima a una cupola: spostata, fugge via (instabile). Pallina su un piano: resta dove la si porta (neutra). Pareti più ripide della scodella significano stabilità maggiore.

Per un velivolo, stabilità statica significa che, se una raffica ne altera l'assetto, nasce una *forza* (o *coppia*) di *richiamo* che tende a riportarlo nella condizione iniziale. Un piccolo velivolo dell'aviazione generale, ben

equilibrato, torna da solo al volo rettilineo e orizzontale dopo una raffica: esistono casi documentati di piloti addormentatisi senza che l'aereo, privo di pilota automatico, abbandonasse la rotta.

Attenzione

Stabilità non è equilibrio. Un velivolo è in *equilibrio* (“bilanciato”) quando la coppia netta su di esso è nulla: non tende a ruotare attorno ad alcun asse. La *stabilità* è tutt'altra cosa: è la tendenza a *tornare* all'assetto dopo una perturbazione. Un velivolo può essere in equilibrio ma instabile (come la pallina sulla cupola, ferma ma pronta a fuggire). Le due nozioni vanno tenute distinte.

16.2 Stabilità longitudinale ed equilibrio

Cominciamo dall'asse di beccheggio: la *stabilità longitudinale* è la tendenza del velivolo a tornare a un dato assetto di beccheggio quando ne viene allontanato. Per l'equilibrio serve invece che la coppia netta sia nulla, ossia che il *centro di portanza* dell'intero velivolo — somma del contributo dell'ala e di quello dello stabilizzatore orizzontale (il piano di coda) — coincida con il *baricentro*.

Lo stabilizzatore orizzontale è la leva con cui si sposta il centro di portanza: se genera portanza verso l'alto, lo arretra; se “tira” verso il basso, lo avanza. Su gran parte dei velivoli il piano di coda esercita una lieve forza verso il basso: grazie al lungo braccio, basta il 6–8% della portanza dell'ala per equilibrare il velivolo, spostando in avanti il centro di portanza fino a farlo coincidere con il baricentro.

Punto neutro

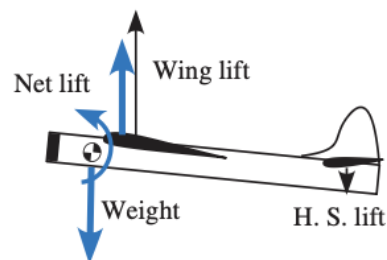
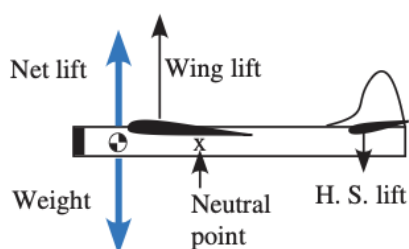
Il *punto neutro* è la posizione più arretrata che il baricentro può assumere mantenendo il volo stabile. Per l'equilibrio, il centro di portanza deve stare sul baricentro; per la stabilità, il centro di portanza deve trovarsi *sul punto neutro o davanti a esso*. In pratica: il baricentro deve stare *davanti* al punto neutro.

Vediamo il meccanismo. Supponiamo che una raffica faccia cabrare il velivolo di qualche grado, aumentando l'angolo d'incidenza. L'ala genera più portanza; ma anche il piano di coda ne risente, e il bilancio fra i due decide la sorte del velivolo.

Condizione di stabilità longitudinale

Il velivolo è staticamente stabile in beccheggio se e solo se il baricentro si trova davanti al punto neutro. In tal caso una perturbazione dell'angolo d'incidenza genera una coppia di richiamo che riporta il velivolo all'assetto iniziale.

Dimostrazione. A seguito della cabrata, la portanza dell'ala cresce *più rapidamente* di quella di coda. Se il baricentro è davanti al punto neutro, l'incremento di portanza dell'ala — applicato dietro il baricentro — produce una coppia a picchiare, che riduce l'incidenza e riporta il velivolo verso l'assetto di partenza: coppia di richiamo, dunque stabilità. Se invece il baricentro è dietro il punto neutro, la stessa coppia tende a far cabrare ancora di più: la perturbazione si amplifica e il velivolo è instabile. □

Stable

⊙ Center of gravity (c.g.)

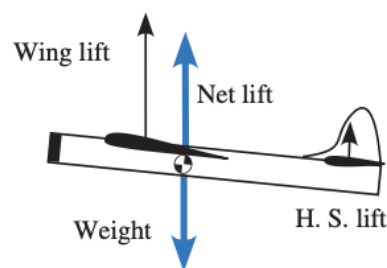
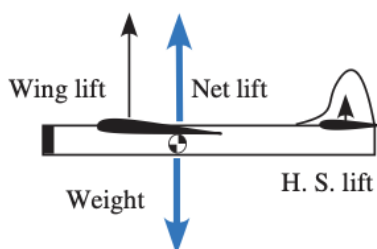
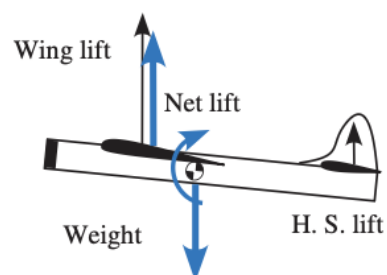
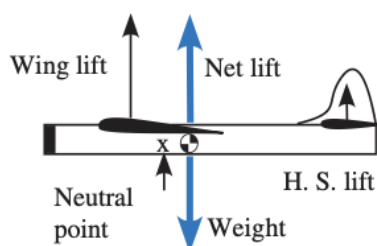
Neutral**Unstable**

Figura 32 – Stabilità longitudinale. In alto (stabile): baricentro davanti al punto neutro; una cabrata accidentale aumenta la portanza dell'ala più di quella di coda, e nasce una coppia di richiamo a picchiare. Al centro (neutro): baricentro sul punto neutro, il centro di portanza non si sposta, nessuna coppia di richiamo. In basso (instabile): baricentro dietro il punto neutro, la perturbazione si amplifica.

Nota

Perché la portanza di coda cresce più lentamente. Sembra strano, dato che la portanza è proporzionale all'angolo d'incidenza efficace per entrambe le superfici. Le ragioni sono due, e le abbiamo già in mano. La prima: il piano di coda ha tipicamente la metà dell'allungamento dell'ala, e sappiamo (sez. 9) che a basso allungamento la portanza cresce più lentamente con l'incidenza. La seconda: il piano di coda vola nel *downwash* dell'ala; quando l'ala aumenta la portanza, aumenta anche il suo downwash, sicché la coda “vede” una variazione d'incidenza minore — per esempio 6° a fronte dei 10° dell'ala.

Attenzione

Il baricentro deve stare davanti al punto neutro. È la regola d'oro della stabilità longitudinale: il velivolo dev'essere “picchiato in avanti”. Se il baricentro finisce dietro il punto neutro, il velivolo *non è governabile*: ogni perturbazione si amplifica e i comandi non rispondono. Per questo il pilota calcola il baricentro prima di ogni volo, in base a carburante, passeggeri e carico: incidenti gravi sono derivati da velivoli caricati con il baricentro troppo arretrato. C'è anche un secondo motivo per il baricentro avanzato: la *ricaduta dallo stallo*. Un velivolo “picchiato in avanti” abbassa il muso da solo allo stallo, riduce l'incidenza e si riprende; uno “picchiato all'indietro” tenderebbe invece a ribaltarsi.

Si ricordi infine la divisione dei ruoli: lo stabilizzatore orizzontale (con il *trim*) provvede alla *stabilità*, mentre è l'*equilibratore* — la superficie mobile già incontrata — a *controllare* il beccheggio.

16.3 Il trim (equilibratura)

Un velivolo deve poter essere equilibrato e stabile per carichi diversi: un aereo di linea con i passeggeri tutti avanti ha il baricentro in posizione ben diversa che con i passeggeri tutti indietro. In entrambi i casi (supponendo il baricentro davanti al punto neutro, quindi stabilità assicurata) occorre *equilibrare* il velivolo, regolando la portanza del piano di coda. Il pilota potrebbe tenere l'equilibratore in posizione con la cloche, ma su un volo lungo sarebbe sfiancante: perciò si *trimma* il velivolo. Una piccola aletta sull'equilibratore (il *trim tab*), o la rotazione dell'intero stabilizzatore sui grandi velivoli, fornisce la forza giusta senza dover tenere i comandi. Quando i passeggeri si spostano e il baricentro migra, si ritocca il trim; quando invece si vuole *cambiare* l'assetto, si agisce sull'equilibratore.

16.4 Le ali volanti

Esistono velivoli privi di piano di coda orizzontale, come il bombardiere B-2 o lo storico Northrop YB-49. Come fanno a equilibrarsi e a restare stabili? Superfici mobili sul bordo d'uscita dell'ala (gli *elevoni*) si muovono *all'unisono* come un equilibratore — spostando avanti o indietro il centro di portanza per equilibrare e stabilizzare — e in modo *differenziale* come alettoni, per il controllo di rollio. Una sola famiglia di superfici svolge entrambe le funzioni.

16.5 Dimensionare il piano di coda

Quanto grande dev'essere lo stabilizzatore orizzontale? La sua efficacia dipende dal *prodotto* dell'area per il braccio (la distanza dall'ala): due configurazioni, una con metà area ma braccio doppio, stabilizzano all'incirca

allo stesso modo (tenendo conto che la coda più lontana risente meno del downwash). La posizione del punto neutro è funzione di questo stesso prodotto $\text{area} \times \text{braccio}$: più esso è grande, più il punto neutro è arretrato, e maggiore è l'intervallo ammesso per il baricentro — cioè la flessibilità di carico. Il rovescio della medaglia è che aumentare area o braccio significa più peso (il nemico del progettista) e più resistenza d'attrito; e un velivolo *troppo* stabile diventa faticoso da far beccheggiare. Dimensionare la coda è dunque un compromesso fra flessibilità di centraggio, peso, resistenza e qualità di pilotaggio.

16.6 Stabilità direzionale

Sull'asse di imbardata, la *stabilità direzionale* dà origine allo stabilizzatore verticale (la *deriva*) e al *timone*, che svolgono in imbardata il ruolo di stabilizzatore orizzontale ed equilibratore in beccheggio. La deriva fa sì che il velivolo si disponga sempre con il muso nella direzione del moto, come una banderuola.

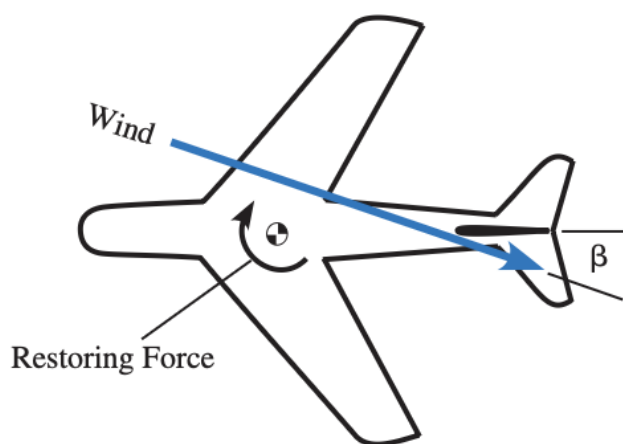


Figura 33 – Stabilità direzionale. Se una raffica imbarda il muso di un angolo β rispetto al vento, la deriva si trova a incidenza non nulla e genera una “portanza orizzontale” di richiamo, che riallinea la coda con la direzione di volo — esattamente come le penne stabilizzano una freccia.

Il dimensionamento della deriva dipende da più fattori. Per un monomotore basta che la coppia dell'area verticale dietro il baricentro superi quella dell'area davanti (la stessa condizione che mette le penne alle frecce). Per un plurimotore è invece l'avaria di un motore a dettarne le dimensioni: la spinta asimmetrica residua tende a far imbardare il velivolo, e serve una deriva ampia (con il trim) a contrastarla — ecco perché i bireattori hanno derive così grandi. Il B-2, privo di deriva, ottiene la stabilità direzionale con la resistenza all'estremità alare: gli alettoni del lato verso cui si vuole ruotare si “sdoppiano” aprendosi sopra e sotto, aumentando la resistenza da quel lato e trascinando il muso.

Nota

Stabilità laterale (di rollio): diedro e freccia. La stabilità attorno all'asse di rollio si ottiene soprattutto con il *diedro*, l'angolo verso l'alto delle ali viste di fronte: se il velivolo s'inclina e scivola di lato, l'ala che scende incontra l'aria a incidenza leggermente maggiore e genera più portanza, raddrizzando il velivolo. Anche la freccia all'indietro (sez. 15) contribuisce a questo effetto. È il motivo per cui gli addestratori moderni richiedono pochissimo timone per coordinare le virate.

16.7 Stabilità dinamica

La stabilità statica dice se nasce una coppia di richiamo; la *stabilità dinamica* dice come evolve nel *tempo* il moto che ne segue.

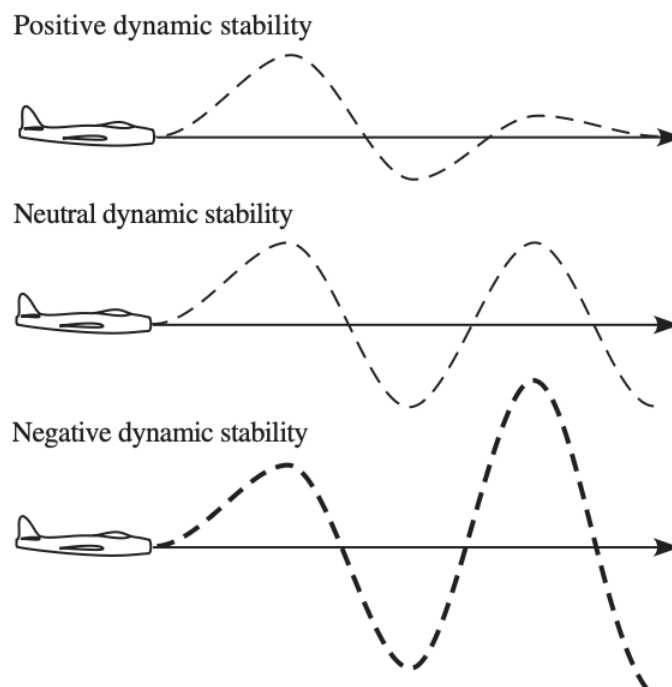


Figura 34 – I tre tipi di stabilità dinamica (caso longitudinale). In alto, dinamica positiva: le oscillazioni di richiamo si smorzano nel tempo (come un’auto con buoni ammortizzatori). Al centro, neutra: ampiezza costante. In basso, negativa: ampiezza crescente. In tutti e tre i casi il velivolo è staticamente stabile (c’è richiamo); cambia solo l’evoluzione temporale.

Si distinguono tre casi: dinamica *positiva* (le oscillazioni di richiamo si smorzano col tempo — come un’auto con buoni ammortizzatori), *neutra* (ampiezza costante — un’auto senza ammortizzatori su un dosso) e *negativa* (ampiezza crescente — un’auto senza ammortizzatori su una strada a “lavandino”). In tutti e tre i casi il velivolo è staticamente stabile: è la risposta nel tempo a fare la differenza. La stabilità dinamica va considerata su tutti e tre gli assi, e gli assi possono *accoppiarsi*, dando moti caratteristici.

16.8 I modi dinamici: fugaide, dutch roll, spirale

Moto fugaide. È lo scambio fra energia cinetica e potenziale — velocità e quota — a incidenza pressoché costante: l’aereo accelera, guadagna portanza e sale, perde velocità, ridiscende, e così via, come un aeroplanino di carta. Il periodo è lungo (dell’ordine dei minuti) e le oscillazioni si smorzano da sole: solo un pilota addormentato dovrebbe preoccuparsene.

