

Serie Raucci — Costruzioni Aeronautiche

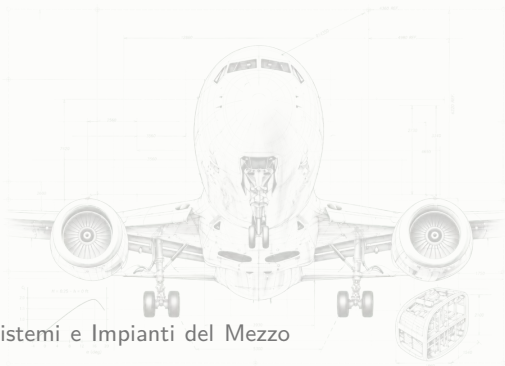
Il velivolo

Classificazione, architettura e componenti

prof. ing. Biagio Raucci

ITIS «E. Majorana» — Struttura, Costruzione, Sistemi e Impianti del Mezzo

Serie Raucci — Costruzioni Aeronautiche



Il percorso di oggi

dal generale al particolare

Dove stiamo andando

Prima di calcolare un longherone dobbiamo sapere *di che cosa* parliamo: nomi, compiti e forma di ogni parte del velivolo. Questa presentazione è il **vocabolario e la mappa** dell'intero corso.

1. Classificazione degli aeromobili
2. Architettura e assi di riferimento
3. L'ala: geometria e struttura
4. I profili alari e le sigle NACA
5. La fusoliera
6. Impennaggi e comandi di volo
7. Gli organi di atterraggio
8. I propulsori

Parte 1

Classificazione e tipologie di velivoli

1

Che cos'è un aeromobile

una definizione volutamente larga

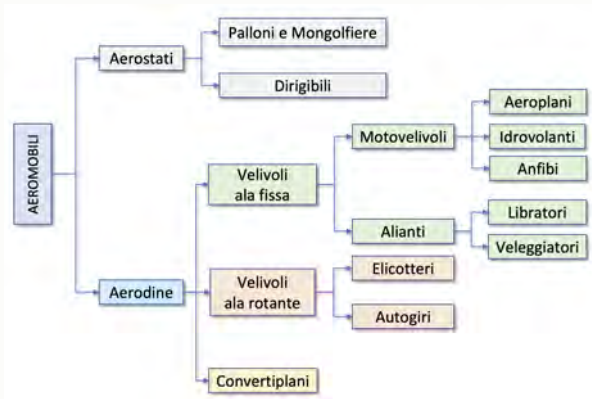
Definizione

Aeromobile: ogni macchina che si sostiene e si sposta nell'aria trasportando persone e/o cose, *indipendentemente* dal sistema di sustentazione: dalla mongolfiera all'Airbus A380.

Il criterio con cui nasce la sustentazione divide gli aeromobili in due grandi famiglie:

- **Aerostati** — sustentazione *statica*: principio di Archimede; l'aerostato galleggia nell'aria come una nave nell'acqua.
- **Aerodine** — sustentazione *dinamica*: seconda legge di Newton, $F = m a$; l'aerodina *accelera verso il basso una massa d'aria* e la reazione la sostiene.

La mappa completa degli aeromobili



Aerostati (palloni, mongolfiere, dirigibili) e aerodine (ala fissa, ala rotante, convertiplani).

Gli aerostati

galleggiare nell'aria

Nessun moto relativo richiesto: basta che il peso complessivo sia inferiore alla spinta di Archimede dell'aria spostata.

- **palloni** e **mongolfiere**: senza motore, trascinati dal vento o vincolati al suolo;
- **dirigibili**: con motore e organi di governo, seguono una rotta.



Mongolfiera



Dirigibile

Esercizio svolto

quanto solleva una mongolfiera? (1/2)

Mongolfiera da 2500 m³ in aria ISA

Dati) $V = 2500 \text{ m}^3$; $\rho_{\text{aria}} = 1,225 \text{ kg/m}^3$, $T_0 = 288,15 \text{ K}$; bruciatore a 100°C : $T_i = 373,15 \text{ K}$.

Modello) gas perfetto a pressione costante; forza netta = spinta di Archimede – peso dell'aria calda contenuta.

Equazione)

$$\rho_i = \rho_{\text{aria}} \frac{T_0}{T_i} = 1,225 \cdot \frac{288,15}{373,15} \simeq 0,946 \text{ kg/m}^3.$$

Esercizio svolto

quanto solleva una mongolfiera? (2/2)

Forza netta e carico sollevabile

Incognita)

$$F = (\rho_{\text{aria}} - \rho_i) V g = (1,225 - 0,946) \cdot 2500 \cdot 9,81 \simeq 6,8 \text{ kN},$$

cioè circa 700 kg sollevabili (involucro, cesta, bruciatore, occupanti).

Verifica) 2500 m³ di involucro per il peso di un'utilitaria: «densità» di prestazione modestissima. Ecco perché la sustentazione statica resta confinata a impieghi turistici, pubblicitari e scientifici.

Le aerodine a sustentazione aerodinamica

la velatura

La **velatura**, investita dalla corrente relativa, la devia verso il basso e genera per reazione la **portanza**.

Velatura	Propulsore	Nomenclatura
fissa	presente	velivoli : aeroplani, idrovolanti, anfibi
fissa	assente	alianti, cervi volanti
rotante	—	elicotteri, autogiri («rotodine»)
battente	—	ornitotteri

«Velivolo» non è sinonimo di «aeromobile»

Velivolo = aerodina a velatura **fissa** con propulsore: l'elicottero non è un velivolo.

L'ala rotante

elicottero, autogiro, girodina

- **elicottero**: rotore azionato dal motore, fornisce sustentazione e propulsione;
- **autogiro**: il motore spinge in avanti, il rotore gira libero in *autorotazione* per il moto di avanzamento;
- **girodina**: autogiro con rotore tenuto in rotazione da un motore.



Autogiro - Magni Gyro M16



Elicottero - NH90 NFH

Reazione diretta e sustentazione mista

- **Reazione diretta:** gettosostentatori che sostengono *senza* moto relativo (missili): piccole masse di fluido, accelerazioni enormi.
- **Sostentazione mista:** velivoli **STOL** e **VTOL**, e **convertiplani** (V-22 Osprey, AW609) che decollano come elicotteri e volano come aeroplani.

Il criterio convenzionale VTOL/STOL/CTOL

Fissata la quota di riferimento di 50 ft ($\simeq 15$ m), si misura lo spazio orizzontale x per raggiungerla: **VTOL** se $x \leq 500$ ft, poi **STOL**, poi **CTOL**.

