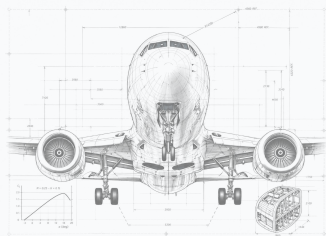


Atmosfera standard e fluidostatica

Atmosfera ISA, quote convenzionali e strumenti barometrici

prof. ing. Biagio Raucci

ITIS «E. Majorana» — Somma Vesuviana (NA)



Dove stiamo andando

Dove stiamo andando

L'aria è il **fluido operativo** del velivolo: portanza, resistenza e spinta nascono da uno scambio di quantità di moto con essa. Costruiamo il suo modello matematico e scopriamo come gli strumenti di bordo lo usano.

La teoria

- composizione e strati dell'atmosfera
- la legge di Stevino
- il modello di atmosfera standard
- le tre quote convenzionali

La pratica

- altimetro e Codice Q
- galleria del vento e tubo di Pitot
- la catena IAS–CAS–EAS–TAS
- esercizi in stile Esame di Stato

Parte 1

Perché studiare l'atmosfera

1

L'aria come fluido operativo del velivolo

Tutte le forze del volo dipendono dalle proprietà locali dell'aria: **densità** ρ , **pressione** p , **temperatura** T .

Formula chiave

La portanza è proporzionale alla *pressione dinamica* $q = \frac{1}{2} \rho V^2$: a parità di velocità, un'aria più rarefatta produce meno portanza.

Osservazione

Conseguenze concrete: corsa di decollo più lunga, rateo di salita ridotto, carichi diversi. Ma l'aria cambia con quota, stagione e meteo: senza un riferimento comune, impossibile confrontare due velivoli o tarare gli strumenti.

L'aria tipo: una convenzione condivisa

Definizione

L'*International Standard Atmosphere* (ISA), ISO 2533 e ICAO Doc. 7488, assegna p , ρ e T in funzione della sola quota, da valori fissati al livello del mare.

- serve per analisi e *confronto* delle prestazioni, progetto, dimensionamento strutturale, prove di volo;
- e per la *taratura* di altimetro, anemometro e variometro.

Nota

Lo scostamento si esprime in gradi: ISA+10 al mare significa 25 °C invece dei 15 °C standard.

Parte 2

Composizione e struttura dell'atmosfera

2

Di che cosa è fatta l'aria

Un miscuglio di gas in proporzioni *praticamente costanti* a tutte le quote di interesse aeronautico:

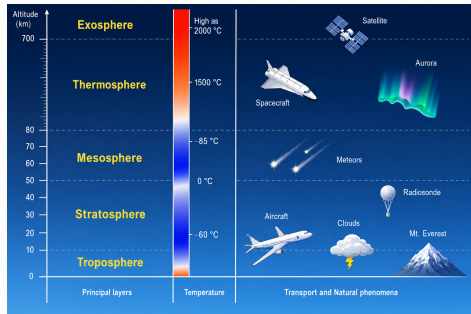
Costituente	Volume
Azoto (N ₂)	≈ 78,08 %
Ossigeno (O ₂)	≈ 20,95 %
Argo (Ar)	≈ 0,93 %
CO ₂ e altri	tracce

Osservazione

Composizione costante $\Rightarrow$ l'aria si tratta come un *unico gas* con costante specifica

$R = 287,05 \text{ J/(kg K)}$. È il primo mattone del modello.

La suddivisione in strati

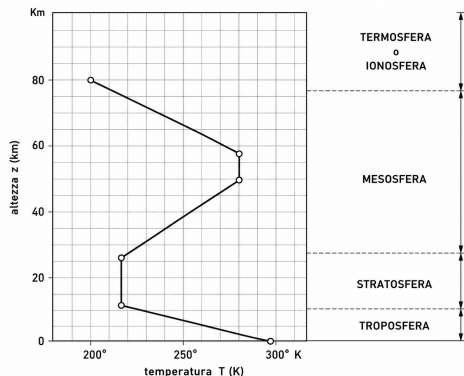


- **troposfera**: la **temperatura** decresce; qui meteo e traffico;
- **tropopausa**: $\approx -56,5\text{ °C}$;
- **stratosfera**: T costante, poi cresce (ozono);
- più su: mesosfera, termosfera, esosfera.