Dutch roll. Accoppia rollio e imbardata in un piccolo dondolio “a pattinatore olandese”, a periodo breve. Non è un problema di stabilità serio, ma dà fastidio ai passeggeri in coda; lo si smorza con una deriva ampia o, automaticamente, con uno *smorzatore d’imbardata* (yaw damper).

Instabilità spirale. È un’instabilità accoppiata di imbardata e rollio che porta a una spirale discendente sempre più stretta. Si sviluppa lentamente, tanto che le norme ne ammettono una certa quantità: di nuovo, solo un pilota distratto la lascerebbe peggiorare.



Figura 35 – Il moto fugoide: una lenta successione di salite (con rallentamento) e discese (con accelerazione) a incidenza quasi costante, scambio continuo fra energia cinetica e potenziale. Il periodo, dell’ordine dei minuti, lo rende del tutto gestibile.

16.9 Velivoli instabili e aumento di stabilità

I progetti militari più recenti esplorano velivoli *staticamente instabili*, non pilotabili senza un calcolatore nell’anello di controllo. Tenere in assetto un velivolo instabile è come tenere una matita in equilibrio sulla punta di un dito: impossibile per la lentezza dei nostri riflessi, possibile per un calcolatore che reagisce decine di volte al secondo. Perché volerlo instabile? Per la *manovrabilità* (un velivolo che “vuole” allontanarsi dall’assetto è prontissimo a cambiarlo) e per poter usare piani di coda più piccoli, dunque meno peso e meno resistenza. L’X-29 fu uno dei primi esempi: se il calcolatore si fermasse, diventerebbe istantaneamente ingovernabile. Si parla, in questi casi, di *aumento di stabilità* (stability augmentation): il pilota gestisce la traiettoria, il calcolatore i micro-aggiustamenti rapidi.

16.10 Qualità di volo e comandi elettrici (fly-by-wire)

Le *qualità di volo* (handling) furono quantificate solo dopo la Seconda guerra mondiale; prima ci si affidava al giudizio del pilota (“scattante”, “molle”, “sportivo”), con l’ovvio rischio che lo “scattante” di un asso fosse il “pericoloso” di un principiante. Tra i parametri misurabili: la *forza alla cloche* (quanta forza serve per una data manovra), il *bilanciamento dei comandi* (idealmente la stessa forza per rollio e beccheggio) e l’*imbardata avversa*.

Nota

I comandi elettrici (fly-by-wire). Un tempo le superfici di governo erano collegate alla cloche da cavi, aste e linee idrauliche. Con il calcolatore nell’anello, i comandi viaggiano *via filo*: la cloche invia un segnale, il calcolatore lo traduce (aggiungendo i propri interventi di stabilizzazione) e pilota gli attuatori. Ne derivano effetti notevoli: il calcolatore può impedire di superare l’incidenza di stallo (*protezione dell’inviluppo*), trasformare un atterraggio maldestro in uno morbido, e rendere la “sensazione” dei comandi regolabile via software (con molle e leverismi artificiali che restituiscono al pilota il vecchio ritorno di forza). Si arriva a programmare le qualità di volo di un velivolo non ancora costruito su un altro: le caratteristiche del Boeing 777 furono provate in volo su un Boeing 757 prima che il primo 777

esistesse.

16.11 Quadro d'insieme

Stabilità e controllo sono due facce del buon volo. La stabilità — il ritorno all'assetto dopo una perturbazione, da non confondere con il semplice equilibrio — si declina sui tre assi: longitudinale (baricentro davanti al punto neutro), direzionale (la deriva) e laterale (diedro e freccia). A essa si sovrappone la stabilità *dinamica*, con i suoi modi caratteristici — fugoide, dutch roll, spirale. Sui velivoli moderni il calcolatore è ormai parte integrante del sistema di controllo: stabilizza, protegge l'involuppo di volo e, con i comandi elettrici, arriva a pilotare l'intera traiettoria. È il naturale completamento di tutto ciò che abbiamo costruito: un'ala che genera portanza, un velivolo che la usa per volare in modo sicuro e governabile.

17 La propulsione: come si genera la spinta

Abbiamo visto che un'ala produce portanza deviando aria verso il basso. Un impianto propulsivo funziona con la stessa identica fisica, con un'unica differenza di direzione: per generare *spinta* accelera aria all'indietro. Un'elica e un motore a getto fanno, in fondo, quel che fa un ventilatore domestico. È ancora una volta una questione di leggi di Newton — e questa sezione vuole esserne un'introduzione completa, perché una buona comprensione della propulsione è il presupposto naturale dello studio delle strutture e delle prestazioni.

Conviene tenere distinte due parti dell'impianto: il *motore*, che converte l'energia di un combustibile in lavoro, e il *propulsore* (l'elica, o il getto stesso), che converte quel lavoro in lavoro sull'aria circostante, producendo spinta. Un motore a pistoncini con la sua elica è l'esempio più chiaro di questa separazione; in un turbogetto le due parti sono più difficili da distinguere. Come in tutta la monografia, adotteremo il punto di vista della *potenza* (Π , regolata dalla manetta, misurabile e intuitiva) piuttosto che quello delle sole forze.

17.1 Di nuovo le leggi di Newton: la spinta

Il punto di partenza ideale è il razzo, che pur non essendo un propulsore aeronautico ne incarna il principio allo stato puro: combustibile e *comburente* bruciano in camera di combustione producendo gas ad alta pressione, che accelera fino a uscire dall'ugello ad altissima velocità. La spinta è il rinculo di quel getto, esattamente come il rinculo di un fucile che spara — e si avverte sia che il proiettile colpisca il bersaglio sia che lo manchi (come già osservato a proposito della portanza).

Spinta (bilancio della quantità di moto)

La spinta è la variazione, nell'unità di tempo, della quantità di moto impressa al fluido. Se il propulsore ingerisce ed espelle una portata massica $\dot{m}$, accelerandola dalla velocità di volo V_0 alla velocità di efflusso V_e , la spinta vale

$$T = \dot{m} (V_e - V_0). \quad (10)$$

Quando il getto non è perfettamente espanso, cioè la pressione di efflusso p_e differisce da quella ambiente p_0 , si aggiunge un contributo di pressione sulla sezione di uscita A_e :

$$T = \dot{m} (V_e - V_0) + (p_e - p_0) A_e. \quad (11)$$

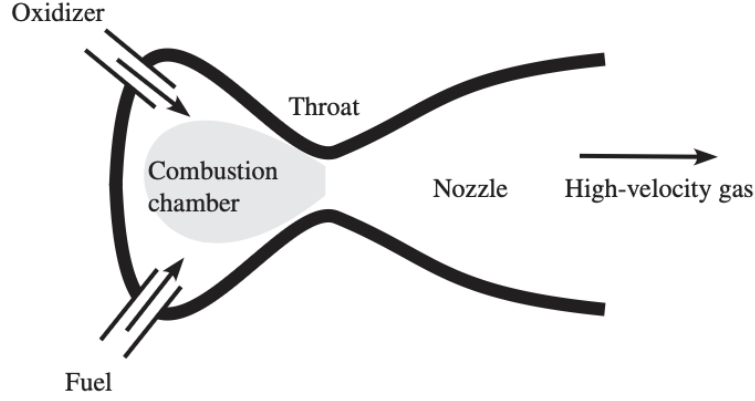


Figura 36 – Schema di un motore a razzo. Combustibile e comburente bruciano nella camera di combustione; il gas accelera attraverso la gola (dove raggiunge Mach 1) e l'ugello, uscendo a velocità ipersonica. La spinta è la reazione all'espulsione del gas.

Nota

Due sole leve, di nuovo. La (10) ha la stessa struttura della legge della portanza $L = \dot{m} v_e$: per aumentare la spinta si può *accelerare più massa* (aumentare $\dot{m}$) oppure *accelerarla di più* (aumentare V_e). Vedremo subito che le due strade, equivalenti per la spinta, non lo sono affatto per il rendimento — ed è questa la chiave di tutta la propulsione.

17.2 Potenza propulsiva, potenza del getto, potenza dissipata

Tradurre la spinta in potenza chiarisce immediatamente perché i motori hanno l'aspetto che hanno. Distinguiamo tre potenze.

Le tre potenze della propulsione

La *potenza propulsiva* (o potenza utile) è la spinta per la velocità di volo,

$$\Pi_p = T V_0 = \dot{m} (V_e - V_0) V_0. \quad (12)$$

La *potenza ceduta al getto* (il lavoro che il motore compie sull'aria nell'unità di tempo) è la variazione di energia cinetica della corrente,

$$\Pi_j = \frac{1}{2} \dot{m} (V_e^2 - V_0^2). \quad (13)$$

La loro differenza è la *potenza dissipata*, cioè l'energia cinetica abbandonata inutilmente nella scia,

$$\Pi_w = \Pi_j - \Pi_p = \frac{1}{2} \dot{m} (V_e - V_0)^2. \quad (14)$$

Dimostrazione. Sviluppando la (13) con $V_e^2 - V_0^2 = (V_e - V_0)(V_e + V_0)$ e sottraendo la (12):

$$\Pi_w = \frac{1}{2} \dot{m} (V_e - V_0)(V_e + V_0) - \dot{m} (V_e - V_0) V_0 = \frac{1}{2} \dot{m} (V_e - V_0) [(V_e + V_0) - 2V_0] = \frac{1}{2} \dot{m} (V_e - V_0)^2.$$

La potenza dissipata è dunque l'energia cinetica residua del getto rispetto alla corrente libera: tanto maggiore quanto più il getto è veloce rispetto al volo. $\square$

Attenzione

Al decollo quasi tutta la potenza è sprecata. Per la (12), a velocità di volo nulla ($V_0 = 0$) la potenza propulsiva è *nulla*, pur essendo la spinta massima: tutta la potenza finisce nella scia. È il motivo per cui si sente dire che “il getto rende di più alle alte velocità”: non è il motore a cambiare, ma la frazione di potenza che diventa utile, che cresce con V_0 .

17.3 Il rendimento propulsivo**Rendimento propulsivo ideale**

Il rapporto fra potenza utile e potenza ceduta al getto dipende solo dal rapporto fra velocità di volo e di efflusso:

$$\eta_p = \frac{\Pi_p}{\Pi_j} = \frac{2 V_0}{V_e + V_0}. \quad (15)$$

Dimostrazione. Dalle (12) e (13), semplificando $\dot{m}$ e $(V_e - V_0)$:

$$\eta_p = \frac{\dot{m}(V_e - V_0)V_0}{\frac{1}{2}\dot{m}(V_e - V_0)(V_e + V_0)} = \frac{V_0}{\frac{1}{2}(V_e + V_0)} = \frac{2V_0}{V_e + V_0}. \quad \square$$

□

La (15) è una piccola perla. Dice che il rendimento propulsivo tende a 1 quando la velocità di efflusso si avvicina a quella di volo ($V_e \rightarrow V_0$): un getto appena più veloce dell'aria che lo investe è quasi perfetto. Ma c'è il rovescio della medaglia: per la (10), se $V_e \rightarrow V_0$ la spinta si annulla. Il progetto vive in questo compromesso — spinta contro rendimento — e lo risolve sempre nello stesso modo.

Esempio**Raddoppiare la spinta: due strade non equivalenti.**

Un progettista vuole raddoppiare la spinta di un motore. Può raddoppiare la velocità di efflusso V_e oppure la portata $\dot{m}$. In entrambi i casi la potenza utile raddoppia. Ma la potenza dissipata (14) va come il *quadrato* dell'eccesso di velocità: raddoppiando V_e essa cresce di circa quattro volte, mentre raddoppiando $\dot{m}$ cresce solo del doppio. Conclusione: per spingere in modo efficiente conviene *accelerare molta aria di poco*, non poca aria di molto. È esattamente il principio per cui un'ala grande è più efficiente, ed è la ragione per cui i motori moderni tendono al turbofan.

Nota

Rendimento termico e rendimento complessivo. Quanto visto è il rendimento *propulsivo*, relativo alla sola conversione del lavoro meccanico in spinta utile. A monte c'è il rendimento *termico* del motore (conversione del combustibile in lavoro meccanico, con le perdite per calore, attrito e ausiliari). Il rendimento complessivo è il prodotto dei due. Per questo un'ala è sempre più efficiente di qualunque motore nel “produrre forza”: grazie alle sue grandi dimensioni devia moltissima aria a bassa velocità, mentre un motore non ha questo lusso.

17.4 L'elica: un'ala che ruota

Un'elica non è altro che un'ala rotante, e alle basse velocità è il propulsore più efficiente: al suo punto di massimo rendimento converte in potenza utile l'84% o più della potenza del motore. Spinge una certa massa d'aria a ogni giro, accelerandola: e poiché sappiamo che conviene accelerare molta aria di poco, *un'elica grande che gira piano è più efficiente di una piccola che gira veloce* — come sanno bene i modellisti con l'elastico.

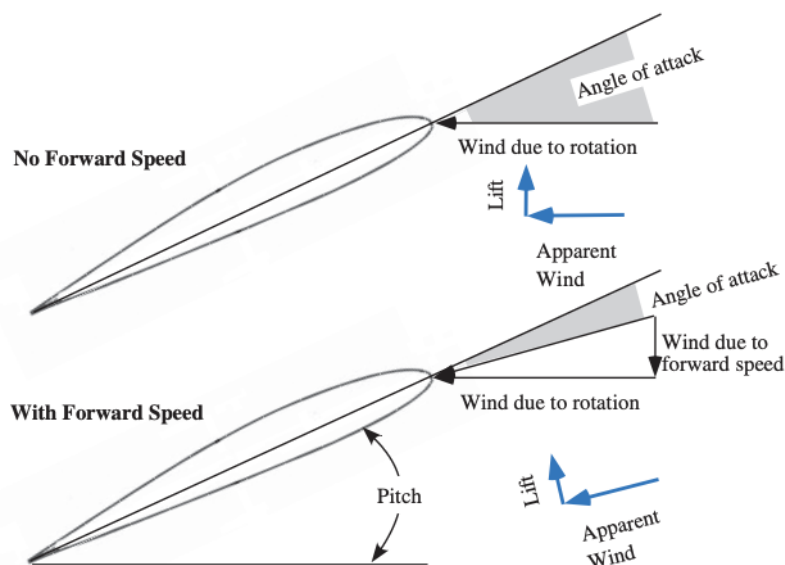


Figura 37 – Angolo d'incidenza di un'elica (un'ala rotante). A punto fisso il vento apparente è dato dalla sola rotazione e l'incidenza è massima; con velocità di avanzamento si compone con il vento dovuto al moto, l'incidenza apparente diminuisce e con essa l'aria deviata. La portanza dell'elica, sempre perpendicolare al vento apparente, si inclina: nasce un'inefficienza che cresce con la velocità.

Dimensioni e regime di rotazione discendono da più vincoli: la luce da terra, l'accoppiamento con il regime del motore (tipicamente fra 2200 e 2600 giri al minuto) e soprattutto il limite di velocità all'estremità della pala, che deve restare sotto la velocità del suono (per rumore e perdite); ne risultano i diametri usuali, dell'ordine di da 180 cm a 195 cm. Gli aerei della Prima guerra mondiale, con motori più lenti ($\approx 1\,600$ rpm), montavano eliche enormi (≈ 255 cm): spingendo molta aria al secondo avevano già un buon rendimento propulsivo, paragonabile a quello odierno — ma il rendimento dei *motori*, quello sì, ha fatto passi da gigante.

La potenza assorbita dall'elica va come il cubo del regime

A passo e velocità d'avanzamento fissati, la potenza trasferita all'aria da un'elica è proporzionale al cubo della velocità di rotazione.