Grandi masse, piccole accelerazioni

il principio che ritroveremo ovunque

Approfondimento

La spinta vale $F = \dot{m} \Delta V$, ma la potenza spesa cresce con $\dot{m} \Delta V^2/2$: a parità di spinta conviene energeticamente muovere *molta* aria di *poco*.

- l'**ala** devia enormi masse d'aria con piccole deflessioni: è il sostentatore più efficiente;
- l'**elica** viene subito dopo;
- il **getto puro** è il meno economico.

Lo stesso principio spiegherà i turbofan ad alto rapporto di diluizione.

I velivoli civili: gli alianti

l'efficienza prima di tutto

Privi di propulsore (traino o verricello per salire): **libratori** (solo discesa planata) e **veleggiatori** (risalgono nelle termiche). Peso contenuto, $AR = 20 \div 30$, forme accuratissime: tutto per massimizzare $E = L/D$.

Che cosa significa efficienza 50

In volo librato uniforme E è il rapporto di planata: da 1000 m di quota un veleggiatore con $E = 50$ percorre in aria calma $d = E \cdot h = 50$ km; un libratore-scuola d'epoca con $E = 8$ ne percorre appena 8 km. La differenza è tutta nell'aerodinamica.

Aviazione generale, ultraleggeri, executive

- **Turismo e scuola:** biposto o quadriposto, motore in prua, carrello quasi sempre fisso; archetipo: Cessna 172.
- **Acrobatici:** mono/biposto ad ala bassa; maneggevolezza e robustezza per i fattori di carico delle manovre.
- **Ultraleggeri** (norma italiana): monoposto ≤ 300 kg, biposto ≤ 450 kg, stallo ≤ 65 km/h.
- **Executive:** bimotori a getto da 10–12 passeggeri, alta quota, cabina pressurizzata (Falcon 2000).

Il trasporto commerciale

comodità, velocità, economia

Architettura ormai standard: monoplano plurimotore, ali a freccia, turbofan, crociera a $M \simeq 0,8$ oltre i 10 000 m.

- **narrow body**: corridoio unico, 100–250 passeggeri (con i *regional* fino a ~ 100);
- **wide body**: doppio corridoio, 200–660 passeggeri; il caso limite è il *double deck* (A380: 525–853).

Impennaggi grandi: l'orizzontale per le escursioni del baricentro con il carico, il verticale per la trazione asimmetrica in avaria motore.

Narrow body, wide body, double deck



A320, B747 e A380 a confronto in scala, con le sezioni di fusoliera.

I velivoli militari

classificare per mansione principale

Categoria	Caratteristiche e compiti
Combattimento	combattimento aereo ravvicinato (Eurofighter, F-16)
Intercettore	il «caccia» propriamente detto (F-104, F-15)
Addestratore	formazione dei piloti (MB-339, biposto dei caccia)
Bombardiere	dai leggeri (1500–2000 km) agli strategici (B-2)
Pattugliatore	pattugliamento marittimo, ~8 ore in zona
Supporto terrestre	piste semipreparate, manutenzione facile (AMX)

Il senso di tutto questo

A ogni categoria corrispondono allungamento, carico alare e propulsore «giusti»: è la prima colonna del progetto.

Parte 2

Architettura del velivolo e assi di riferimento

2

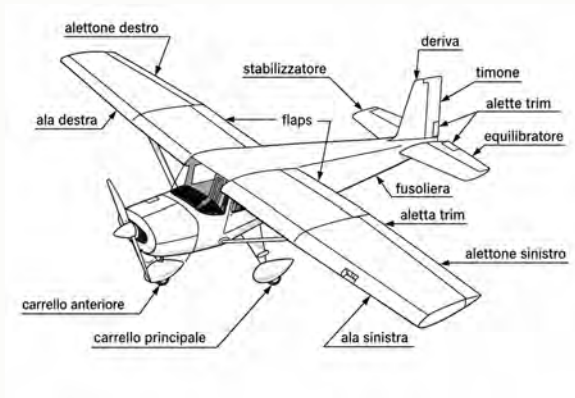
Gli elementi fondamentali

i sei blocchi dell'architettura classica

1. l'**ala**, che genera la portanza;
2. la **fusoliera**, corpo del velivolo;
3. gli **organi di stabilizzazione e controllo**;
4. gli **organi per l'involo e l'atterraggio**;
5. il **sistema di propulsione**;
6. gli **impianti di bordo**.

La corrispondenza compito $\leftrightarrow$ carichi $\leftrightarrow$ struttura è il filo conduttore dell'intero corso: ogni parte è progettata per un compito determinato ed è sottoposta a sollecitazioni determinate.

La nomenclatura completa



Monomotore ad ala alta: ali, alettoni, flap, fusoliera, impennaggi, trim, carrelli.

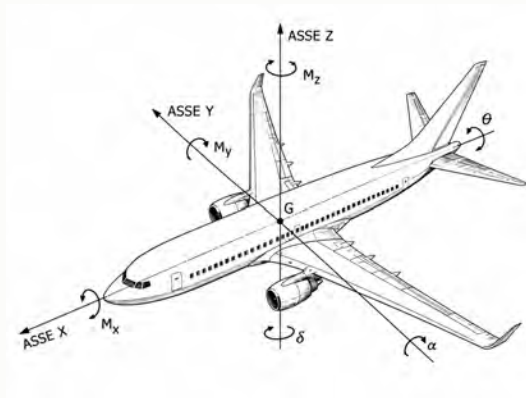
Gli assi corpo

la terna solidale con il velivolo, origine nel baricentro G

- **asse x longitudinale** (verso prua): **rollio** (Φ), l'aereo abbassa una semiala;
- **asse y trasversale** (verso la destra del pilota): **beccheggio** (Θ), l'aereo *cabra* o *picchia*;
- **asse z verticale**: **imbardata** (Ψ), il muso ruota a destra o a sinistra.

Qualsiasi manovra è una *combinazione* dei tre moti fondamentali.

Roll, pitch, yaw



I tre assi corpo e i momenti di rollio, beccheggio e imbardata.

L'associazione da imparare a memoria

Asse	Moto	Superficie	Stabilità
x longitudinale	rollio (Φ)	alettoni	laterale
y trasversale	beccheggio (Θ)	equilibratore	longitudinale
z verticale	imbardata (Ψ)	timone	direzionale

L'incrocio che genera più errori

Il moto attorno all'asse *longitudinale* governa la stabilità *laterale*, e viceversa: i nomi delle stabilità seguono il *piano* in cui il velivolo si muove, non l'asse di rotazione.