Nota

Modelleremo troposfera e bassa stratosfera: i voli restano lì.

Il profilo di temperatura standard



Nei primi 20 km l'ISA fissa un profilo semplice:

- **troposfera:** decrescita *lineare* da $T_0 = 288,15$ K con gradiente $a = 6,5$ °C ogni 1000 m;
- **stratosfera** (11–20 km): T costante, $T_{TP} = 216,65$ K.

Formula chiave

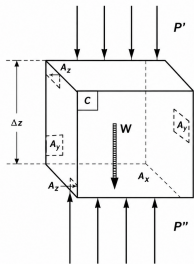
$$T(h) = T_0 - a h \quad (h \leq 11 \text{ km})$$

Parte 3

L'equilibrio statico dei fluidi: la legge di Stevino

3

Il bilancio di un elemento di fluido



P' = pressione sulla faccia superiore
($z + \Delta z/2$)

P'' = pressione sulla faccia inferiore
($z - \Delta z/2$)

A_x = area delle facce perpendicolari all'asse x

A_y = area delle facce perpendicolari all'asse y

A_z = area delle facce perpendicolari all'asse z

W = peso del volume di controllo

Δz = altezza del volume di controllo

Volume di controllo elementare di dimensioni Δx , Δy , Δz .

Le forze di pressione agiscono perpendicolarmente alle superfici; il peso agisce nella direzione $-z$.

In un fluido *in quiete* agiscono solo pressioni e peso. Su un parallelepipedo di base S e altezza Δz : $(p' - p'') S = \rho g (S \Delta z)$.

Dividendo per $S \Delta z$ e passando al limite:

Legge di Stevino

$$\frac{dp}{dz} = -\rho g$$

Il segno meno: salendo, la pressione *diminuisce*.

Che cosa ci dice davvero Stevino

Tre informazioni in una sola equazione:

1. su un piano orizzontale ($dz = 0$) la pressione non cambia: le superfici isobariche in quiete sono orizzontali;
2. la pressione varia solo in verticale e *cala* salendo;
3. il gradiente è proporzionale a ρg : dove il fluido è più denso, la pressione cala più in fretta.

Il senso di tutto questo

Da qui discendono il manometro a tubo a U, l'*altimetro barometrico* e il regolaggio altimetrico: misurata la pressione e nota la legge $p = p(z)$ dell'aria tipo, si risale alla quota. Il resto del percorso è, in fondo, l'integrazione di questa equazione.

Parte 4

Il modello di atmosfera standard

4

Le tre ipotesi del modello

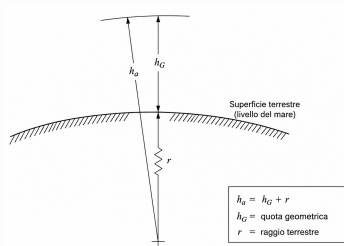
1. **aria secca e di composizione costante;**
2. **gas perfetto:** vale l'equazione di stato $p = \rho R T$;
3. **equilibrio statico:** vale la legge di Stevino.

Il modello assume inoltre gravità costante: $g \equiv g_0 = 9,806\,65 \text{ m/s}^2$.

Nota

L'equazione di stato traduce due fatti fisici: la pressione cresce con l'energia cinetica media delle molecole (T) e con il numero di urti per unità di tempo e superficie (ρ).

Quota geometrica e quota geopotenziale



In realtà g cala con la quota. La **quota geopotenziale** h assorbe questa variazione imponendo l'uguaglianza del lavoro del peso, $g \, dh_G = g_0 \, dh$:

Formula chiave

$$h = \frac{r}{r + h_G} h_G$$

Quanto pesa la correzione?

$h_G = 11\,000 \text{ m} \Rightarrow h \approx 10\,981 \text{ m}$: sotto lo 0,2%. Nel volo: $h \approx h_G$, $g \approx g_0$.