Dimostrazione. Ragioniamo come per la potenza indotta. La potenza ceduta all'aria è proporzionale alla massa deviata per il quadrato della velocità impressa. Raddoppiando il regime (a passo e avanzamento costanti) raddoppiano sia la massa d'aria elaborata sia la velocità che le viene impressa: la potenza cresce dunque di $2 \times 2^2 = 8$ volte, cioè come il cubo del regime. $\square$

È un risultato dalle conseguenze pratiche immediate: la potenza richiesta per far girare un'elica cresce rapidissimamente con il regime, e dimensionare male l'area della pala rispetto al motore lo fa “fuori-giri” (pala

troppo piccola) o gli impedisce di erogare piena potenza (pala troppo grande).

Nota

Più pale, passo, giri costanti. Ciò che conta è l'*area totale* delle pale: a parità d'area, due o sei pale rendono quasi uguale. Si passa a più pale per esigenze di potenza, rumore e vibrazioni, ma ogni pala in più “vede” aria già disturbata e trasferisce potenza un po' meno bene (dove perfino esperimenti con eliche monopala). Il *passo* dell'elica è l'analogo dell'angolo d'incidenza dell'ala: con un'elica a passo fisso il rendimento è ottimo solo in una stretta gamma di velocità, perciò si ricorre all'*elica a giri costanti*, che regola automaticamente il passo per tenere il regime impostato — migliorando di circa il 14% il consumo in crociera e la potenza disponibile al decollo.

17.5 Il motore a pistoni

Un motore a pistoni converte l'energia del combustibile in moto di un pistone, che fa girare un albero e quindi l'elica. La potenza totale è limitata dalla quantità di aria e combustibile che si riescono a immettere nei cilindri: cilindri più grandi, motore più potente. E poiché in quota l'aria è meno densa (meno ossigeno), la potenza cala con l'altitudine — ciò che confina i motori aspirati alle basse quote.

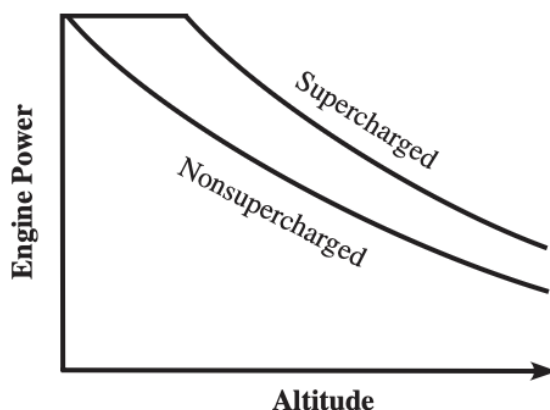


Figura 38 – Potenza del motore a pistoni in funzione della quota, aspirato e sovralimentato. La sovralimentazione (turbocompressore o compressore volumetrico) mantiene la potenza costante fino a una quota oltre la quale la pompa non riesce più a ripristinare la densità al livello del mare.

Per recuperare la potenza in quota si pompa più aria nei cilindri: il *turbocompressore* sfrutta l'energia dei gas di scarico per azionare la pompa; il *compressore volumetrico* la trae meccanicamente dall'albero. In entrambi i casi il motore mantiene potenza costante fino a una quota maggiore.

Attenzione

Il fatto da ricordare. La potenza di un motore a pistoni dipende dalla *quota*, non dalla velocità del velivolo. La spinta dell'elica diminuisce con la velocità, ma la potenza disponibile resta quasi costante fino alle alte velocità. È un comportamento opposto a quello del getto, e — come vedremo nelle prestazioni — cambia il modo in cui i due tipi di velivolo salgono e virano.

17.6 Il motore a turbina, cuore del getto

Il motore a turbina, che sta al centro di ogni motore a getto, è profondamente diverso da quello a pistoni: qui l'energia della combustione è ceduta al getto, non a un pistone. Lo si può immaginare a partire dal razzo: poiché vola nell'atmosfera, dove l'ossigeno abbonda, al razzo si aggiunge un *compressore* che alimenta d'aria la camera di combustione; e per azionare il compressore si pone una *turbina* nello scarico, che ne ricava il lavoro necessario.

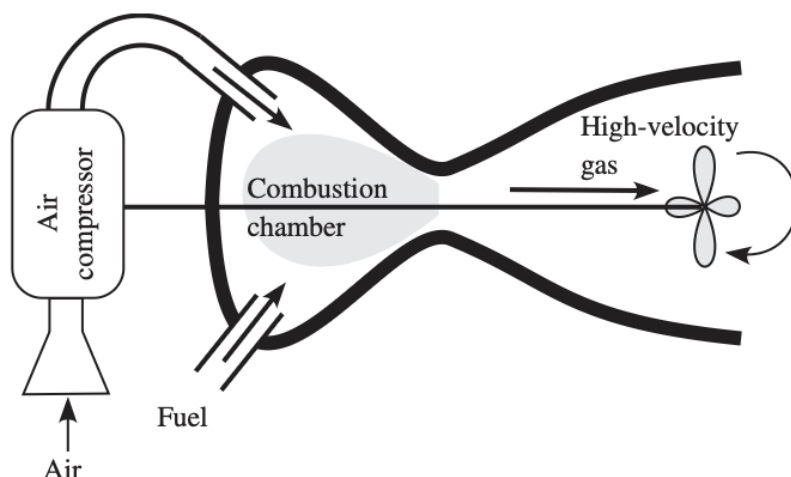


Figura 39 – Schema del motore a turbina. Da sinistra: presa/diffusore, compressore, camera di combustione (burner), turbina, ugello. I tre componenti centrali — compressore, combustore, turbina — costituiscono il “nocciolo” (core); diffusore e ugello lo trasformano in motore a getto.

I tre componenti del nocciolo sono compressore, combustore e turbina; diffusore e ugello, di cui diremo col turbogetto, non appartengono propriamente alla turbina.

Il compressore

Il compressore ha due funzioni: comportarsi da valvola unidirezionale, impedendo ai gas di combustione di rifluire in avanti, e aumentare pressione e densità dell'aria perché il combustibile bruci bene, specie in quota. I grandi motori usano compressori *assiali* (l'aria scorre lungo l'asse); i piccoli, compressori *centrifughi* (l'aria è spinta radialmente, soluzione compatta ed economica ma con una perdita nel rinviare il flusso lungo l'asse).

In un compressore assiale ogni pala è, ancora una volta, un'ala rotante; ma, essendo le pale incanalate in un condotto, l'energia aggiunta si traduce in *pressione* anziché in velocità. Uno stadio è fatto di una schiera rotante (*rotore*, 30–40 pale) seguita da una fissa (*statore*): il rotore energizza l'aria, lo statore la rallenta aumentandone ancora la pressione. L'incremento per stadio è modesto, ma molti stadi in cascata (10–12) portano il rapporto di compressione a 10 e oltre. Non conviene esagerare il salto di pressione di un singolo stadio: le pale, come un'ala sovraccarica, *stallano* (lo *stallo del compressore*), con inversione del flusso. Quando l'aria, comprimendosi, rallenta troppo, si ricorre a più compressori coassiali (bassa e alta pressione) su alberi concentrici: ciascun gruppo turbina-albero-compressore è una *bobina* (spool), e i grandi motori sono tipicamente a due bobine.

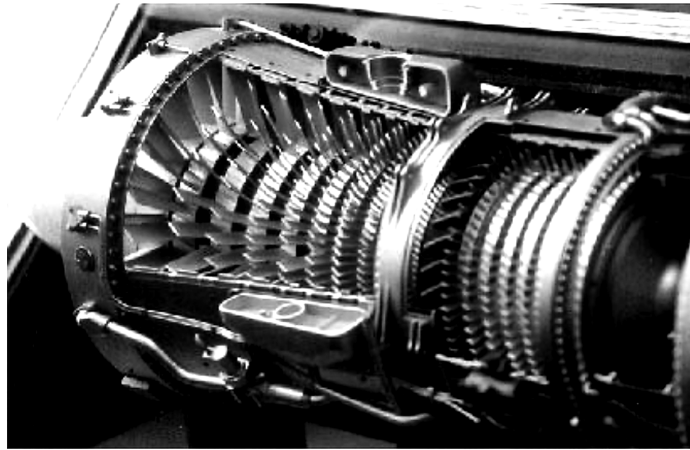


Figura 40 – Stadio di compressore assiale: una schiera di pale rotanti (rotore) seguita da una fissa (statore). Il rotore aggiunge energia all'aria; lo statore la rallenta convertendone la velocità in pressione. Ogni pala è un'ala: troppa compressione per stadio e le pale stallano (*stallo del compressore*).

Il combustore

A valle del compressore il combustibile è iniettato e bruciato in modo *continuo* (a differenza del motore a pistoncini) nel *combustore*, una sorta di focolare. Per il miglior rendimento la temperatura di combustione è tenuta altissima — dell'ordine di $1\,500\text{ }^{\circ}\text{C}$, ben oltre il punto di fusione dell'acciaio ($\approx 1\,300\text{ }^{\circ}\text{C}$): per questo le pareti vanno raffreddate con un velo d'aria di spillamento. Sorprendentemente, gran parte dell'aria ingerita (fino al 75%) serve al raffreddamento, e solo circa il 25% dell'ossigeno è effettivamente bruciato — un fatto che, come vedremo, rende possibili i postbruciatori.

La turbina

La turbina è l'inverso del compressore: l'aria vi si espande e si raffredda, cedendo energia. Una schiera fissa (*distributore*) indirizza i gas sulle pale rotanti, che muovono l'albero del compressore. Poiché qui la pressione passa da alta a bassa, non c'è rischio di stallo e il salto per stadio può essere assai maggiore che nel compressore: bastano dunque meno stadi. Il primo stadio sopporta temperature prossime a quelle del combustore, e le sue pale — cave e percorse da aria di raffreddamento, con minuscoli fori superficiali — sopravvivono grazie a un sottile film d'aria fresca.

17.7 Il turbogetto e il rendimento del getto

Un *turbogetto* è un motore a turbina completato da un *diffusore* a monte e da un *ugello* a valle. Il diffusore “condiziona” l'aria in ingresso portandola alla velocità ottimale per il compressore (tipicamente $\approx \text{Mach } 0,5$) qualunque sia la velocità del velivolo: è in realtà il compressore a “chiedere” la portata, e il diffusore è per lo più passivo (a regime supersonico, però, il suo compito di rallentare l'aria a subsonica diventa cruciale). L'ugello, all'altro estremo, espande il gas fino alla pressione ambiente per farlo uscire alla massima velocità, e quindi alla massima spinta.

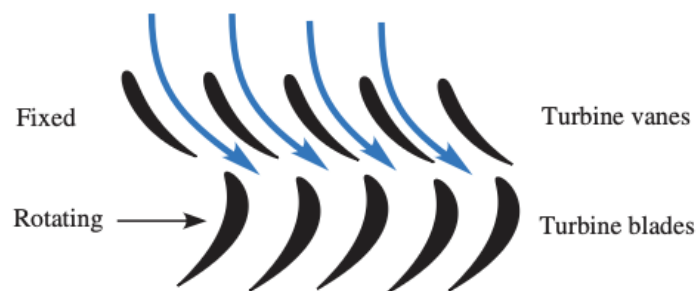


Figura 41 – Stadio di turbina: distributore fisso (turbine vanes) seguito da pale rotanti. Il distributore indirizza i gas caldi sulle pale, che estraggono energia per azionare il compressore. Le pale del primo stadio sono cave e raffreddate a film.

Nota

Perché il turbogetto puro è poco efficiente (e rumoroso). Il turbogetto produce spinta con un getto ad altissima velocità: ma sappiamo dalla (14) che un'alta velocità di efflusso significa molta potenza dissipata — e molto rumore. Inoltre la potenza del motore e la spinta dipendono quasi solo dalla manetta, non dalla velocità: al decollo l'aereo sviluppa piena spinta ma, per la (12), potenza propulsiva quasi nulla; il rendimento propulsivo, praticamente nullo a punto fisso, cresce con la velocità. È proprio qui l'origine della “maggiore efficienza alle alte velocità” del getto. Un vantaggio del turbogetto resta però prezioso: la portata d'aria dipende poco dalla quota, sicché può volare alto — dove la potenza parassita crolla — sviluppando piena potenza.

17.8 Il turbofan

Per massimizzare il rendimento, sappiamo, bisogna accelerare *molta* aria a *bassa* velocità. Il turbogetto puro non lo consente, perché tutta l'aria attraversa il nocciolo. La soluzione è il *turbofan*: gran parte dell'energia del combustore viene estratta dalle turbine per azionare una grande ventola anteriore (un'elica con 30–40 pale), che accelera una grande massa d'aria a velocità modesta.

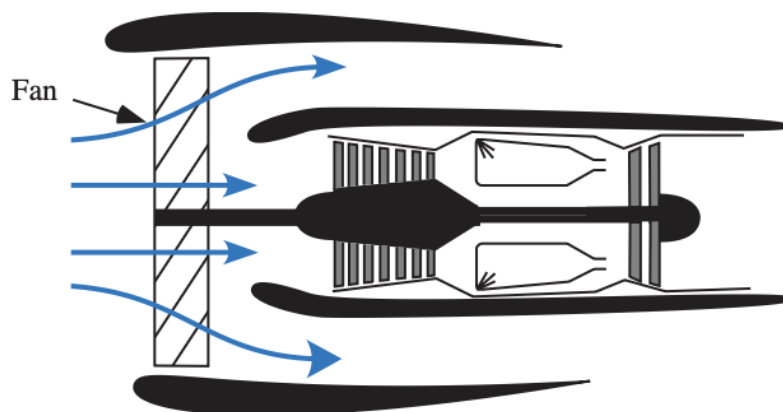


Figura 42 – Schema di un turbofan. La grande ventola anteriore accelera una massa d'aria che per la maggior parte *aggira* il nocciolo (flusso secondario). Il rapporto fra aria che aggira il nocciolo e aria che lo attraversa è il rapporto di diluizione (bypass).

La parte d'aria che attraversa la ventola ma *aggira* il nocciolo definisce il *rapporto di diluizione* (bypass): nei motori odierni è dell'ordine di 8:1 (otto volte più aria intorno al nocciolo che attraverso di esso), e in tal caso circa il 90% della spinta viene dalla ventola e solo il 10% dallo scarico del nocciolo. Il getto più lento è anche assai più silenzioso, e il turbofan offre ai progettisti la leva ideale: aumentare la portata diminuendo la velocità di efflusso. Ciò spiega le dimensioni dei motori dei grandi bireattori, il cui diametro rivaleggia con quello di una fusoliera stretta. I caccia supersonici, all'opposto, usano bassi rapporti di diluizione (spesso sotto 2:1) per contenere l'area frontale.

17.9 Il turboelica

Il *turboelica* segue lo stesso concetto del turbofan, ma la potenza in eccesso aziona un'*elica* anziché una ventola intubata. Poiché l'elica gira troppo lentamente per essere calettata direttamente sull'albero delle turbine, si interpone un *riduttore*; spesso una turbina dedicata (turbina di potenza) fornisce la coppia all'elica, distinta da quella che muove il compressore. Alle basse velocità l'elica batte il turbofan in efficienza; alle alte perde colpi per gli effetti di comprimibilità (che tratteremo parlando dell'alta velocità). I turboelica equipaggiano i regionali e una quota crescente dell'aviazione generale e d'affari: più potenti, a parità di peso, dei motori a pistoncini, e più silenziosi, ma più costosi.