Gli altri sistemi di riferimento

assi vento e assi terra

- **Assi vento** (aerotecnica): asse x diretto come la corrente relativa; qui si definiscono L (perpendicolare alla velocità) e D (parallela);
- **Assi terra** (meccanica del volo): terna solidale con il suolo, z verso l'alto.

Perché la distinzione non è accademica

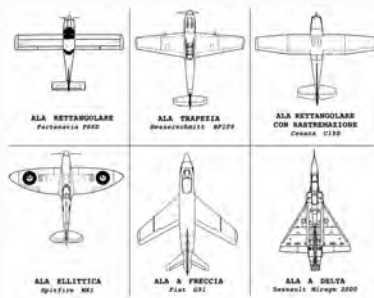
L'angolo fra l'asse x corpo e la corrente è l'**angolo d'attacco** α : la grandezza da cui dipendono C_L e C_D .

Parte 3

L'ala: geometria, parametri e struttura

3

Le forme in pianta



Le cinque forme in pianta con gli esempi storici.

L'ellittica ha (Prandtl) la minima resistenza indotta ma è difficile da costruire: dominano trapezie e rettangolari.

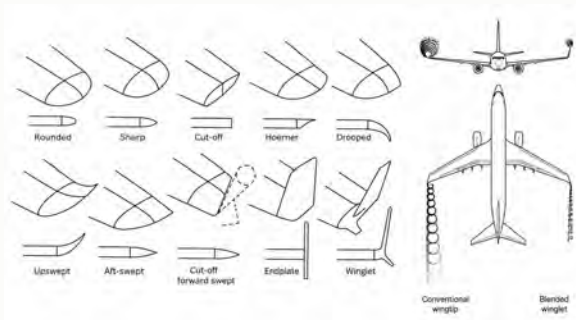
Da dove nasce la resistenza indotta

Approfondimento

L'ala tiene il ventre in alta pressione e il dorso in bassa; all'estremità le due zone comunicano e il flusso trasversale arrotola la corrente in *vortici d'estremità*. L'energia spesa per alimentarli è la **resistenza indotta** — tanto minore quanto più l'ala è allungata.

È la ragione fisica dell' $AR = 20 \div 30$ degli alianti, e il motivo per cui la teoria della linea portante pone AR al denominatore della resistenza indotta.

Le estremità alari e le winglet



Forme d'estremità e blended winglet con i vortici.

La **winglet** sfrutta il flusso trasversale d'estremità: stesso beneficio di un aumento di allungamento, *senza* accrescere apertura, ingombro e peso strutturale.

Apertura, superficie, rastremazione

Definizione

Apertura b : distanza fra le estremità alari. **Superficie** S : area in pianta, *compresa* la parte in fusoliera. **Rastremazione**: $\lambda = c_t/c_r$, con $0 \leq \lambda \leq 1$.

- λ basso $\Rightarrow$ vantaggi di *peso*: non si «spreca» superficie alle estremità, dove la portanza tende a zero;
- $\lambda = 1$ (rettangolare) $\Rightarrow$ centine tutte uguali: costruzione semplice, costi bassi — la scelta di molti aerei da turismo.

Le due corde medie

Formula chiave

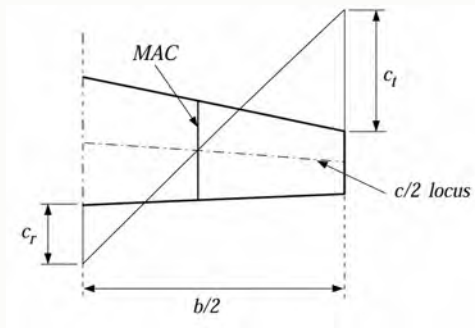
Corda media **geometrica**, quella dell'ala rettangolare equivalente: $\bar{c} = S/b$. Corda media **aerodinamica**, pesata sulla superficie; per l'ala trapezia:

$$\text{MAC} = \frac{2}{3} \frac{c_r^2 + c_r c_t + c_t^2}{c_r + c_t}.$$

Osservazione

La MAC è la corda di riferimento per il *centraggio*: la posizione del baricentro si esprime in percentuale della MAC.

La MAC per via grafica



Si prolunga la corda d'estremità di una quantità c_r e quella di radice di una quantità c_t : la retta che unisce i due estremi interseca la linea dei punti medi *nella posizione della MAC*.

L'allungamento alare

Formula chiave

$$AR = b^2/S \quad (\text{ala rettangolare: } AR = b/c).$$

	<i>AR</i> alto	<i>AR</i> basso
Res. indotta	bassa	elevata
$C_{L\alpha}$	elevato	basso
Peso dell'ala	elevato	basso
Volo in turbolenza	scarso	buono

Categoria	<i>AR</i>
Alianti	$20 \div 30$
Bi/quadrimotori a elica	$9 \div 12$
Bimotori a getto	$8 \div 9$
Quadrimotori	$6,7 \div 7,3$
Caccia supersonici	$1,9 \div 2,5$

Esercizio svolto

geometria di un'ala trapezia (1/2)

Monomotore da addestramento

Dati) $c_r = 2,10 \text{ m}$, $c_t = 1,20 \text{ m}$, $b = 11,00 \text{ m}$.

Modello) ala trapezia: $\bar{c}$ = media delle corde estreme.

Calcolo) $\lambda = 1,20/2,10 \simeq 0,571$; $\bar{c} = (2,10 + 1,20)/2 = 1,650 \text{ m}$; $S = \bar{c}b = 18,15 \text{ m}^2$; $AR = b^2/S = 121,0/18,15 \simeq 6,67$.

Esercizio svolto

geometria di un'ala trapezia (2/2)

La corda media aerodinamica

Incognita)

$$MAC = \frac{2}{3} \frac{2,10^2 + 2,10 \cdot 1,20 + 1,20^2}{2,10 + 1,20} = \frac{2}{3} \frac{8,37}{3,30} \simeq 1,691 \text{ m.}$$

Verifica) $MAC > \bar{c}$: la media «aerodinamica» pesa di più le corde grandi vicino alla radice. Lo scarto è piccolo ($\approx 2,5\%$), ma nel centraggio non è trascurabile.

Il carico alare

Formula chiave

W/S [N/m²]: uno dei principali fattori di progetto.

	W/S alto	W/S basso
Velocità di stallo	alta	bassa
Corse di decollo/atterraggio	lunghe	corte
$(L/D)_{\max}$	alto	basso
Volo in turbolenza	buono	non buono

Ordini di grandezza al decollo: $\sim 240 \text{ N/m}^2$ (homebuilt) fino a $3300 \div 6700 \text{ N/m}^2$ (jet da trasporto e caccia).