L'integrazione nella troposfera

Gas perfetto + Stevino, eliminata ρ e con $T = T_0 - a h$:

$$\frac{dp}{p} = -\frac{g_0}{RT} dh \quad \xrightarrow{\text{integrando}} \quad \text{con } \theta = \frac{T}{T_0}, \delta = \frac{p}{p_0}, \sigma = \frac{\rho}{\rho_0} :$$

Leggi della troposfera

$$\delta = \theta^{g_0/(Ra)} = \theta^{5,256}, \quad \sigma = \theta^{g_0/(Ra)-1} = \theta^{4,256}$$

Approfondimento

Equivalgono a una *politropica* $p = C\rho^n$ con $n = g_0/(g_0 - Ra) \approx 1,235$: un solo numero, tra isoterma (1) e adiabatica (1,4), riassume la troposfera media.

L'integrazione nella stratosfera

Nella bassa stratosfera $T = T_{TP} = 216,65 \text{ K}$ è costante: l'integrale diventa esponenziale.

Leggi della stratosfera

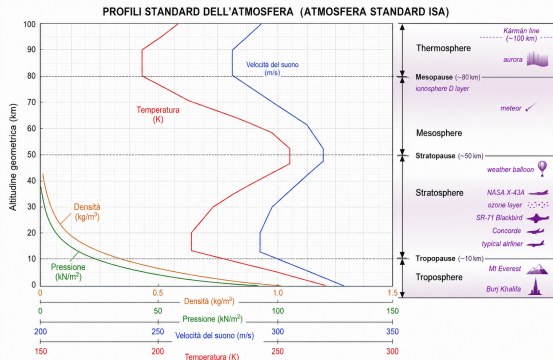
$$\frac{p}{p_{TP}} = \exp \left[-\frac{g_0}{R T_{TP}} (h - h_{TP}) \right], \quad \frac{\rho}{\rho_{TP}} = \frac{p}{p_{TP}}$$

con $h_{TP} = 11\,000 \text{ m}$ (pedice TP = tropopausa).

Osservazione

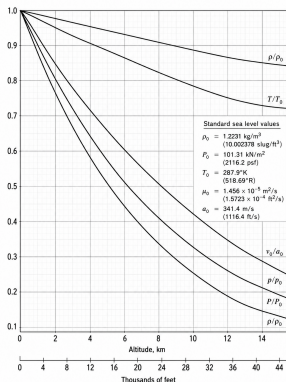
A T costante, p e ρ calano nello stesso rapporto: è un'isoterma ($n = 1$).

L'andamento complessivo con la quota



- p e ρ decrescono in modo monotono e «morbido»;
- T segue il profilo spezzato: lineare, poi costante;
- $c = \sqrt{\gamma RT}$ dipende solo da T : nel tratto isoterma resta ferma a 295,1 m/s.

I tre rapporti adimensionali



I rapporti θ , δ , σ sono il modo più comodo di usare il modello: numeri puri, indipendenti dalle unità di misura.

Formula chiave

$\sigma = \frac{\delta}{\theta}$ — è l'equazione di stato in forma adimensionale.

Nota

Torneranno ovunque: quote convenzionali, prestazioni, anemometria.

Costanti e valori al livello del mare

Grandezza	Simbolo	Valore
Temperatura	T_0	288,15 K = 15 °C
Pressione	p_0	101 325 Pa = 1013,25 hPa
Densità	ρ_0	1,225 kg/m ³
Velocità del suono	c_0	$\approx 340,3$ m/s
Gravità	g_0	9,806 65 m/s ²
Costante dell'aria	R	287,05 J/(kg K)
Gradiente termico	a	0,0065 K/m
Quota tropopausa	h_{TP}	11 000 m $\approx$ 36 089 ft
Temp. tropopausa	T_{TP}	216,65 K = -56,5 °C

Questi valori vanno saputi: sono l'alfabeto di ogni esercizio.

Esempio svolto: le condizioni a 5000 m

Condizioni ISA a 5000 m

- 1) **Dati:** $h = 5000$ m (troposfera), costanti ISA.
- 2) **Modello:** leggi della troposfera.
- 3) **Calcolo:**

$$T = 288,15 - 0,0065 \cdot 5000 = 255,65 \text{ K}, \quad \theta = \frac{255,65}{288,15} = 0,8872$$

$$\delta = \theta^{5,256} \approx 0,5331 \Rightarrow p \approx 54\,020 \text{ Pa}; \quad \sigma = \theta^{4,256} \approx 0,6009 \Rightarrow \rho \approx 0,736 \text{ kg/m}^3$$

- 4) **Verifica:** i valori coincidono con la tabella ISA $\Rightarrow$ modello e calcolo coerenti.