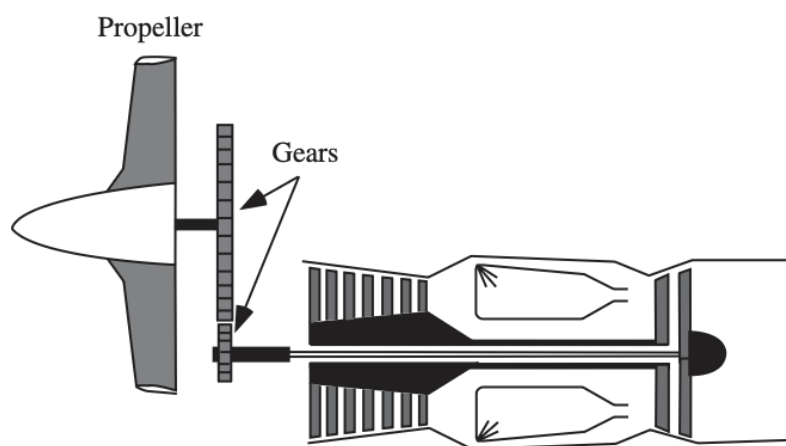


Figura 43 – Schema di un turboelica. Elica a sinistra, investita dalla velocità di volo V_0 ; il nocciolo a destra: compressore C come condotto divergente, camera di combustione superiore (collegamento tratteggiato verso la turbina), turbina come condotto convergente, scarico a destra. Si distinguono due velocità di efflusso: V_{e1} del flusso elaborato dall'elica e V_{e2} dello scarico del nocciolo; la linea tratteggiata inferiore indica il flusso verso l'ugello.

Nota

Due velocità di efflusso. Nel turboelica conviene distinguere la velocità V_{e1} impressa dall'elica al grande flusso esterno e la velocità V_{e2} , ben maggiore, dello scarico del nocciolo. La spinta complessiva è la somma dei due contributi, $T = \dot{m}_1(V_{e1} - V_0) + \dot{m}_2(V_{e2} - V_0)$, ma la quota di gran lunga dominante — ed efficiente, perché a bassa velocità di efflusso — è quella dell'elica.

17.10 Inversori, vettoriamento e postbruciatori

Tre dispositivi completano il quadro, deviando o aumentando il getto.

L'*inversore di spinta* reindirizza in avanti parte del flusso allo sbarco per frenare il velivolo: non fa girare il motore al contrario, ma devia il getto (per esempio con portelli “a conchiglia”). La spinta negativa netta è modesta, ma già la sola resistenza dei grandi motori col getto deviato aiuta a rallentare.

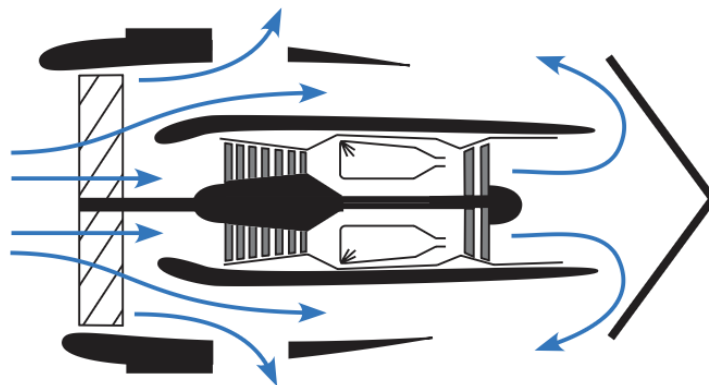


Figura 44 – Inversore di spinta a conchiglia, in posizione retratta e dispiegata. I portelli deviano in avanti il flusso, producendo una componente di spinta negativa che, sommata alla resistenza, decelera il velivolo all’atterraggio.

Il *vettoriamento di spinta* orienta l’ugello in direzioni diverse dall’indietro, per accrescere manovrabilità o consentire il volo stazionario: l’Harrier, con i suoi ugelli orientabili, ne è l’esempio estremo; i caccia moderni lo usano per la manovra.

Il *postbruciatore*, infine, aumenta la spinta iniettando altro combustibile fra turbina e ugello, dove brucia con l’ossigeno rimasto inutilizzato (ricordiamo: solo $\approx 25\%$ è consumato nel combustore). Può accrescere la spinta del 50% e oltre senza appesantire il motore, al prezzo di un consumo elevatissimo e di un rendimento bassissimo (motore “bagnato” acceso, “asciutto” spento). Richiede un *ugello a sezione variabile*, che si apre per non far risalire la pressione a valle della turbina.

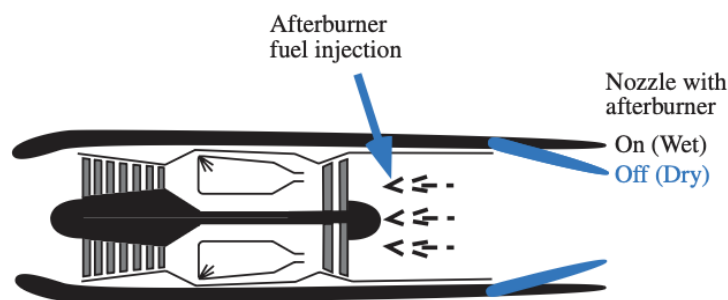


Figura 45 – Postbruciatore con ugello a sezione variabile. Una corona di iniettori, a valle della turbina, brucia l’ossigeno residuo; l’ugello si allarga (configurazione “bagnata”) per accogliere il forte aumento di portata e velocità senza far risalire la pressione a monte.

17.11 Quadro d'insieme

Un'elica e un getto obbediscono alla stessa fisica di un'ala: accelerano aria — all'indietro, anziché verso il basso — e ne ricevono per reazione una forza. Il rendimento è sempre un compromesso fra portata e velocità di efflusso, e si risolve privilegiando la prima: di qui il turbofan, regina dell'efficienza appena sotto la velocità del suono, mentre in regime supersonico torna più conveniente il turbogetto. Resta una differenza di fondo, che tornerà utile nello studio delle prestazioni: la potenza di un motore a pistoni dipende dalla quota e non dalla velocità, mentre la potenza disponibile di un getto cresce con la velocità. È il punto di partenza ideale per affrontare il volo ad alta velocità, dove la comprimibilità dell'aria cambia le regole del gioco — ed è proprio ciò di cui ci occupiamo ora.

18 Il volo ad alta velocità

Caccia, bombardieri e trasporti commerciali volano a velocità ben superiori a quelle dei piccoli aeroplani, e a quelle velocità entra in gioco una fisica nuova: la *comprimibilità* dell'aria. Finora, trattando la portanza, abbiamo considerato l'aria incompressibile, perché alle basse velocità le variazioni di pressione sono modeste. Ma l'aria è comprimibile — come ogni fluido, perfino l'acqua — e quando viene compressa la sua densità cambia. È da questo fatto che discendono le onde d'urto, la resistenza d'onda e il riscaldamento aerodinamico.

18.1 Il numero di Mach e i regimi di volo

Numero di Mach

Il *numero di Mach* è il rapporto fra la velocità di volo e la velocità del suono,

$$\text{Ma} = \frac{V_0}{a}, \quad (16)$$

dove a è la velocità del suono (a 10 000 m di quota circa 1 085 km/h). A Mach 1 il velivolo vola esattamente alla velocità del suono.

Il volo ad alta velocità si suddivide in tre regimi: *transonico* (prossimo a Mach 1: è quello dei trasporti commerciali, dei bombardieri e dei business jet), *supersonico* (oltre Mach 1: caccia e intercettori, spesso per brevi tratti) e *ipersonico* (numeri di Mach elevati: oggi solo lo Space Shuttle al rientro). Un punto sottile ma cruciale: il velivolo viaggia a un solo numero di Mach rispetto all'aria lontana, ma l'aria attorno a esso si muove a velocità diverse, e quindi con *numeri di Mach locali* diversi. Nel volo transonico, parti significative del flusso sono già supersoniche mentre il velivolo è ancora subsonico: è questa coesistenza a renderlo il regime più delicato.

18.2 La portanza resta una reazione (ma l'upwash svanisce)

Conviene ribadirlo subito: anche ad alta velocità la portanza nasce deviando aria verso il basso. Il principio non cambia. Cambia, però, il *modo* in cui ciò avviene davanti all'ala.

Nota

Dove finisce l'upwash. Alle basse velocità esiste una risalita dell'aria davanti all'ala (*upwash*), perché l'aria “riceve l'informazione” dell'arrivo dell'ala alla velocità del suono e fa in tempo a scostarsi (lo

avevamo legato alla circolazione, sez. 12). Man mano che la velocità cresce, l'aria davanti ha sempre meno tempo per spostarsi e l'upwash si attenua. Raggiunto il regime supersonico l'upwash *scompare* del tutto, e davanti all'ala si forma quasi istantaneamente un'onda di compressione: un'onda d'urto.

18.3 L'aria comprimibile

Per capire le onde d'urto serve prima un'idea chiara di come si comporta l'aria quando la comprimibilità conta. Riprendiamo il condotto con strozzatura. Per un fluido *incomprimibile*, alla strozzatura la velocità aumenta e la pressione statica diminuisce, mentre densità e temperatura restano costanti: velocità e pressione vanno in direzioni opposte. Quando però la velocità cresce e le pressioni diventano importanti, la densità non è più costante e il quadro cambia radicalmente.

Attenzione

Il flusso supersonico fa l'opposto. In una strozzatura attraversata da aria *supersonica*, la velocità *diminuisce* e pressione, densità e temperatura *aumentano* — l'esatto contrario del caso subsonico. E c'è di più: l'aria supersonica non può comunicare "a monte" (in avanti, nel riferimento dell'ala) e riesce a comunicare solo per un brevissimo tratto sopra un punto dell'ala. È questa l'origine fisica di tutto ciò che segue.

18.4 Le onde d'urto

Quando l'aria deve cambiare bruscamente velocità o direzione, la compressione può avvenire su una distanza piccolissima, formando un fronte di compressione: l'onda d'urto. Se ne distinguono due tipi.

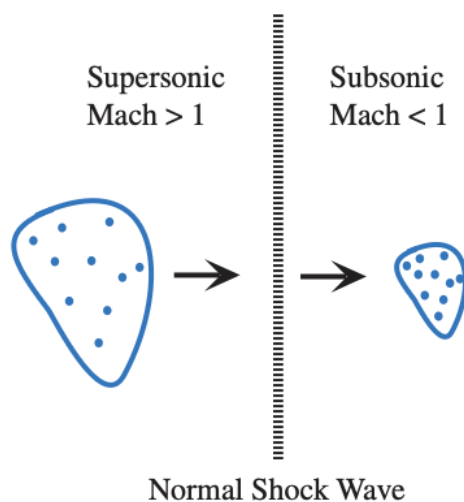


Figura 46 – Onda d'urto normale (perpendicolare al flusso). A monte l'aria è supersonica ($Ma > 1$); a valle è subsonica ($Ma < 1$) e la densità è aumentata. È il tipo d'urto che compare sul dorso di un'ala transonica.

L'onda d'urto normale è perpendicolare alla direzione del moto: a monte l'aria è supersonica, a valle diventa subsonica e più densa. L'onda d'urto obliqua si forma quando l'aria supersonica viene deviata — per esempio

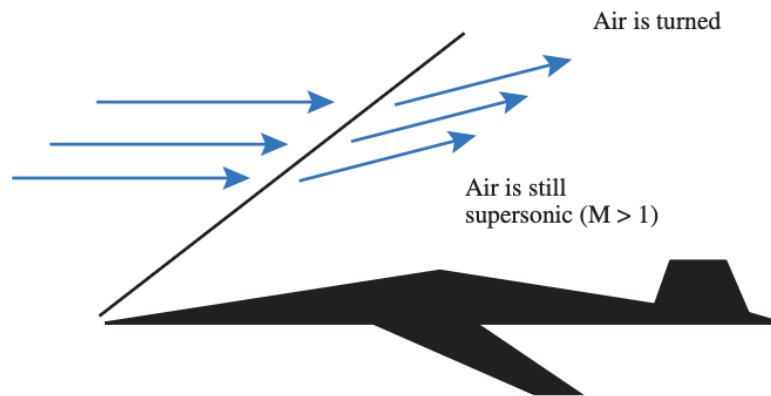


Figura 47 – Onda d’urto obliqua: si forma quando l’aria supersonica deve essere deviata (per esempio al bordo d’attacco). La densità aumenta e la velocità diminuisce, ma non abbastanza da rendere il flusso subsonico: a valle l’aria resta supersonica.

al bordo d’attacco, che essa colpisce senza avere il tempo di scostarsi: a valle la densità aumenta e la velocità cala, ma il flusso resta supersonico.

Nota

Perché i musi supersonici sono affilati. L’urto normale comporta un salto di densità maggiore dell’obliquo, e maggiore è il salto di densità attraverso l’urto, maggiore è l’energia persa nella compressione — cioè la resistenza. I velivoli supersonici sono perciò progettati per *evitare* urti normali: musi e bordi d’attacco affilati producono onde oblique, mentre un muso arrotondato genera un dispendioso *urto di prua* (un urto normale sulla punta, ricordato a un urto obliquo poco più indietro). È l’opposto di quanto serve in regime ipersonico, dove — come vedremo — i musi tornano arrotondati per ragioni termiche.

Un’osservazione che sorprende: il volo supersonico è in realtà più *facile* da analizzare di quello subsonico. I salti di densità, pressione e velocità attraverso un’onda d’urto, per un dato angolo, sono tabulati: nota la geometria del velivolo, angoli e pressioni si ricavano da tabelle, mentre alle basse velocità servono equazioni ben più complicate. Ciò non rende però più facile *volare* supersonici: il prezzo da pagare è la resistenza d’onda.

18.5 Resistenza e potenza d’onda

Sappiamo che più un velivolo è veloce, più aria devia, quindi minore è la velocità verticale necessaria e minore la potenza indotta [eq. (4)]: per i velivoli velocissimi l’indotta è dunque piccola. La parassita, invece, cresce con il cubo della velocità [eq. (5)]. Ad alta velocità si aggiunge ora una terza richiesta: vincere la *resistenza d’onda*.

L’onda d’urto viaggia con il velivolo e si estende per chilometri — il *bang sonico* che si udiva attorno alle basi militari ne è la prova: il velivolo compie lavoro non solo localmente, ma sull’aria lontana chilometri. Di qui un aumento di resistenza e di potenza richiesta.

Nota

Una resistenza che cresce lentamente. A differenza dell’indotta e della parassita, la resistenza d’onda non è una funzione semplice della velocità, ma una funzione complicata del numero di Mach. Per

esempio, raddoppiando il Mach la potenza d'onda può crescere meno di tre volte, mentre la parassita cresce di otto. Il motivo è geometrico: all'aumentare del Mach l'angolo dell'onda obliqua *diminuisce* (l'onda si "corica" all'indietro), e un'onda più inclinata dà meno resistenza; così l'aumento di intensità dell'urto è in buona parte compensato dalla riduzione dell'angolo. Ecco perché i musì e i bordi d'attacco supersonici sono affilati: per generare un'onda obliqua quanto più inclinata possibile. Si noti infine che la resistenza d'onda cresce con la densità: per questo non si vola supersonici a bassa quota.



Figura 48 – Al crescere del numero di Mach l'angolo dell'onda d'urto obliqua diminuisce (l'onda si inclina sempre più all'indietro). Sebbene l'urto diventi più intenso, l'angolo minore fa sì che la resistenza d'onda cresca lentamente con il Mach.

18.6 Il volo transonico e la divergenza della resistenza

I trasporti commerciali volano fra Mach 0,8 e 0,86, appena sotto la velocità del suono. La scelta non è arbitraria: è dettata dalla comparsa della resistenza d'onda. Ma come può esserci resistenza d'onda *sotto* la velocità del suono?

La risposta sta nei numeri di Mach locali. L'aria che accelera sul dorso dell'ala può diventare *localmente supersonica* pur restando il velivolo subsonico. Sul dorso di un'ala subsonica l'aria accelera fino al punto di massima curvatura (pressione minima, velocità massima), poi rallenta verso il bordo d'uscita per raccordarsi alla pressione esterna (la condizione del bordo d'uscita, sez. 12). Su un'ala *transonica*, invece, al punto di massima curvatura l'aria ha già superato Mach 1: non riuscendo più a "richiamare" aria dall'alto (viaggia più veloce del suono), la densità crolla, la velocità continua a crescere — e per raccordarsi alla condizione del bordo d'uscita si forma un'onda d'urto *normale*, oltre la quale il flusso torna subsonico e si *stacca*, con un aumento di resistenza di forma.