Esercizio svolto

carico alare e stallo del Cessna 172 (1/2)

Dalla portanza alla velocità minima

Dati) $m = 1111 \text{ kg}$, $S = 16,2 \text{ m}^2$, $C_{L,\max} = 1,6$, $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$.

Modello) volo orizzontale: $L = \frac{1}{2}\rho V^2 S C_L = W$; lo stallo avviene per $C_L = C_{L,\max}$.

Equazione)

$$V_s = \sqrt{\frac{2}{\rho C_{L,\max}} \cdot \frac{W}{S}}.$$

Esercizio svolto

carico alare e stallo del Cessna 172 (2/2)

I numeri

Calcolo) $W/S = \frac{1111 \cdot 9,81}{16,2} \simeq 673 \text{ N/m}^2$; $V_s = \sqrt{\frac{2 \cdot 673}{1,225 \cdot 1,6}} \simeq 26,2 \text{ m/s} \simeq 94 \text{ km/h}$.

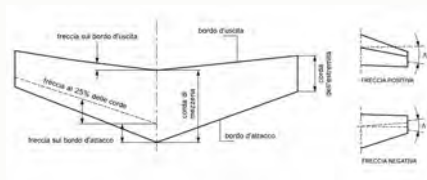
Verifica) $V_s \propto \sqrt{W/S}$: raddoppiare il carico alare alza lo stallo del 41 %. Ecco perché gli ultraleggeri ($V_s \leq 65 \text{ km/h}$ per norma) hanno carichi alari bassissimi, mentre un caccia accetta V_s alte in cambio di ali piccole e veloci.

L'angolo di freccia Λ

Angolo fra la linea a $1/4$ delle corde (o il bordo d'attacco) e l'asse di beccheggio; positiva verso la coda.

- la corrente «vede» solo la componente perpendicolare al bordo d'attacco: meno resistenza di comprimibilità;
- ma $C_{L,max}$ ridotto e strato limite ispessito alle estremità.

Ordini di grandezza: $0 \div 20^\circ$ nel basso subsonico, $\sim 30^\circ$ nell'alto subsonico, $40 \div 80^\circ$ nei supersonici.



Dove stalla l'ala a freccia

Attenzione

Con freccia *positiva* stallano per prime le *estremità*: si perde il controllo a rollio nella fase critica, e occorre svergolare le estremità. Con freccia *negativa* stalla prima la radice e gli alettoni restano efficaci.

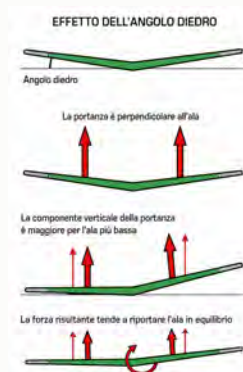
Contano anche gli aspetti aeroelastici: l'accoppiamento fra flessione e incidenza può innescare la *divergenza torsionale*; irrigidire costa peso, più con la freccia negativa che con la positiva. Per questo sotto $M \lesssim 0,6$ conviene l'ala trapezia senza freccia.

L'angolo diedro Γ

la stabilità laterale «gratis»

Con diedro *positivo*, se una folata inclina l'aereo, l'ala più bassa si trova più «in piano»: la sua componente verticale di portanza è maggiore e nasce una coppia che *raddrizza* da sola il velivolo.

Con diedro *negativo* l'opposto: meno stabile ma più *maneggevole* (MiG-29, F-104).



Lo svergolamento ε

Definizione

Angolo di calettamento delle sezioni dell'ala rispetto alla sezione d'incastro; *negativo* (il caso più diffuso) se l'estremità ruota a picchiare.

Con $\varepsilon < 0$:

- si *ritarda lo stallo alle estremità* (tipico delle ali a freccia positiva);
- il centro di pressione della semiala migra verso la radice: il momento flettente all'incastro cala e la struttura può essere più leggera.

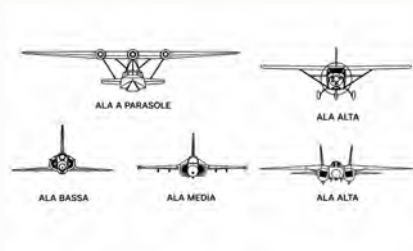
Che cos'è lo stallo

Attenzione

Superato l'*angolo d'attacco critico* ($\sim 18^\circ$) lo strato limite si distacca dal dorso e la portanza crolla: il velivolo perde rapidamente quota.

Non avviene solo a bassa velocità: una manovra troppo brusca supera l'incidenza critica anche a velocità elevata (*stallo di potenza*) — il caso più pericoloso, perché si possono superare i fattori di carico limite della struttura. Il rimedio: ritardare la separazione, ad esempio con gli ipersostentatori.

La posizione dell'ala rispetto alla fusoliera



	Ala alta	Ala media	Ala bassa
Interference drag	elevata	scarsa	elevata
Effetto diedro	positivo	nullo	negativo
Carico/scarico merci	semplice	semplice	servono rampe
Carrello sull'ala	lungo, pesante	lungo, pesante	corto, leggero

Chi sceglie che cosa

- **cargo**: piano di carico basso e mezzi liberi attorno $\Rightarrow$ ala alta;
- **grandi liner passeggeri**: bagagli sotto la cabina, nessuna struttura che la attraversi $\Rightarrow$ ala bassa;
- **piccoli aerei passeggeri**: visibilità $\Rightarrow$ ala alta;
- **caccia e alianti**: minima resistenza di interferenza $\Rightarrow$ ala media (con cassone passante, *carry-through box*).

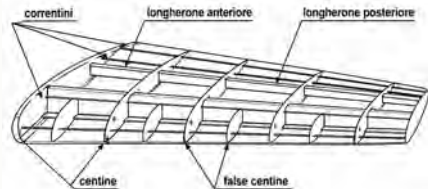
L'ala alta dà da sola effetto diedro positivo; l'ala bassa richiede diedro geometrico per un minimo di stabilità (famiglia Piper).

La struttura dell'ala

longheroni, correnti, centine

- **longheroni**: longitudinali; equilibrano taglio e flessione da portanza e resistenza;
- **correnti**: collaborano alla flessione e irrigidiscono il rivestimento *lavorante*;
- **centine**: trasversali, a forma di profilo; danno la forma aerodinamica.

Struttura *monolongherone* o *multilongherone* secondo il numero di longheroni.