Numero di Mach critico e divergenza della resistenza

Il *numero di Mach critico* è la velocità di volo (espressa in Mach) alla quale il flusso diventa per la prima volta localmente supersonico in qualche punto dell'ala. Superatolo, la formazione dell'urto e il conseguente distacco fanno salire rapidamente resistenza d'onda e di forma: è la *divergenza della resistenza* (o *salita di resistenza al Mach 1*), il brusco aumento di potenza richiesta che si manifesta avvicinandosi a Mach 1.

Dove si colloca l'urto? In modo *autoregolante*. Se l'urto si formasse al bordo d'uscita, il salto di pressione che lo attraversa darebbe una pressione superiore a quella del bordo d'uscita: la spinta in avanti risultante supererebbe la resistenza dell'urto, e l'urto avanzerebbe finché le due forze si equilibrano. Aumentando la velocità, l'urto si rinforza e arretra di nuovo verso il bordo d'uscita. È lo stesso fenomeno che si rende visibile nel

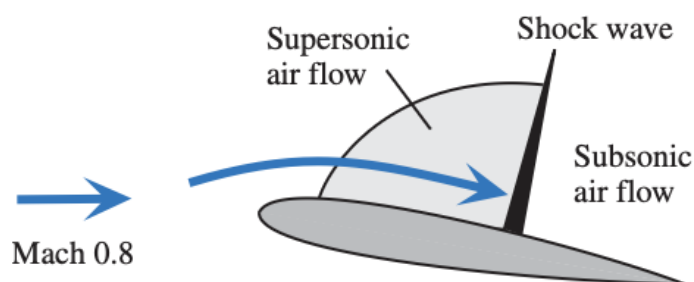


Figura 49 – Profilo transonico (volo a Mach 0,8 circa). L'aria sul dorso accelera oltre Mach 1 formando una zona supersonica chiusa da un'onda d'urto normale; a valle dell'urto il flusso torna subsonico e tende a staccarsi. Il confronto mostra che sul profilo subsonico la velocità, dopo il picco, decresce dolcemente, mentre sul transonico cresce fino all'urto.

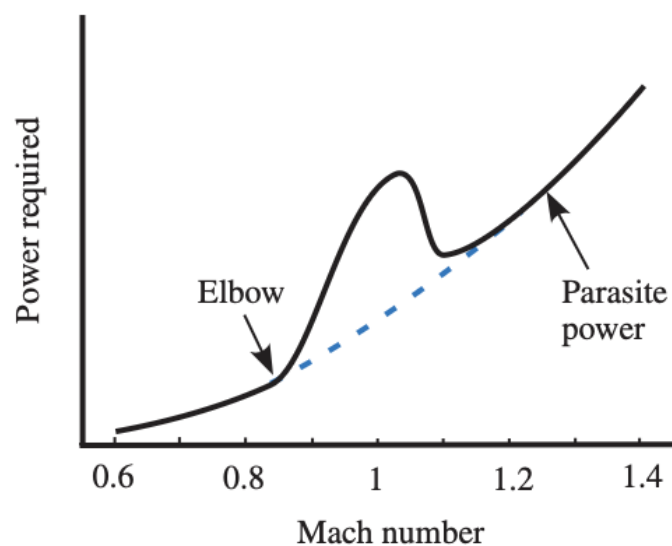


Figura 50 – Salita di resistenza al Mach 1: potenza richiesta in funzione del numero di Mach. Sul fondo c'è la potenza parassita; su di essa si innesta il picco d'onda con il caratteristico "gomito". Il progetto di ala e fusoliera è ottimizzato per operare in corrispondenza del gomito.

cono di condensa sul dorso (e, sui profili quasi simmetrici dei caccia, anche sul ventre) di un velivolo transonico: la faccia piatta posteriore del cono è proprio la posizione dell'urto normale.

Attenzione

Lo spostamento del centro di portanza. In transonico e supersonico la velocità sul dorso cresce fino all'urto, e di conseguenza il *centro di portanza arretra*: dal classico quarto di corda (dove un'ala subsonica genera già metà della portanza) fino a circa metà corda. Poiché (sez. 16) la stabilità longitudinale dipende dalla posizione relativa di centro di portanza, baricentro e punto neutro, un arretramento così brusco è un problema serio. Nei primi tentativi di superare il muro del suono esso faceva picchiare l'ala, che tornava subsonica, vedeva il centro di portanza riavanzare e cabrava di nuovo: un ciclo che si ripeteva fino alla rottura delle ali. L'X-1 vi riuscì grazie a un'ala abbastanza robusta da reggere la transizione.

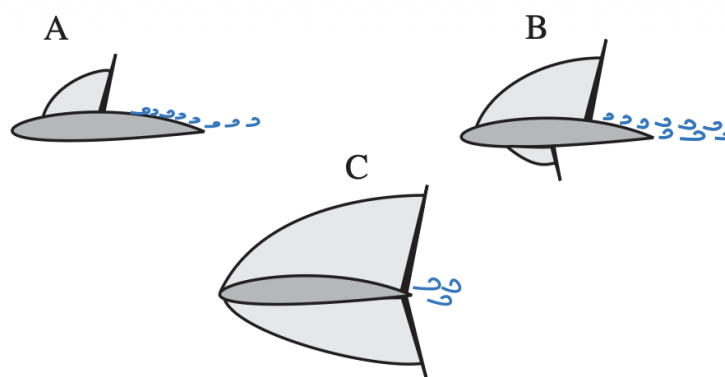


Figura 51 – Evoluzione dell'urto su un profilo transonico a tre numeri di Mach crescenti. In (A) l'aria diventa supersonica solo sul dorso; in (B) anche sul ventre, ma meno; in (C), vicino a Mach 1, gli urti su dorso e ventre raggiungono il bordo d'uscita generando un'ampia scia resistente.

18.7 La freccia alare

Avevamo lasciato in sospeso, parlando del progetto dell'ala (sez. 15), il perché della freccia: eccolo. In regime transonico e supersonico la freccia serve a ridurre la resistenza d'onda, e lo fa abbassando il *numero di Mach efficace* dell'ala — quello che l'ala “vede” perpendicolarmente al proprio bordo d'attacco.

Un'ala diritta incontra la divergenza della resistenza (fig. 50) a un Mach più basso di un'ala a freccia; in supersonico, inoltre, la freccia riduce l'intensità dell'onda obliqua del bordo d'attacco. Per i velivoli supersonici esiste una relazione semplice fra angolo di freccia e Mach di progetto, il cui scopo è mantenere il Mach efficace al bordo d'attacco non superiore a 1: un Mach 2, per esempio, richiede una freccia di circa 60° . Non serve sofisticata intelligence per stimare la velocità di un velivolo avversario: basta guardarne la freccia.

18.8 La regola delle aree

La resistenza d'onda dipende dalle dimensioni del velivolo. Si pensi a un sasso gettato in uno stagno: un ciottolo genera piccole onde, un masso onde ben più grandi e più energetiche. In volo supersonico, più grande è la perturbazione, più energia finisce nelle onde: i velivoli supersonici devono essere sottili e affusolati.

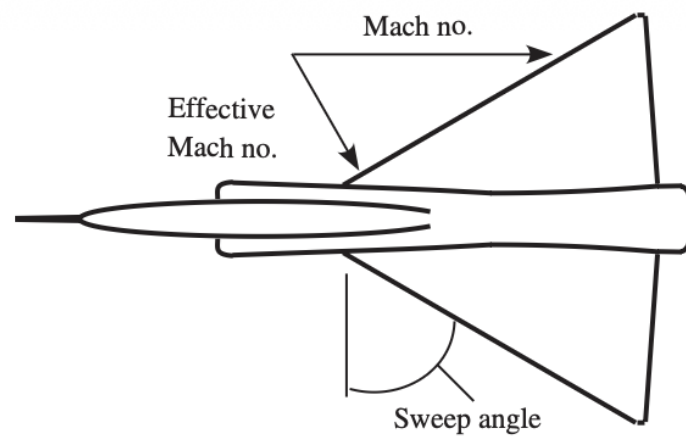


Figura 52 – Numero di Mach efficace su un'ala a freccia: conta solo la componente della velocità perpendicolare al bordo d'attacco. Una freccia maggiore riduce il Mach efficace e ritarda la divergenza della resistenza.

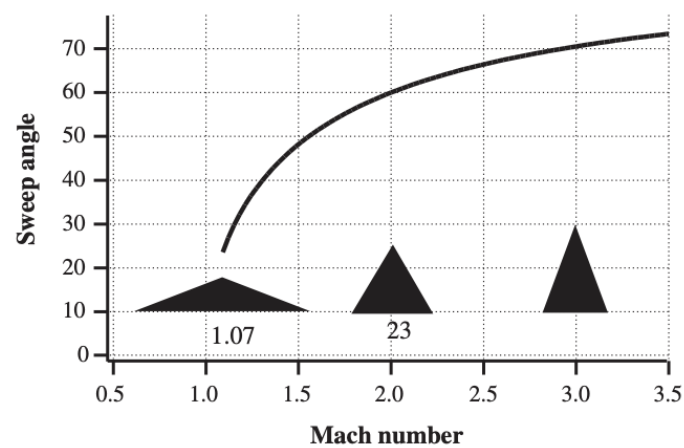


Figura 53 – Angolo di freccia in funzione del Mach di progetto per un velivolo supersonico. La freccia cresce con la velocità per mantenere subsonica la componente perpendicolare al bordo d'attacco.

Regola delle aree (area rule)

Analisi raffinate degli anni Quaranta e Cinquanta mostrarono che la resistenza d'onda è proporzionale all'*area della sezione trasversale* del velivolo (l'area vista di fronte). Poiché in corrispondenza dell'ala la sezione cresce bruscamente — con un'impennata di resistenza — la *regola delle aree* prescrive di “strozzare” la fusoliera in vita, in modo che la sezione totale (fusoliera più ala) resti il più possibile costante lungo l'asse del velivolo.

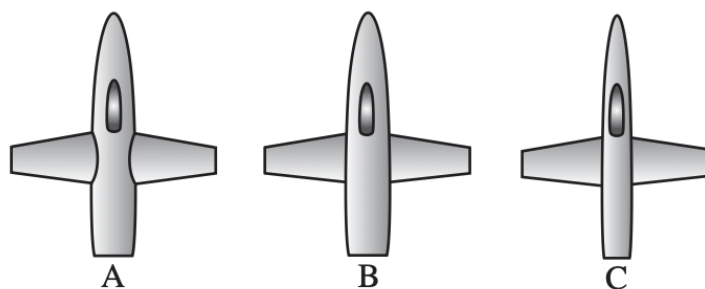


Figura 54 – La regola delle aree. La fusoliera A, con la “vita” in corrispondenza dell’ala, ha meno resistenza d’onda della B (sezione che cresce di colpo all’ala). La C ottiene lo stesso risultato della A, ma con una fusoliera sottile ovunque. La sagoma “a bottiglia di Coca-Cola” è la firma visibile della regola delle aree.

È il principio della tipica fusoliera “a bottiglia” di tanti caccia (il T-38 Talon ne è un esempio manifesto). Una precisazione: per semplicità abbiamo parlato della sezione vista di fronte, ma in realtà la sezione da mantenere costante è quella di un taglio *obliquo*, con un’inclinazione che dipende dal Mach di progetto.

18.9 Volo ipersonico e riscaldamento

Oltre circa Mach 5 accadono due cose. La prima è che l’aerodinamica diventa *indipendente* dal numero di Mach, e l’analisi del volo ipersonico ideale diventa la più semplice di tutte. La seconda è che il trasferimento di energia all’aria è così intenso che la *chimica* dell’aria cambia: ossigeno e azoto assorbono energia e si *dissociano*, con effetti sia sull’aerodinamica sia, soprattutto, sul riscaldamento.

Nota

Newton, di nuovo — e in anticipo di tre secoli. Nel 1687, richiesto di forme migliori per i proiettili d’artiglieria, Newton immaginò che le particelle d’aria urtassero la superficie e poi la seguissero, ricavando quella che oggi chiamiamo *legge del seno quadrato*: un’ottima regola predittiva proprio per l’aerodinamica ipersonica. Newton mirava a un problema a bassa velocità, per il quale la sua legge è errata; ma per l’ipersonico, tre secoli dopo, si è rivelata azzeccata.

Il *riscaldamento aerodinamico* nasce in parte dal salto di temperatura attraverso le onde d’urto, in parte dall’attrito. Al rientro nell’atmosfera lo Space Shuttle viaggia a una velocità di circa 23 000 km/h; in teoria l’aria che investe il muso raggiungerebbe temperature dell’ordine di 20 000 °C (circa quattro volte la temperatura della superficie del Sole), ma la dissociazione e la ionizzazione dell’aria assorbono gran parte di quell’energia

(convertendo calore in energia chimica), e la temperatura effettiva si riduce a circa un quarto — pur restando “solare”. È la ionizzazione a causare il *blackout di rientro*, l'interruzione delle comunicazioni radio.

Nota

Due strategie contro il calore. Le capsule Apollo usavano uno scudo *ablativo*: una superficie che bruciando lentamente sottraeva calore e lo allontanava con i suoi prodotti — efficace ma non riutilizzabile. Lo Space Shuttle usava invece *piastrelle ceramiche*, pessime conduttrici, che irradiano il calore mantenendo costante la temperatura superficiale; dovevano solo essere abbastanza spesse da impedire al calore di raggiungere la struttura d'alluminio prima dell'atterraggio. Si noti il rovesciamento rispetto al supersonico: in ipersonico i muso tornano *arrotondati*, perché occorre materiale a sufficienza per assorbire il calore — una punta affilata brucerebbe.

Il riscaldamento, del resto, non riguarda solo l'ipersonico. Già a velocità supersoniche moderate l'effetto è sensibile: la fusoliera del Concorde si allungava in crociera fino a 25 cm per dilatazione termica; l'SR-71 era progettato con pannelli alari ondulati che si distendevano a caldo, e con serbatoi che a terra, da freddi, perdevano carburante dalle fessure, sigillate poi dalla dilatazione in volo.

18.10 Quadro d'insieme

Le leggi di Newton continuano a descrivere la portanza anche ad alta velocità: si devia aria verso il basso, esattamente come a bassa velocità. Il volo veloce vi aggiunge però una fisica nuova — onde d'urto, resistenza d'onda, riscaldamento — la cui radice comune è una sola: il velivolo viaggia più in fretta di quanto l'aria riesca a trasmettere l'informazione, cioè più veloce del suono. Da qui le onde d'urto, da qui l'arretramento del centro di portanza, da qui la necessità di ali a freccia, fusoliere “a bottiglia” e protezioni termiche. È la stessa fisica della portanza che abbiamo costruito dall'inizio, spinta fino al limite in cui l'aria non può più essere considerata incomprimibile.

19 Introduzione alla struttura dell'ala

Tutto questo lavoro sull'aerodinamica ci ha portati a calcolare, in fondo, una *forza*: la portanza che sostiene il velivolo e i carichi che ne derivano in manovra. Qualcuno, però, quella forza deve reggerla senza rompersi — ed è la struttura. Questa sezione è una porta d'ingresso allo studio delle strutture aeronautiche: non la trattazione completa che svilupperete nel corso dedicato, ma un nucleo di concetti solidi — trave a sbalzo, carico, taglio e momento flettente, sforzo, cassone, torsione, materiali, fatica — su cui quel corso potrà poggiare.

Il punto di partenza ci è già noto. Abbiamo dimostrato che la potenza indotta cresce con il quadrato del carico (sez. 9): c'è quindi un fortissimo incentivo a costruire *leggero*. Ma una struttura leggera deve restare abbastanza *robusta* da portare il carico senza cedere. Tutto il progetto strutturale vive in questa tensione fra leggerezza e resistenza, e il suo obiettivo si riassume in una frase: realizzare la struttura più leggera possibile che soddisfi tutti i requisiti di carico.