Parte 4

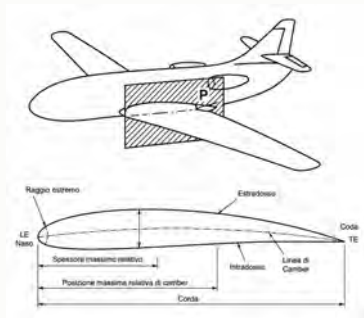
La geometria dei profili alari

4

Il profilo: nomenclatura essenziale

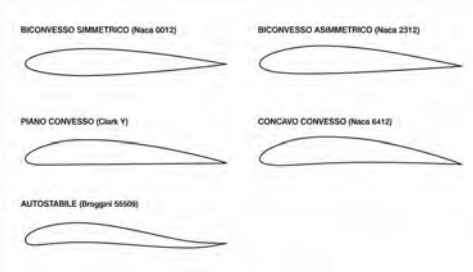
il «cuore» dell'ala

- **corda** c : dal bordo d'attacco al bordo d'uscita;
- **dorso** e **ventre**;
- **linea media**: punti medi (scuola europea) o centri dei cerchi inscritti (scuola americana);
- **freccia massima** m , posizione p ;
- **spessore massimo** τ .



τ tipico fra 6% e 18%: più spesso e curvo $\Rightarrow$ più portante ma meno veloce.

Classificazione per curvatura



- **biconvessi**: simmetrici per code e acrobazia, asimmetrici per la maggior parte degli aerei moderni;
- **concavo-convessi laminari**: alianti; **piano-convessi**: economici, turismo;
- **lenticolari e a diamante** ($\tau = 3 \div 5\%$): supersonici.

Le sigle NACA a 4 cifre

NACA $m p \tau \tau$

1^a cifra: freccia massima m in *per cento* della corda; **2^a:** posizione p in *decimi* di corda; **3^a–4^a:** spessore massimo in *per cento*.

- **NACA 2412:** $m = 0,02 c$ a $0,4 c$, $\tau = 0,12 c$ — il profilo del Cessna 150/172;
- **NACA 0012:** simmetrico ($m = p = 0$), $\tau = 0,12 c$ — il classico da piani di coda;
- **NACA 6409:** molto curvo e sottile, tipico dell'aeromodellismo veleggiatore.

La geometria dietro le quattro cifre

Distribuzione di spessore e bordo d'attacco

$$y_t = \pm \frac{t}{0,20} (0,2969\sqrt{x} - 0,126x - 0,3516x^2 + 0,2843x^3 - 0,1015x^4)$$

con raggio del bordo d'attacco $r_{LE} = 1,1019t^2$; la linea media è composta da due archi di parabola raccordati in $x = p$.

Linea media e spessori si assegnano in forma analitica o tabulare; il profilo si ottiene «montando» gli spessori perpendicolarmente alla linea media.

Esercizio svolto

un punto del NACA 2412 (1/2)

Stazione $x/c = 0,30$

Dati) $m = 0,02$, $p = 0,4$, $t = 0,12$; corda reale $c = 1,50$ m (Cessna).

Spessore) con $\sqrt{0,30} \simeq 0,5477$: $y_t \simeq 0,0600 c$ — coerente: siamo nel punto di spessore massimo ($2y_t \simeq 0,12 c = \tau$).

Linea media) $x < p$, primo arco:

$$y_c = \frac{0,02}{0,4^2} (2 \cdot 0,4 \cdot 0,30 - 0,30^2) = 0,125 (0,24 - 0,09) \simeq 0,0188 c.$$

Esercizio svolto

un punto del NACA 2412 (2/2)

Bordo d'attacco e verifica «da officina»

Bordo d'attacco) $r_{LE} = 1,1019 \cdot 0,12^2 \simeq 0,0159 c$.

Verifica) su corda $c = 1,50$ m: semispessore $\simeq 9,0$ cm, inarcamento della linea media $\simeq 2,8$ cm, $r_{LE} \simeq 2,4$ cm — ordini di grandezza che ritroveremo disegnando le centine.

La serie a 5 cifre

Anni '30: freccia spostata in avanti per guadagnare il $10 \div 20\%$ di $C_{L,max}$.

La decodifica

1^a cifra $\times 3/20 = C_L$ di progetto; **2^a–3^a**: il *doppio* della posizione della freccia in percento; **4^a–5^a**: spessore in percento.

NACA 23012: $C_{L,prog} = 0,3$, freccia a $0,15c$, $\tau = 0,12c$ — uno dei profili più usati della storia (Beechcraft Bonanza).

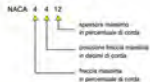
I profili laminari

Spessore massimo oltre il 30% della corda per arretrare il punto di pressione minima e mantenere laminare lo strato limite.

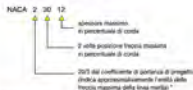
- **serie 1** (eliche): NACA 16-212 = pressione minima al 60%, $C_{L,prog} = 0,2$, $\tau = 0,12 c$;
- **serie 6** (la più diffusa): NACA 65-218 = pressione minima al 50%, $C_{L,prog} = 0,2$, $\tau = 0,18 c$; il pedice (64₃-418) è la semiampiezza della «tazza di laminarità» della polare: laminare per $C_L = 0,4 \pm 0,3$.

La decodifica in un colpo d'occhio

Classificazione NACA a 4 cifre

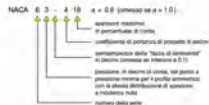


Classificazione NACA a 5 cifre



¹ I primi tre zeri si scrivono esplicitamente soltanto nel caso di un coefficiente di portanza di progetto pari a 0.2

Classificazione NACA serie 6



NACA 4412, 23012 e 63₃-418: ogni cifra collegata al suo significato.

Errori tipici nella decodifica NACA

Attenzione

- 4 cifre: la posizione della freccia è in *decimi*, lo spessore in *per cento*: nel 2412, «4» vale 0,4 c ma «12» vale 0,12 c ;
- 5 cifre: la 2^a–3^a cifra è il *doppio* della posizione: «30» significa 0,15 c , non 0,30 c ;
- il C_L di progetto delle 5 cifre usa il fattore $3/20$, non i decimi delle serie laminari.

Saper leggere la sigla è una competenza richiesta esplicitamente all'Esame di Stato.

Parte 5

La fusoliera

5

La forma longitudinale: la finezza

Corpo fusiforme: **forebody** ogivale, tratto cilindrico, **afterbody**.

Formula chiave

finezza = L/D : lunghezza su diametro massimo (l'inverso è la *snellezza*).

Velivolo	snellezza D/L	finezza L/D
DC-9	0,096	10,4
Boeing 747	0,086	11,6
Concorde	0,046	21,7

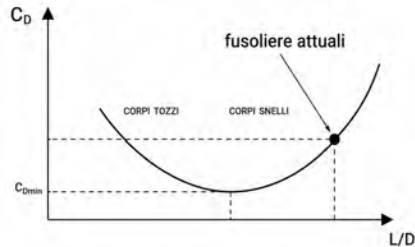
Il supersonico esige snellezze estreme: la fusoliera del Concorde resta il riferimento.

Il compromesso della finezza

Il C_D della fusoliera somma:

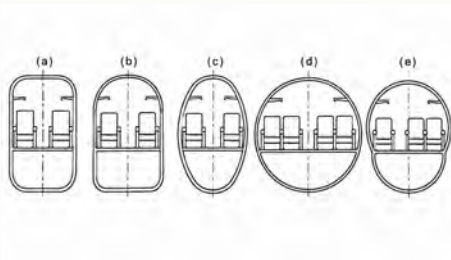
- **attrito**: cresce con la superficie bagnata, quindi con L ;
- **forma**: cresce con l'area frontale, quindi con D .

Dal bilancio nasce una finezza *ottima*; le fusoliere moderne, per ingombro, stanno *oltre* il minimo.



Le sezioni trasversali

perché la sezione circolare



La sezione alloggia il carico utile nella minima area frontale. Nei velivoli **pressurizzati** la sezione *circolare* fa lavorare il fasciame **a trazione** pura: il modo meno gravoso di assorbire la pressurizzazione. La *lobata* dà più stiva, ma richiede pavimenti lavoranti.

Esercizio svolto

tensioni di pressurizzazione (1/2)

Fusoliera cilindrica in quota

Dati) $r = 2,0 \text{ m}$, $s = 1,8 \text{ mm}$, $\Delta p = 0,06 \text{ MPa}$ (cabina a quota equivalente 2400 m, volo a 11 000 m).

Modello) recipiente cilindrico in parete sottile: tensioni membranali pure, di trazione.

Equazioni)

$$\sigma_{\theta} = \frac{\Delta p r}{s}, \quad \sigma_x = \frac{\Delta p r}{2s}.$$

Esercizio svolto

tensioni di pressurizzazione (2/2)

I numeri e il loro significato

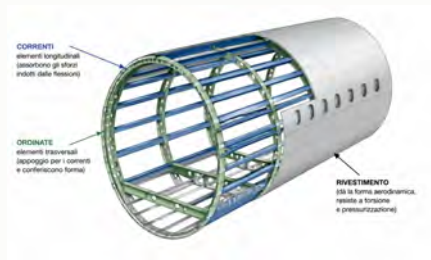
Calcolo) $\sigma_{\theta} = \frac{0,06 \cdot 2,0}{0,0018} \simeq 67 \text{ MPa}; \quad \sigma_x \simeq 33 \text{ MPa}.$

Verifica) valori ampiamente sostenibili da una lega d'alluminio, *purché* la sezione sia circolare: altrimenti la pressione la «gonfia» verso il cerchio e nascono flessioni locali ben più gravose. La circonferenziale è *doppia* della longitudinale: per questo le fusoliere «scoppiano» lungo le generatrici.

Le tipologie strutturali

traliccio, guscio, semiguscio

- **traliccio**: aste d'acciaio, rivestimento non portante (aerei leggeri);
- **guscio** (*monocoque*): il rivestimento porta tutto;
- **semiguscio**: rivestimento lavorante + **correnti** (flessione) + **ordinate** (appoggio e forma) — lo standard moderno.



Il problema delle aperture

la lezione del Comet

Attenzione

Oblò e portelli riducono la rigidezza torsionale della struttura sottile: servono veri e propri telai di rinforzo attorno a ogni apertura.

Non a caso i finestrini dei velivoli pressurizzati sono piccoli e con angoli raccordati: gli spigoli vivi concentrano le tensioni — la lezione, pagata cara, degli incidenti del De Havilland Comet negli anni '50.

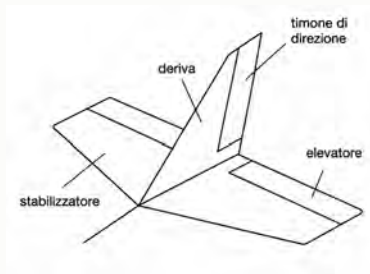
Parte 6

Organi di stabilizzazione e controllo

6

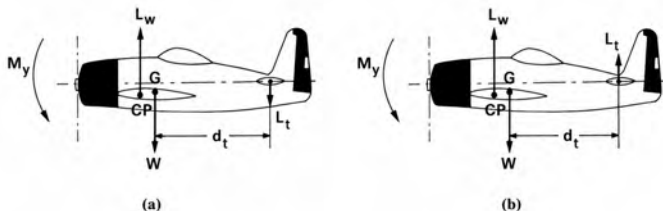
Gli organi della configurazione classica

- **piano orizzontale:** **stabilizzatore** (fisso) + **equilibratore** (mobile); tutto mobile: **stabilatore**. Governa il *beccheggio*;
- **piano verticale:** **deriva** + **timone**. Governa l'*imbardata*;
- **alettoni**: alle estremità alari (massimo braccio), comandano il *rollio*.



Perché serve il piano orizzontale

Ala + fusoliera da sole *non* sono equilibrate al beccheggio: la portanza L_w è applicata nel **centro di pressione**, che non coincide con G (arretrato alle basse incidenze, avanzato alle alte): nasce un momento a picchiare o a cabrare. Serve una superficie in coda che generi il momento uguale e opposto.



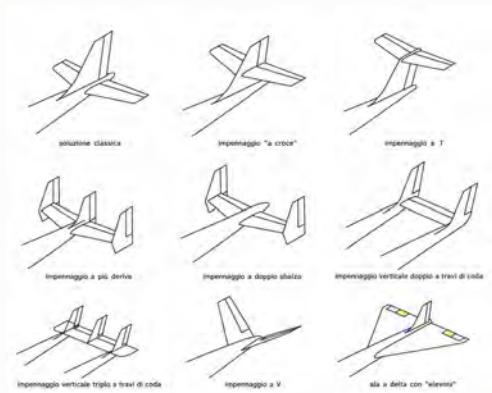
La coda che «porta verso il basso»

Attenzione

Nei velivoli convenzionali stabili il baricentro è avanzato e la coda lavora *deportante*: l'ala deve generare $L_w = W + |L_t|$. È un prezzo pagato alla stabilità.

L'impennaggio **verticale** garantisce invece la stabilità direzionale: investito da una raffica laterale produce la **devianza** che, come una banderuola, riallinea il velivolo; il timone sulla pedaliera dà la manovrabilità.

Le configurazioni dei piani di coda



Classica, a croce, a T, multiple, a V, elevoni sul delta.