Nota

Le ali non cadono. Uno sguardo alla storia degli incidenti mostra che, dalla metà degli anni Trenta, i cedimenti strutturali in volo sui velivoli commerciali sono rarissimi, e oggi quasi inesistenti anche sui

velivoli leggeri. Quando un rapporto d'incidente cita un “cedimento strutturale”, spesso è come dire che “l'auto è precipitata dalla scogliera e nell'impatto ha subito danni strutturali”: il cedimento è la conseguenza, non la causa. Al prossimo volo, guardando le ali oscillare nella turbolenza, si può stare tranquilli: non si staccheranno.

19.1 Fattore di carico, carico limite e carico ultimo

Per dimensionare una struttura bisogna prima sapere *quanto* carico dovrà reggere. La grandezza chiave è il *fattore di carico*.

Fattore di carico

Il fattore di carico n è il rapporto fra la portanza sviluppata e il peso del velivolo,

$$n = \frac{L}{W}. \quad (17)$$

In volo rettilineo e orizzontale $n = 1$ (si dice “1g”). In manovra la portanza deve superare il peso e $n > 1$: in una virata corretta a 60° di inclinazione, per esempio, $n = 2$.

I velivoli si progettano per requisiti di carico precisi, fissati dalle norme. Un grande aereo da trasporto deve sopportare un *carico ultimo* di manovra pari a 2,5 g: l'ala, cioè, deve reggere due volte e mezzo il peso massimo in qualunque manovra. Un velivolo acrobatico arriva a 6 g. Su questo valore si applica poi un *coefficiente di sicurezza* di 1,5.

Carico limite e carico ultimo

Il *carico limite* è il massimo carico atteso in servizio: fino a esso la struttura non deve subire deformazioni permanenti. Il *carico ultimo* è il carico limite moltiplicato per il coefficiente di sicurezza (tipicamente 1,5): fino a esso la struttura non deve *rompersi*, pur potendosi deformare in modo permanente. Per un trasporto con carico limite di manovra 2,5 g, il carico ultimo corrisponde dunque a $2,5 \times 1,5 = 3,75$ volte il peso.

Nota

L'inviluppo di volo. I limiti di fattore di carico, in funzione della velocità, si rappresentano nel cosiddetto *diagramma di manovra* (o inviluppo $V-n$): una regione entro cui il volo è strutturalmente sicuro, delimitata in basso e in alto dai fattori di carico ammissibili e, a sinistra, dalla curva di stallo. È uno strumento centrale del corso di strutture e delle prestazioni; qui ci basti sapere che esiste e che traduce i numeri appena visti in una “busta” operativa.

19.2 L'ala come trave a sbalzo

La struttura più semplice è una *trave*. Un tronco gettato attraverso un fiume è una trave appoggiata; se però il tronco non raggiunge l'altra sponda, si ottiene una *trave a sbalzo* (un trampolino). Un'ala è, nella sua essenza,

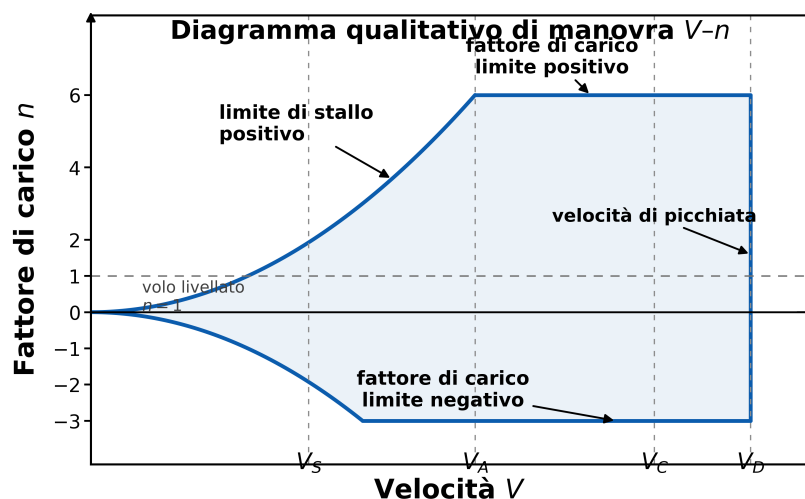


Figura 55 – Schema qualitativo del diagramma di manovra ($V-n$): in ascissa la velocità, in ordinata il fattore di carico n . Il bordo curvo a sinistra è il limite di stallo (n cresce con il quadrato della velocità); i bordi orizzontali sono i fattori di carico limite positivo e negativo. Curva qualitativa a scopo illustrativo.

proprio questo: una trave a sbalzo incastrata alla fusoliera a un'estremità e libera all'altra. Il carico in volo è diretto verso l'alto, e l'estremità alare flette verso l'alto.

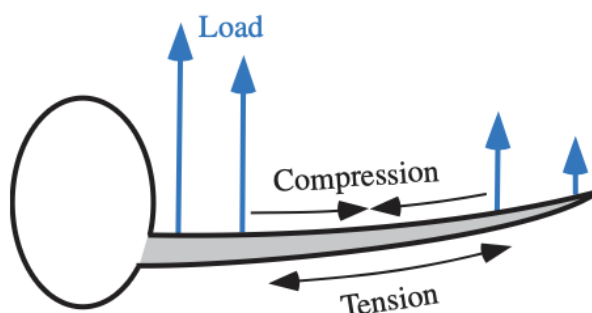


Figura 56 – L'ala come trave a sbalzo incastrata in fusoliera. Il carico aerodinamico distribuito $\ell(y)$ flette l'ala verso l'alto; la freccia è massima all'estremità, le sollecitazioni interne sono massime alla radice.

Per passare dalle parole ai numeri occorrono due grandezze che descrivono come il carico “viaggia” lungo l'ala fino alla radice: il taglio e il momento flettente.

Attenzione

Notazione (cambio di significato). In questa sezione, e coerentemente con i contesti strutturali, T indica il *taglio* (lo sforzo di taglio) e M_f il *momento flettente*. Si faccia attenzione: nella sezione sulla propulsione (e nell'analisi dell'introduzione) T indicava la *spinta*. Qui T non è la spinta. Indichiamo inoltre con $\ell(y)$ il carico aerodinamico per unità di apertura [N/m], con y la coordinata lungo l'apertura a partire dalla radice e con $s = b/2$ la semiapertura.

Taglio e momento flettente

In una generica sezione dell'ala posta a distanza y dalla radice:

- il *taglio* $T(y)$ è la risultante di tutta la portanza che agisce più all'esterno della sezione,

$$T(y) = \int_y^s \ell(\eta) d\eta; \quad (18)$$

- il *momento flettente* $M_f(y)$ è il momento di quella stessa portanza rispetto alla sezione,

$$M_f(y) = \int_y^s (\eta - y) \ell(\eta) d\eta = \int_y^s T(\eta) d\eta. \quad (19)$$

Nota

Derivando le (18) e (19) si ritrovano le relazioni fondamentali della trave, che legano carico distribuito, taglio e momento:

$$\frac{dT}{dy} = -\ell(y), \quad \frac{dM_f}{dy} = -T(y). \quad (20)$$

Il segno indica solo che, spostandosi verso l'estremità, taglio e momento diminuiscono fino ad annullarsi alla punta (dove non c'è più portanza esterna). Entrambi sono *massimi alla radice*: ecco perché l'ala è più robusta e spessa dove si attacca alla fusoliera.

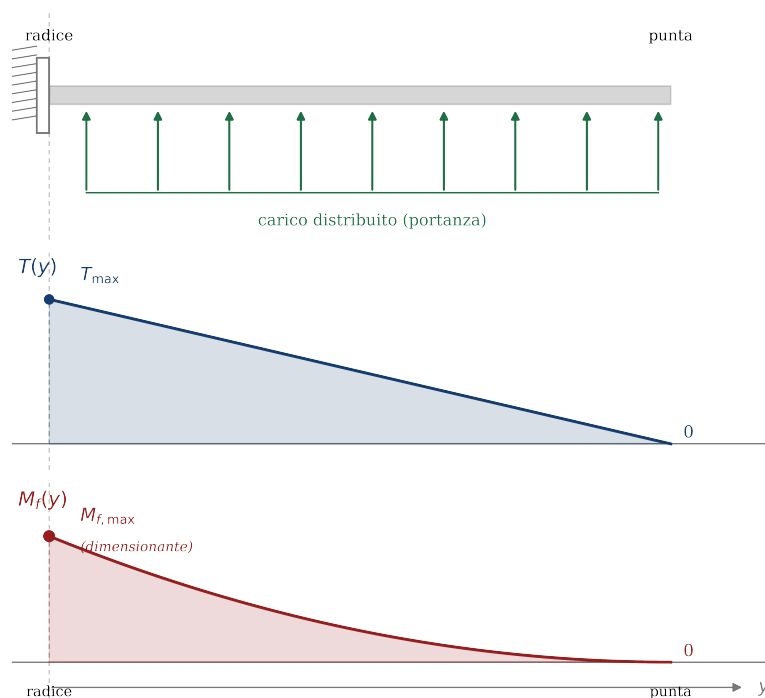


Figura 57 – Andamento del taglio $T(y)$ e del momento flettente $M_f(y)$ lungo la semiapertura, per un carico distribuito. Entrambi crescono dalla punta (dove sono nulli) verso la radice, dove raggiungono il massimo. Il momento flettente alla radice è la sollecitazione dimensionante dell'ala.

Esempio**Taglio e momento alla radice (carico uniforme).**

Adottiamo, come modello semplificato, un carico costante lungo l'apertura, $\ell(y) = \ell_0$. Poiché le due semiali reggono insieme tutta la portanza, $L = 2\ell_0 s$, da cui $\ell_0 = L/(2s)$. Allora alla radice:

$$T(0) = \int_0^s \ell_0 \, d\eta = \ell_0 s = \frac{L}{2}, \quad M_f(0) = \int_0^s \eta \ell_0 \, d\eta = \frac{\ell_0 s^2}{2} = \frac{Ls}{4}.$$

Il taglio alla radice è metà della portanza totale (ogni semiala sostiene metà del peso): un risultato rassicurante. Il momento flettente alla radice equivale a metà portanza applicata a metà semiapertura. In manovra basta moltiplicare per il fattore di carico: a 2,5 g il momento di radice è 2,5 volte quello di crociera, e applicando il coefficiente di sicurezza 1,5 la struttura va dimensionata per 3,75 volte il valore a 1 g .

Nota

Perché conviene scaricare la punta. Nel modello uniforme la metà portanza “agisce” a metà semiapertura ($0,5s$). Con la distribuzione ellittica vista nella sezione precedente, la stessa portanza si concentra più verso la radice: il suo baricentro cade a circa $0,42s$, e il momento flettente di radice risulta circa il 15% più piccolo, a parità di portanza totale. È la traduzione strutturale di ciò che avevamo detto a proposito di rastremazione e svergolamento: scaricare l'estremità non serve solo all'aerodinamica, ma alleggerisce la struttura riducendo il momento alla radice.

19.3 Sforzo, trazione e compressione

Il momento flettente, da solo, non basta a dire se l'ala regge: dipende da come quel momento si distribuisce nel materiale. La grandezza che conta è lo *sforzo*.

Sforzo (tensione)

Lo *sforzo* σ è il carico per unità di area, $\sigma = F/A$, misurato come una pressione [$\text{N/m}^2 = \text{Pa}$]. Una struttura ottimale è quella in cui tutti i componenti lavorano allo stesso sforzo: nessun elemento “ozia” mentre altri sono sovraccarichi.

Quando l'ala flette verso l'alto sotto il carico, la sua parte *superiore* si accorcia — è in *compressione* — e la parte *inferiore* si allunga — è in *trazione*. Fra le due esiste una superficie che non si allunga né si accorcia, detta *asse neutro*.

Lo sforzo da flessione cresce con la distanza dall'asse neutro

In una trave inflessa, lo sforzo normale in un punto è proporzionale al momento flettente e alla distanza z del punto dall'asse neutro:

$$\sigma(z) = \frac{M_f z}{I}, \quad (21)$$

dove I è il momento d'inerzia della sezione rispetto all'asse neutro.

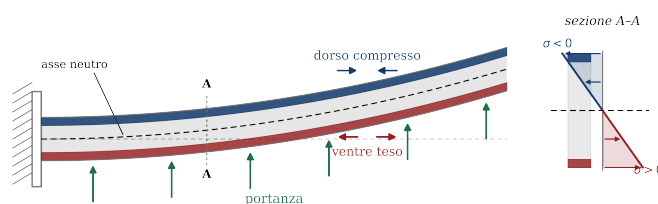


Figura 58 – Ala inflessa verso l’alto sotto il carico: il dorso è compresso, il ventre è teso. Lo sforzo cresce allontanandosi dall’asse neutro ed è massimo sulle superfici esterne, dove conviene concentrare il materiale resistente.

Nota

La (21) dice due cose preziose per il progetto. Primo: a parità di materiale, conviene metterne il più possibile *lontano* dall’asse neutro, cioè sulle superfici superiore e inferiore dell’ala — là dove z è massimo. Secondo: conviene che l’ala sia *alta* (profilo spesso), perché una sezione più alta ha un I molto maggiore e sopporta lo stesso momento con sforzi minori. È la ragione strutturale, promessa nella sezione sul progetto, per cui le ali spesse sono più efficienti da costruire: idealizzando l’ala come due pannelli (dorso e ventre) di area A distanti h , il momento si riparte come $M_f \simeq \sigma A h$, e a parità di M_f lo sforzo σ cala all’aumentare dell’altezza h .

Poiché i materiali rispondono in modo diverso a trazione e compressione — si possono tirare i due capi di uno spago ma non spingerli, si può premere su una pila di mattoni ma non tirarla — sui velivoli moderni si arriva a impiegare *leghe di alluminio diverse* per il pannello superiore (compresso) e per quello inferiore (teso), ciascuna ottimizzata per la propria funzione.

19.4 Dalla centina al guscio lavorante: breve storia costruttiva

Conviene ripercorrere, anche solo per sommi capi, come si è arrivati alla struttura moderna: è una storia che chiarisce i concetti meglio di molte definizioni.

Una collezione di travi disposte a reggere un carico è una *travatura reticolare* (in inglese *truss*): lo scheletro dei grattacieli, l’ossatura dei ponti ferroviari. I primi aeroplani erano così. Si credeva che le ali dovessero essere sottilissime per ridurre la resistenza, e una struttura tanto sottile non poteva contenere al suo interno un reticolo robusto: per questo si ricorreva al *biplano*, una scatola reticolare irrigidita da montanti e tiranti diagonali. Robusto, ma con moltissima resistenza aerodinamica dovuta al tirantame esterno.

La scoperta dei profili spessi (fine Prima guerra mondiale: i Fokker D.VII e D.VIII) permise di racchiudere la struttura dentro l’ala, eliminando tiranti e montanti: nacque l’ala *a sbalzo*. La costruzione tipica era un telaio di legno rivestito di tela: il rivestimento trasmetteva il carico alle *centine* (reticoli a forma di profilo), che lo passavano ai *longheroni* (un longherone anteriore e uno posteriore). Molti velivoli leggeri si costruiscono ancora così, con lamiere d’alluminio al posto della tela — ma in questa concezione la lamiera non porta carico più di quanto ne portasse la tela: serve solo perché dura più a lungo.