La coda a T e il deep stall

Attenzione

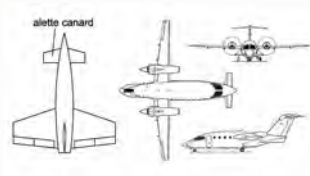
La coda a T tiene i piani lontani dalle scie di ali e motori (MD-80), ma in stallo può finire in *ombra aerodinamica*: l'equilibratore non genera più il momento per uscirne (*deep stall*).

Ed è strutturalmente più pesante della classica: gli sforzi del piano orizzontale si scaricano interamente sulla deriva prima di raggiungere la fusoliera. La deriva, in generale, si vorrebbe bassa per non torcere la fusoliera — ma non troppo, per la luce da terra al decollo.

Canard e tre superfici

il caso Piaggio P.180 Avanti

Nel **canard** i piani stanno *a monte* dell'ala e *contribuiscono* alla portanza, ma con instabilità intrinseca; la via di mezzo: le **tre superfici portanti**.



P.180: tre superfici, non canard

Deportanza di coda ridotta, efficienze maggiori; «canard» è improprio: l'ala anteriore ha i flap ma *nessuna* superficie di controllo.

Comandi di volo primari e secondari

PRIMARI	SECONDARI
proporzionali, azionamento continuo modificano la <i>traiettoria</i> (momenti) istintivi, affidabilissimi	«ON/OFF» o poche posizioni modificano C_L e C_D stabili e irreversibili

- primari: **alettoni**, **equilibratore**, **timone**;
- secondari: **flap**, **slat**, **aerofreni**, **lift dumpers**;
- misti: gli **spoiler** — su una semiala assistono il rollio (primari), simmetrici abbattano la portanza dopo il contatto (secondari).

Le superfici di un velivolo da trasporto

ORGANO di CONTROLLO	COMPOSIZIONE	COMPITI
IMPENNAGGIO ORIZZONTALE 	Stabilizzatore (parte fissa) Equilibratore o elevatore (parte mobile)	Stabilità longitudinale (beccheggio) Comanda il movimento di beccheggio tramite la barra (o volantino) azionata dal pilota longitudinalmente. Quando la barra viene spinta in avanti, l'equilibratore si abbassa e il velivolo picchia, se viene tirata verso il petto, l'equilibratore si solleva e il velivolo cabra.
IMPENNAGGIO VERTICALE 	Deriva (parte fissa) Timone (parte mobile)	Stabilità direzionale (imbardata) Comanda il movimento di imbardata tramite la pedaliera azionata dal pilota. In particolare se il pilota abbassa il pedale destro, il timone ruota verso destra, nasce un momento di imbardata che fa ruotare il velivolo intero a destra.
ALETTONI 	Coppia di elementi mobili simmetrici rispetto all'ala e che si muovono in modo asincrono	Comandano il movimento di rollio tramite la barra (o volantino) azionata trasversalmente dal pilota. In particolare se si sposta la barra alla destra del pilota, l'alettone sinistro si abbassa (la semiala si solleva) mentre quello destro si solleva (la semiala si abbassa). Nasce un momento che fa virare il velivolo verso destra.

Aileron, elevator, rudder, spoiler, flap, slat, speed brakes.

L'azione delle superfici primarie

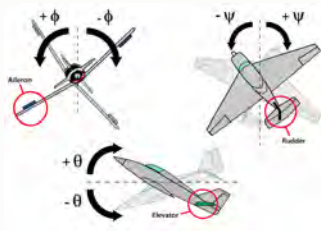
La catena logica è sempre: comando $\Rightarrow$ rotazione delle superfici $\Rightarrow$ effetto sul velivolo.

Moto	Organo	Comando $\Rightarrow$ effetto
rollio	volantino/barra	a destra $\Rightarrow$ alettone destro <i>su</i> , sinistro <i>giù</i> $\Rightarrow$ semiala destra giù
beccheggio imbardata	volantino/barra pedaliera	indietro $\Rightarrow$ equilibratore su $\Rightarrow$ l'aereo <i>cabra</i> piede sinistro avanti $\Rightarrow$ timone a sinistra $\Rightarrow$ muso a sinistra

Il verso «controintuitivo» degli alettoni

Attenzione

Per rollare a *destra* si *alza* l'alettone di destra: riduce il camber e la portanza della semiala destra, che si abbassa; il sinistro scende e la semiala sinistra sale. Movimento sempre *antisimmetrico*: pensare «comando a destra = alettone destro in basso» è l'esatto contrario del vero.



Parte 7

Organi per l'involto e l'atterraggio

7

Un componente «inutile» in volo

Dove stiamo andando

Per quasi tutta la missione il carrello non svolge alcun compito e deve pesare e resistere il meno possibile; nei pochi secondi del contatto assorbe urti violenti e sostiene l'intero peso. Da questo conflitto nascono tutte le soluzioni.

Ruote e ammortizzatori nei velivoli terrestri; **sci** sulla neve; **galleggianti** per gli idrovolanti. Il carrello deve anche consentire le manovre a terra.

Carrello fisso e carrello retrattile

- **fisso**: penalizza la resistenza ma è leggero, economico, a prova di dimenticanza — piccoli velivoli;
- **retrattile**: complesso e pesante, ma la pulizia aerodinamica ripaga — tutti i velivoli di una certa dimensione.



Le tre configurazioni delle ruote

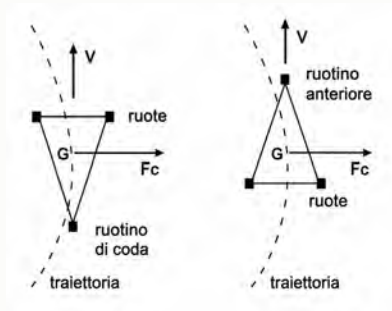


- **biciclo**: due ruote in linea; alianti e motoalianti;
- **ruotino posteriore** («classico»): robusto, elica protetta — ma rimbaldi e *cappottamento* in frenata;
- **ruotino anteriore**: niente cappottate, frenate energiche, visibilità — lo standard odierno.

La stabilità nelle manovre a terra

Ruotino *posteriore*: G sta *dietro* le ruote principali; in curva la forza centrifuga porta G verso l'esterno e stringe la traiettoria: il moto *diverge* nella «testa-coda» (*ground loop*).

Ruotino *anteriore*: G sta *davanti*; la stessa forza *raddrizza* le curve troppo strette e impedisce anche il rimbalzo all'atterraggio.



Ruote, freni, compasso

- il numero di ruote cresce con il peso e l'area di contatto richiesta: il B747 ha cinque carrelli (quattro da quattro ruote più il ruotino), l'A340-500 un terzo carrello centrale;
- tendenza moderna: più ruote ma più piccole — a parità di area di contatto si risparmia peso, al prezzo di maggiore complicazione;
- il carrello anteriore monta il **compasso** sterzante; quello principale i **freni**, ormai solo a disco.