Il passo decisivo fu far lavorare anche il rivestimento. Dopo un breve intermezzo con le *lamiere ondulate* (lo Junkers Ju-52, il Ford Tri-Motor: rigide a flessione, ma da allineare al flusso per non aumentare la resistenza,



Figura 59 – Struttura classica “a centine e longheroni”. Le centine, reticoli sagomati come il profilo, danno forma all’ala e raccolgono il carico del rivestimento; lo trasmettono ai longheroni (anteriore e posteriore), che lo portano fino alla radice. Il rivestimento (tela, poi lamiera) non sopporta i carichi di flessione.

e poco utili in tal senso sull’ala), nei primi anni Trenta arrivò il *guscio lavorante* (*stressed skin*): il Boeing 247, considerato il primo aereo di linea moderno, e poi il leggendario Douglas DC-3. Qui il rivestimento sopporta una parte dei carichi di flessione, e la struttura si avvicina all’ideale in cui ogni elemento lavora allo stesso sforzo.

19.5 Il cassone alare

Nel velivolo da trasporto moderno la struttura portante dell’ala è una grande *trave cava*: il *cassone alare* (*wing box*).

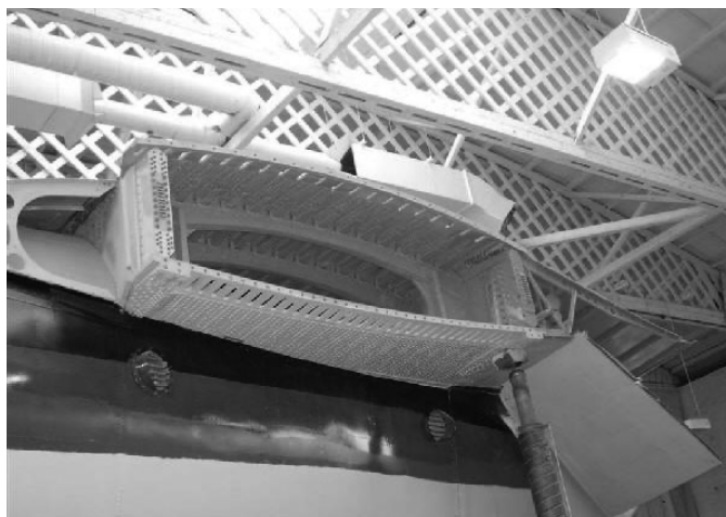


Figura 60 – Il cassone alare. I pannelli superiore e inferiore (dorso e ventre dell’ala) reggono la flessione; i longheroni anteriore e posteriore chiudono la scatola; i correntini la irrigidiscono per il lungo, le centine la mantengono in forma e ne governano la torsione. Tutto il cassone lavora come un’unica trave.

Le pareti superiore e inferiore del cassone sono il dorso e il ventre dell’ala; le pareti anteriore e posteriore sono i longheroni. All’interno, dei *correntini* (irrigidimenti) corrono per il lungo, e a intervalli le *centine*, perpendicolari all’asse, lo mantengono in forma e gli permettono di reggere la *torsione*. A differenza della costru-

zione classica, qui il rivestimento è parte della trave: spesso da 6 a 10 mm, con i correntini forma una struttura estremamente robusta, che assorbe da sola tutti i carichi di flessione e torsione.

Nota

Il cassone come serbatoio, e l'alleggerimento del carico. Il cassone è il posto ideale per alloggiare il combustibile: nel progetto di un jet, quanto carburante vi entra è uno dei vincoli che fissano dimensione dell'ala e autonomia. C'è di più: il peso del combustibile nelle ali, agendo verso il basso, *contrasta* il carico di portanza diretto verso l'alto e alleggerisce la struttura. Lo stesso fanno i motori appesi sotto l'ala dei quadrimotori. È un esempio elegante del nostro $L = \dot{m} v_z$ visto dal lato strutturale: ciò che conta per l'ala è il carico *netto*.

Esiste infine un compromesso, che lega questa sezione a quella sul progetto: un cassone più grande è più robusto e contiene più combustibile, ma lascia meno spazio agli ipersostentatori; un cassone più piccolo libera spazio per flap più efficaci, a scapito dell'autonomia.

19.6 Torsione e taglio: l'esperimento del tubo

Oltre a flettere, l'ala tende a *torcersi*, e la torsione è retta da sforzi di taglio. Un esperimento semplicissimo ne mostra l'essenza.

Esempio

Il tubo di cartone.

Si prenda il tubo di cartone di un rotolo di carta. Stretto fra i palmi e torto, resiste piuttosto bene. Lo si tagli ora longitudinalmente, per tutta la lunghezza, e si riprovi a torcerlo: non regge più alcuna coppia. Il motivo è che il taglio non può "attraversare" la fenditura: in un tubo aperto non c'è resistenza a torsione. Una sezione *chiusa* (come il cassone) regge la torsione perché il taglio vi circola tutt'intorno, ininterrotto; le cerniere servono proprio a mantenere chiusa ed efficiente questa scatola.

19.7 I materiali compositi

Per decenni il progresso è passato dalle leghe di alluminio, sempre migliori. Ma quella tecnologia si avvicina ormai a un limite, e per inseguire strutture ancora più leggere e resistenti si guarda ai *materiali compositi*: fibre di carbonio, Kevlar, plastiche rinforzate con fibra di carbonio.

I compositi non sono affatto una novità: tecnicamente lo è già il compensato (fogli di legno e colla), con cui era costruito l'agilissimo bombardiere britannico Mosquito; la vetroresina equipaggia da decenni gli alianti ad alte prestazioni. L'idea profonda è la stessa del cemento armato.

Nota

Come lavora un composito: fibre e matrice. Finché l'acciaio non divenne disponibile, le grandi costruzioni dovevano lavorare *tutte* in compressione, perché pietra e mattoni reggono male la trazione. Oggi il calcestruzzo si cola attorno a un'armatura di tondini di ferro che lo irrobustiscono a trazione. Il composito funziona allo stesso modo: una resina (epossidica o altro polimero) impregna fibre di grafite,

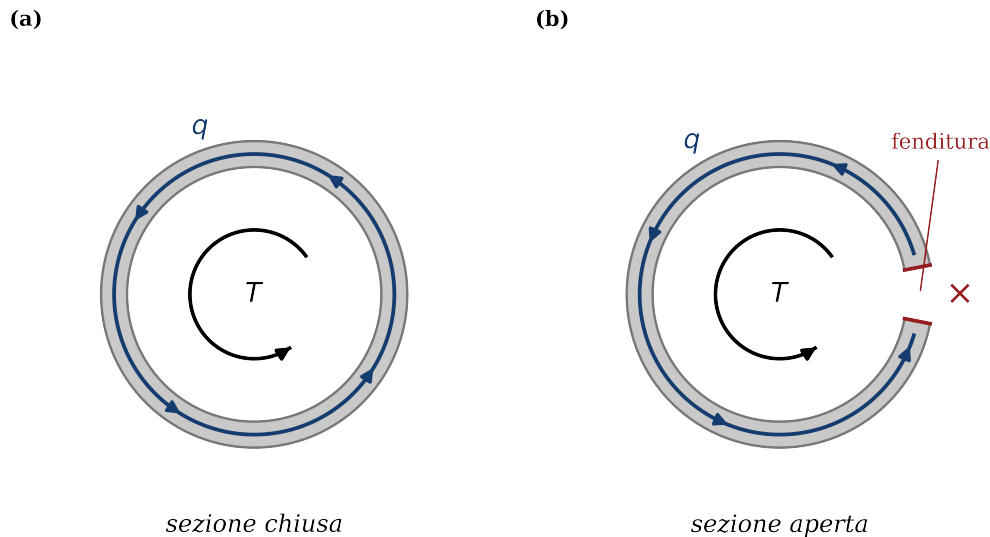


Figura 61 – L'esperimento del tubo. A sinistra il tubo integro (sezione chiusa) resiste alla torsione perché il flusso di taglio circola ininterrotto lungo la parete. A destra il tubo tagliato per il lungo (sezione aperta) cede subito: il taglio non può attraversare la fenditura.

aramide (Kevlar) o vetro. Le fibre, fortissime a *trazione*, fanno la parte dei tondini; la resina regge la *compressione* e tiene insieme il tutto. Un composito di grafite, a parità di peso, è più resistente a trazione dell'alluminio e all'incirca equivalente a compressione.

Con i compositi (come con i metalli) si può costruire una trave a doppio T, in cui due piattabande lontane dall'asse neutro reggono la flessione — coerentemente con la (21). Ma esiste un'alternativa molto usata: riempire il volume fra le due piattabande con una schiuma rigida e leggera, poco sollecitata perché il carico vi si distribuisce su un grande volume. È la struttura a *sandwich*.

Estendendo l'idea dalle travi ai pannelli, si ottengono i pannelli sandwich: leggerissimi ma rigidi e robusti, usati per esempio per i pavimenti delle cabine — dove, curiosamente, uno dei criteri di progetto diventa la resistenza alla foratura dei tacchi a spillo.

19.8 Fatica e ispezioni

Un'ultima nozione, spesso più dimensionante della resistenza statica: la *fatica*. Gli aerei volano moltissimo — un velivolo di linea efficiente può operare 16 ore al giorno — e ogni decollo-atterraggio è un *ciclo*.

Esempio

La graffetta.

Si pieghi avanti e indietro una graffetta: si spezza dopo una dozzina di piegamenti. A ogni decollo e atterraggio l'ala fa qualcosa di simile: passa dalla posizione "a terra", appesantita dal carburante, alla flessione verso l'alto del volo. Nessuno vorrebbe un'ala che si rompe dopo una dozzina di cicli: per questo le strutture si progettano per durare un numero altissimo di cicli — 30 000–40 000 — e per molti componenti è proprio la *vita a fatica*, non il carico ultimo, a fissarne il dimensionamento.

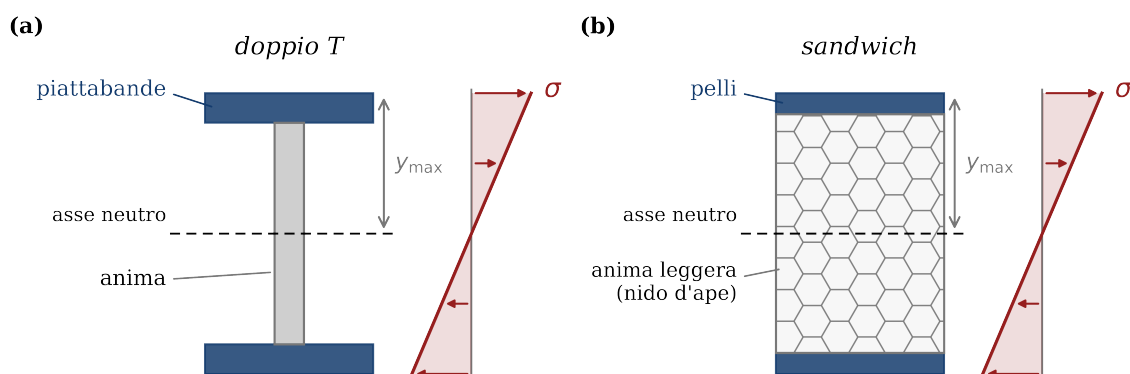


Figura 62 – A sinistra una trave a doppio T: il materiale resistente è nelle due piattabande, lontane dall’asse neutro. A destra una struttura a sandwich: due pelli resistenti racchiudono un’anima leggera (schiuma o nido d’ape), che le tiene distanziate con pochissimo peso.

Alla progettazione a fatica si affianca l’ispezione continua. Tutti i velivoli dell’aviazione generale richiedono un’ispezione annuale; i velivoli commerciali seguono calendari con controlli ogni 100 ore di volo e, ogni qualche anno, una revisione completa (la cosiddetta *D check*), in cui l’aereo viene spogliato fino alla struttura nuda e ispezionato in ogni dettaglio — un lavoro che può durare un mese.

19.9 La struttura ideale e quella reale

Una struttura ideale sarebbe progettata in modo che *ogni* suo componente ceda esattamente allo stesso carico limite e si affatichi esattamente allo stesso numero di cicli, scelti appena al di sopra delle condizioni operative; e non avrebbe alcun margine in più, perché margine significa peso. Nella realtà le strutture sono quasi sempre *sovradimensionate*: nessun velivolo è certificabile se non soddisfa i requisiti, ma superarli non comporta penalità normative — solo una penalità di prestazione. I grandi trasporti di Boeing e Airbus, dato l’enorme costo di progetto, sono spinti molto vicino alle tolleranze; i piccoli velivoli dell’aviazione generale, invece, sono spesso costruiti “abbondanti”, con molte parti più robuste e pesanti del necessario.

Nota

In sintesi. L’obiettivo primario della struttura è portare i carichi di volo richiesti con il minor peso possibile. È questa ricerca che ha condotto dal legno e dalla tela al guscio lavorante e ai compositi avanzati. E il punto di partenza resta quello da cui siamo partiti: poiché la potenza indotta cresce come il quadrato del carico, ogni chilogrammo risparmiato sulla struttura è un chilogrammo che non si deve più sostenere — con un effetto a cascata che premia, ancora una volta, la leggerezza.

20 Conclusioni

Possiamo ora raccogliere le fila. Siamo partiti da un solo fatto fisico — l'ala devia verso il basso una grande massa d'aria — e da esso abbiamo dedotto, senza mai cambiare strumenti, un intero velivolo.

Il nucleo: la portanza

La descrizione fisica della portanza poggia su poche proporzionalità, tutte conseguenza diretta delle leggi di Newton:

- la massa d'aria deviata dalle ali è proporzionale alla velocità di volo e alla densità dell'aria, $\dot{m} \propto \rho S V_0$;
- la componente verticale della velocità dell'aria deviata è proporzionale alla velocità di volo e all'angolo d'incidenza;
- la portanza è proporzionale alla massa d'aria deviata moltiplicata per la componente verticale della sua velocità, $L = \dot{m} v_z$;
- la potenza necessaria a produrre portanza è proporzionale alla portanza moltiplicata per la componente verticale della velocità dell'aria deviata, $\Pi_{\text{ind}} \propto L v_z$.

Da questi pochi mattoni si leggono senza fatica situazioni che la descrizione comune lascia oscure: l'aereo che *rallenta* (la massa deviata cala, quindi servono più angolo d'incidenza e più potenza indotta, $\Pi_{\text{ind}} \propto 1/V_0$); il *carico* che aumenta (a velocità costante la massa deviata non cambia, l'angolo d'incidenza cresce e la potenza va come il quadrato del carico); l'aereo che vola *rovesciato* (nessun problema, basta l'opportuno angolo d'incidenza).

Dall'ala al velivolo completo

Su questo nucleo abbiamo costruito tutto il resto, e vale la pena ripercorrere come ogni parte discenda dalla precedente.

Il progetto dell'ala. La forma del profilo e la pianta non cambiano *se* si vola, ma *quanto bene*: governano rendimento e stallo. Da qui spessore e curvatura, strato limite e distacco, ipersostentatori, allungamento, rastremazione, svergolamento e winglet — tutti modi di deviare più aria, più dolcemente, con meno potenza.

Stabilità e controllo. Un'ala che genera portanza non basta: il velivolo deve tornare da solo al suo assetto (stabilità) e obbedire ai comandi (controllo). Il baricentro davanti al punto neutro, la deriva, il diedro, i modi dinamici e i comandi elettrici sono la grammatica del volo governabile.

La propulsione. La spinta nasce dalla stessa fisica della portanza, ruotata di novanta gradi: $T = \dot{m} (V_e - V_0)$. E lo stesso compromesso — molta massa a bassa velocità è più efficiente — che premia le ali allungate premia il turbofan.

L'alta velocità. Quando l'aria non può più essere considerata incompressibile, compaiono onde d'urto, resistenza d'onda e riscaldamento; ma la portanza resta una reazione, e la freccia, la regola delle aree e le protezioni termiche sono le risposte del progetto.

La struttura. Infine, qualcuno deve reggere tutti questi carichi. La potenza indotta cresce come il quadrato del carico: di qui l'ossessione per la leggerezza, e il cammino dal legno e dalla tela al cassone lavorante e ai compositi.

Una sola idea

La spiegazione popolare, tutta concentrata sulla forma del profilo, può sembrare appagante, ma non offre gli strumenti per capire davvero il volo. La descrizione fisica è altrettanto facile da afferrare e infinitamente più potente: parte da un solo fatto — l'aria viene accelerata nella direzione opposta alla forza desiderata — e da quello arriva a rendere conto, in modo coerente, di portanza e resistenza, di stallo e vortici, di equilibrio e manovra, di spinta e di onde d'urto, fino ai carichi che plasmano la struttura. È la stessa idea, seguita con coerenza dall'inizio alla fine. Ed è, ci auguriamo, una base solida da cui i corsi specialistici di aerodinamica, meccanica del volo, propulsione e costruzioni aeronautiche potranno spiccare il volo.

Nota

Fonte. La trattazione qui rielaborata si ispira ai Capitoli 1 (*Physical Description of Lift*), 2 (*Wings*), 3 (*Stability and Control*), 4 (*Airplane Propulsion*), 5 (*High-Speed Flight*) e 9 (*Structures*) e all'Appendice B (*Misapplications of Bernoulli's Principle*) di David Anderson e Scott Eberhardt, *Understanding Flight* (McGraw-Hill), e all'articolo divulgativo degli stessi autori. I contenuti sono stati riscritti, riordinati e integrati con definizioni, dimostrazioni ed esempi a fini didattici.

A Usi impropri del principio di Bernoulli

Nel corso di questi appunti abbiamo più volte messo in guardia contro la “descrizione comune” della portanza fondata sul principio di Bernoulli. È bene chiarire fino in fondo un punto delicato: il principio di Bernoulli, in sé, è perfettamente corretto. Sbagliato è il modo in cui lo si applica alla portanza — e, come vedremo, a un'intera famiglia di esperimenti dimostrativi che lo chiamano in causa a torto. Questa appendice raccoglie le confutazioni in forma organica.

A.1 L'equazione di Bernoulli e la pressione dinamica

Trascurando la variazione di quota e la comprimibilità, l'equazione di Bernoulli si scrive

$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 = p_{\text{tot}} \quad (22)$$

dove p è la *pressione statica* (misurata perpendicolarmente al flusso), il termine $\frac{1}{2}\rho v^2$ è la *pressione dinamica* (una misura dell'energia cinetica dell'aria, con ρ densità e v velocità) e p_{tot} è la *pressione totale*.

Quasi tutti incontrano per la prima volta la (22) nel caso di un fluido che scorre in un condotto con una strozzatura. Poiché la massa si conserva, attraverso la sezione più piccola il fluido scorre più veloce; poiché l'energia si conserva, dove scorre più veloce la pressione statica è minore. Da questo caso particolare moltissimi traggono una convinzione errata, che poi applicano ovunque:

Attenzione

“Se l'aria si muove più velocemente, allora ha pressione statica minore”. È *falso* in generale. La conclusione vale solo quando la pressione totale si conserva ed è nota — come nel condotto chiuso. Se invece all'aria viene *aggiunta* energia (un'elica, un getto, il nostro fiato), aumenta la pressione dinamica ma la pressione statica *non* diminuisce, perché è cresciuta la pressione totale e la costante della (22) non

è più quella di prima.

A.2 Perché Bernoulli non si applica all'ala reale

C'è chi obietta che il principio di Bernoulli è in fondo la conservazione dell'energia, e che quindi deve sempre valere. L'obiezione trascura le ipotesi sotto cui la (22) è applicabile: *nessun lavoro esterno* e *aria in equilibrio*, cioè nessuna energia aggiunta o sottratta alla corrente.

Bernoulli non vale per un'ala reale tridimensionale

Per un'ala finita, che produce portanza cedendo energia all'aria, le pressioni e le velocità della corrente *non* sono legate dalla relazione (22).

Dimostrazione. Prima del passaggio dell'ala l'aria è ferma; dopo, una grande massa d'aria è stata accelerata verso il basso (in direzione opposta alla portanza). Come abbiamo visto trattando la potenza, questa è l'origine della potenza indotta e della resistenza indotta: all'aria è stata *aggiunta* una notevole quantità di energia. Delle due l'una: o un motore fornisce il lavoro esterno necessario a vincere la resistenza indotta — e allora c'è lavoro esterno, contro l'ipotesi di Bernoulli — oppure l'ala rallenta, e dunque non è in equilibrio. In entrambi i casi cade un'ipotesi della (22), che perciò non è applicabile. $\square$

Nota

Il caso limite ideale. L'unica ala per cui Bernoulli può valere è l'ala perfetta, con rendimento del 100%: quella bidimensionale (o, ciò che è lo stesso, di apertura infinita), che accelera una quantità infinita d'aria a velocità quasi nulla, cedendole un'energia praticamente nulla. È il caso delle trattazioni classiche sul profilo bidimensionale. Non appena si passa a un'ala reale, finita, che non può essere efficiente al 100%, Bernoulli smette di applicarsi.

A questo si aggiunge un errore logico ancora più radicale. Le descrizioni comuni partono dall'accelerazione dell'aria e ne fanno *discendere*, via Bernoulli, l'abbassamento di pressione. Ma la relazione causale corretta è l'opposto: è l'abbassamento di pressione sul dorso ad *accelerare* l'aria. Invertire causa ed effetto contraddice la prima legge di Newton, perché fa nascere una forza dall'accelerazione, quando è la forza (la differenza di pressione) a produrre l'accelerazione.

A.3 La presa statica: l'aria veloce non ha pressione statica minore

La controprova più semplice del fatto che “aria veloce” non significhi “pressione statica minore” è a bordo di ogni aeroplano.

Esempio

La presa statica e l'altimetro.

Sulla fiancata della fusoliera si trova una piccola *presa statica*, da cui gli strumenti — l'altimetro fra tutti — ricavano la pressione statica. La misura è accuratissima anche quando l'aria le sfreccia accanto ad alta velocità. Si osservi l'altimetro mentre si avvia il motore e l'elica investe la presa statica con il proprio

flusso: la quota indicata *non cambia*, benché l'altimetro sia sensibilissimo alle variazioni di pressione. Eppure sulla presa sta passando aria veloce. Se “aria veloce” implicasse davvero “pressione statica minore”, l'altimetro segnerebbe una quota diversa. Non lo fa perché l'elica ha aumentato la pressione dinamica e totale, non diminuito la statica.

A.4 Esperimenti che dimostrano la portanza, non Bernoulli

Molte “dimostrazioni del principio di Bernoulli” sono in realtà dimostrazioni della portanza newtoniana. Ne vediamo le più diffuse.

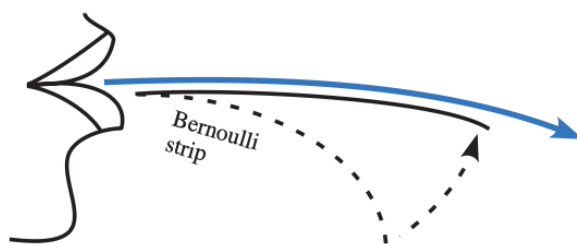


Figura 63 – La “striscia di Bernoulli”: soffiando sul bordo superiore di una striscia di carta, questa si solleva nel flusso. Non è una prova di Bernoulli, ma della portanza: l'aria segue (per effetto Coanda) la curvatura della carta e viene deviata; per le leggi di Newton ne nasce una forza che solleva la striscia.

La *striscia di Bernoulli* è una sottile striscia di carta sul cui bordo superiore si soffia: la striscia si solleva nel flusso. La spiegazione corrente recita: “l'aria va più veloce sopra, quindi la pressione è minore e la carta sale”. Ma il nostro fiato non ha pressione statica minore — ha solo pressione dinamica e totale maggiori. La spiegazione corretta è newtoniana: l'aria si incurva seguendo la carta, la prima legge richiede una forza sull'aria e la terza legge restituisce alla carta una forza uguale e contraria, che la solleva. È una dimostrazione di portanza, esattamente come per un'ala.

Lo stesso vale per la *pallina da ping-pong* sospesa in un getto verticale d'aria. Si dice: “l'aria in moto ha pressione statica minore; quando la pallina esce di lato incontra l'aria ferma a pressione maggiore, che la rispinge dentro”. Ma un getto non confinato non potrebbe sostenere una pressione statica inferiore a quella dell'ambiente: la differenza di pressione, senza pareti a separarla, lo farebbe collassare fino a equilibrarsi. In realtà la sorgente del getto ne ha aumentato pressione dinamica e totale, non diminuito la statica. La spiegazione vera è di nuovo newtoniana: quando la pallina si avvicina al bordo del getto, il flusso le si avvolge intorno in modo asimmetrico e il trasferimento di quantità di moto la rispinge verso il centro.

Anche le *due palline appese a fili* che, soffiando nell'intercapedine, si avvicinano, non sono che lo stesso fenomeno raddoppiato: il flusso si incurva attorno a ciascuna pallina e la spinge verso l'altra.

A.5 La palla che curva: l'effetto Magnus

La più istruttiva fra le applicazioni improprie di Bernoulli riguarda la traiettoria curva di una palla che ruota su sé stessa.

Consideriamo prima una palla *non* rotante in volo: l'aria si divide simmetricamente e l'unica forza è la resistenza. Quando la palla *ruota*, la scabrosità della superficie trascina con sé uno strato limite d'aria nel verso

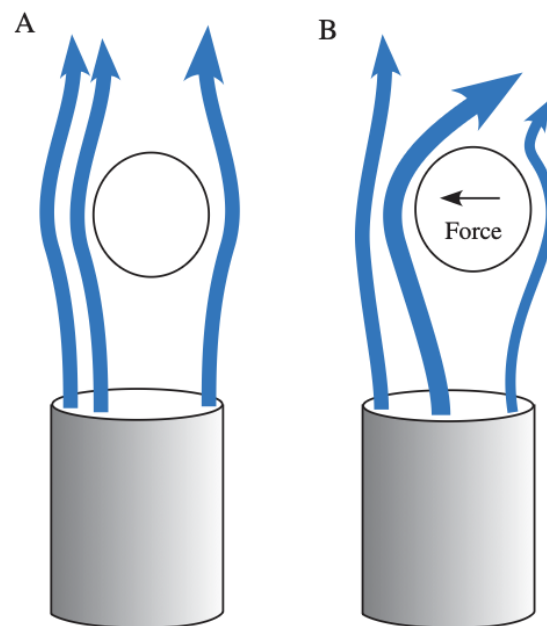


Figura 64 – Pallina da ping-pong sospesa in un getto d'aria verticale. Quando la pallina si sposta di lato, il flusso le si avvolge attorno in modo asimmetrico (effetto Coanda): il trasferimento di quantità di moto genera una forza che la rispinge dentro il getto, come la portanza su un'ala.

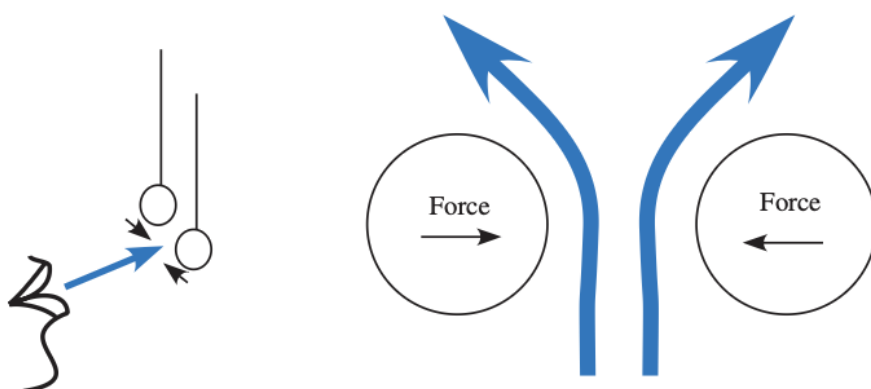


Figura 65 – Due palline da ping-pong appese a fili: soffiando nell'intercapedine, si avvicinano l'una all'altra. È lo stesso fenomeno della pallina nel getto, raddoppiato: il flusso che si incurva attorno a ciascuna pallina genera una forza che le spinge l'una verso l'altra.

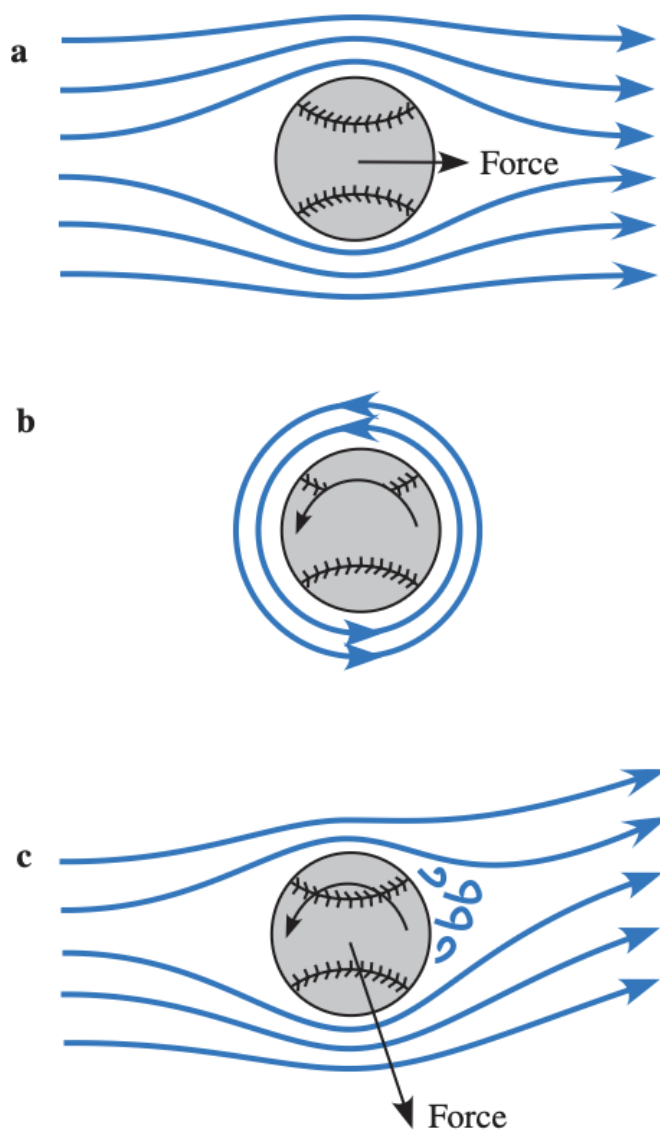


Figura 66 – L'effetto Magnus. (a) Palla non rotante: il flusso si separa simmetricamente e l'unica forza è la resistenza. (b) La rotazione trascina uno strato limite nel verso del moto della superficie. (c) Sovrapponendo i due effetti, il flusso ricorda quello su un'ala (qui capovolta): si stacca prima da un lato e resta aderente più a lungo dall'altro, generando una deviazione netta della scia e quindi una forza perpendicolare al moto.

della rotazione (le cuciture di una palla da baseball, o le fossette di una pallina da golf, accentuano l'effetto). Sovrapponendo i due flussi — quello di traslazione e quello di trascinamento — si ottiene un campo molto simile a quello attorno a un'ala, qui capovolta. Da un lato l'aria trascinata incontra il flusso incidente, perde energia e si stacca presto; dall'altro viaggia nel suo stesso verso e resta aderente più a lungo. Il risultato è una deviazione netta della scia e, per reazione, una forza perpendicolare alla direzione di volo.

Nota

Magnus è portanza, non Bernoulli. La forza laterale su una palla che ruota — e la portanza data dal retroeffetto (*backspin*) a una pallina da golf — nascono dallo stesso meccanismo della portanza alare: il flusso viene deviato e, per le leggi di Newton, la palla ne riceve una forza uguale e contraria. La prossima volta che si sente attribuire a Bernoulli un fenomeno di questo tipo, conviene ripensarlo da capo.