Parte 8

I propulsori

8

Il principio di funzionamento

tutta la spinta è terza legge di Newton

Formula chiave

$$T = \dot{m} (V_u - V_\infty)$$

portata di massa per incremento di velocità impresso.

Una stessa spinta, due strade opposte:

- accelerare *poco* una *grande* massa: l'**elica**, efficiente alle basse velocità;
- accelerare *molto* una *piccola* massa: il **turbogetto**, l'unico praticabile alle alte velocità.

Il **turbofan** è il compromesso che domina l'aviazione commerciale.

Le famiglie di propulsori

- **motoelica**: pistoni + elica (reazione indiretta); **turboelica**: turbina + riduttore + elica;
- **turbogetto**: getto puro (reazione diretta); **turbofan**: ventola intubata + nucleo caldo;
- **ramjet e pulsoreattori**: senza parti rotanti, solo alle alte velocità (missili).

Gli **esoreattori** prelevano aria dall'atmosfera; gli **endoreattori** (razzi) portano tutto a bordo.

Le famiglie in sezione

MOTOELICHE 	Campo di utilizzo Piccoli velivoli della aviazione generale	Basce velocità (max 100 km/h) e quote di volo inferiori agli 8.000m a causa delle perdite di rendimento idrodinamica con la quota. E' il tipo di propulsore più economico alla bassa velocità
TURBOGETTI e TURBOJET 	Campo di utilizzo Ormai è utilizzato solo in aviazione militare, in campo civile è stato soppiantato dai più economici e ecologici turbofan.	È l'unico propulsore che permette di garantire una sufficiente spinta nell'alto superersonico fino a velocità di 2.500 km/h (M=2,5) e quote di volo fino a 20.000 m.
TURBOELICHE e TURBOPROP 	Campo di utilizzo Ideali da trasporto con ichi passeggeri di medie dimensioni (es. trasporto regionale)	Permette di estendere i limiti dell'alta e velocità di circa 700 km/h e quote di volo di 12.000 m. I piccoli turboelica sono molto diffusi grazie ai bassi costi di gestione, gestione e manutenzione, alla lunga vita operativa e alla grande affidabilità.
TURBOFAN 	Campo di utilizzo Aviazione civile a medio e lungo raggio	Regimi di volo compresi tra l'alto subsonico ed il basso superersonico. Presenta una spinta unitaria più bassa e più consumi rispetto al turbogetto. Nell'alto superersonico i turbofan non garantiscono più la spinta necessaria e si deve necessariamente ricorrere al turbojet.

Motoelica, turboelica, turbogetto e turbofan: portate elaborate e velocità dei getti a confronto.

I campi di utilizzo

Propulsore	Velocità	Quote	Impiego
Motoelica	$\lesssim 500 \text{ km/h}$	$\lesssim 8000 \text{ m}$	turismo, scuola
Turboelica	$\lesssim 750 \text{ km/h}$	$\lesssim 12\,000 \text{ m}$	regionale, cargo
Turbofan	$M \approx 0,8$	10 000 m–13 000 m	trasporto, executive
Turbogetto	$M \lesssim 2,2$	$\lesssim 25\,000 \text{ m}$	militare, supersonico

Perché il regionale vola a elica

Alle basse velocità l'elica spreca poca energia cinetica nella scia: sulle tratte brevi i turboprop (ATR 72) consumano sensibilmente meno. Il Dornier 328 fu prodotto in *entrambe* le versioni sulla stessa cellula: decideva il profilo di missione.

Potenza o spinta?

come confrontare un'elica e un getto

Attenzione

Motoeliche e turboeliche si valutano in *potenza* all'albero (kW, hp); turbogetti e turbofan in *spinta* (kN): le lega la velocità di volo, $\Pi = T \cdot V$.

Esempio

Un turbofan che eroga $T = 120 \text{ kN}$ a $V = 250 \text{ m/s}$ sviluppa $\Pi = 120 \times 10^3 \text{ N} \times 250 \text{ m/s} = 30 \text{ MW}$: circa quarantamila cavalli, ordini di grandezza irraggiungibili per qualsiasi motore a pistoni aeronautico.

Numero e disposizione dei motori



Gondole subalari (A320, B737)

manutenzione facile; ala *scaricata* dal peso;
flusso indisturbato — ma detriti da terra e
forte imbardata in avaria.

Motori in coda (MD-80)

ala pulita, cabina silenziosa, poca imbardata
in avaria — ma coda pesante, obbligo della
coda a T, manutenzione in quota.

Tre, quattro motori: quando e perché

- i **trireattori** (B727, DC-10) nacquero quando le norme imponevano più di due motori sull'oceano: con le certificazioni ETOPS la formula è praticamente scomparsa;
- i **quadrireattori** restano necessari solo per i velivoli più grandi.

Un criterio di prima approssimazione

Spinta totale installata $\approx 20\%$ del peso massimo al decollo. È un *ordine di grandezza* didattico, non una norma: il valore reale dipende dal decollo con motore in avaria e dalle condizioni di certificazione.

Esercizio svolto

quanti motori per l'A380? (1/2)

Il criterio del 20 %

Dati) $m_{\text{MTOW}} = 560 \text{ t}$; motori della classe più potente disponibile: $\sim 32 \text{ t}$ di spinta ciascuno.

Modello) spinta installata $\approx 20 \%$ del peso al decollo.

Calcolo) $T_{\text{tot}} \approx 0,20 \times 560 \text{ t} = 112 \text{ t}$; tre motori: $3 \times 32 = 96 \text{ t}$ — *insufficienti*.

Esercizio svolto

quanti motori per l'A380? (2/2)

La risposta

Incognita) servono **quattro** motori: $4 \times 32 = 128$ t, con

$$\frac{T}{W} = \frac{128}{560} \approx 0,229.$$

Verifica) il margine copre il decollo a pieno carico con un motore in avaria: l'A380 è quadrireattore non per estetica, ma perché nessuna coppia di motori esistenti poteva sollevarlo.

Parte 9

Il senso di tutto questo

9

Da portare a casa

- La classificazione parte dalla *fisica*: Archimede per gli aerostati, Newton per le aerodine.
- Tre assi, tre moti, tre superfici, tre stabilità: la tabella va saputa a memoria.
- L'ala si descrive con pochi numeri (b , S , λ , MAC , AR , W/S) che governano prestazioni, peso e stabilità.
- Le sigle NACA *si decodificano*: ogni cifra è una grandezza geometrica.
- Sezione circolare, coda deportante, ruotino anteriore, turbofan: ogni «standard» ha una ragione fisica precisa.