La tabella dell'atmosfera standard

h [m]	T [K]	p [Pa]	ρ [kg/m ³]
0	288,15	101325	1,2250
2000	275,15	79501	1,0066
4000	262,17	61660	0,8194
6000	249,19	47218	0,6601
8000	236,22	35652	0,5258
10000	223,25	26500	0,4135
11000	216,65	22632	0,3639
16000	216,65	10353	0,1665
20000	216,65	5529	0,0889

Osservazione

È lo *strumento di lavoro*: nota una grandezza (es. la pressione dell'altimetro) si risale alle altre e alla quota.

Nota

A 11 km la pressione è un quinto di quella al suolo: ecco perché le cabine sono pressurizzate.

Parte 5

Quota pressione, temperatura e densità

5

Il problema: la realtà non segue la curva

Il modello ISA è una *curva fissa*: scelta la quota, restituisce p , T , ρ mutuamente coerenti. L'atmosfera reale se ne discosta — soprattutto in temperatura.

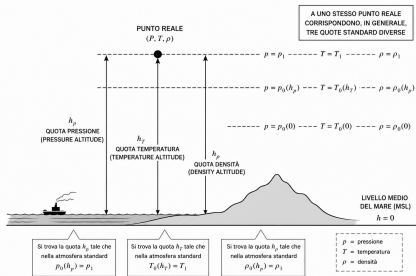
Attenzione

Gli strumenti sono tarati sullo standard: ogni grandezza misurata, letta sulla curva ISA, indica una quota *diversa*. Non è un errore: è la firma dello scostamento della realtà dal modello.

Nota

L'ISA è come una *tabella di conversione* fissa tra grandezza e quota: fuori standard, ogni grandezza restituisce la propria quota *equivalente*.

Le tre quote convenzionali



Definizione

Quota pressione z_p , temperatura z_T , densità z_ρ : la quota ISA a cui corrisponde il valore misurato della grandezza.

Attenzione

Non sono tre posizioni: il velivolo sta in un solo punto; sono tre modi di esprimerne le misure.

Come si ricavano in pratica

1. **quota pressione:** la dà l'altimetro regolato sullo standard (QNE, 1013,25 hPa);
2. **quota temperatura:** legge lineare invertita, $z_T = (T_0 - T)/a$;
3. **quota densità:** ρ non si misura, si *calcola* con $\rho = p/(RT)$; da $\sigma = \rho/\rho_0$ si legge la quota in tabella.

Il legame tra le tre quote

$$\sigma = \frac{\delta}{\theta} \quad \Longleftrightarrow \quad \theta = \frac{\delta}{\sigma}$$

Note due quote, la terza è determinata.

Aria calda, aria fredda

Guardiamo $\rho = p/(RT)$ a pressione fissata:

- giornata **calda**: ρ più bassa, $z_\rho > z_p$ — il velivolo si comporta come se fosse *più in alto* di quanto segni l'altimetro;
- giornata **fredda**: aria più densa, $z_\rho < z_p$, prestazioni migliori.

Da ricordare

Caldo $\Rightarrow$ aria rarefatta $\Rightarrow$ quota densità elevata $\Rightarrow$ prestazioni ridotte. Aeroporto in quota + giornata calda: corsa di decollo lunga e salita pigra già al suolo.

Quale quota conta, e per chi

- la **quota pressione** serve all'ATC per la *separazione verticale*: tutti gli altimetri sullo stesso datum (QNE);
- la **quota densità** governa *prestazioni e progetto*: portanza, spinta e potenza dipendono da ρ ; i diagrammi dei manuali di volo sono riferiti a essa;
- la **quota temperatura** è soprattutto un passaggio di calcolo verso la quota densità.

Esempio svolto: le tre quote in una giornata calda

Altimetro su 5000 m, T esterna = -5°C (268,2 K)

- 1) **Quota pressione** (dall'altimetro): $z_p = 5000$ m, cui corrisponde $p = 54\,019$ Pa.
- 2) **Quota temperatura**: $z_T = (288,15 - 268,2)/0,0065 \approx 3070$ m.
- 3) **Quota densità**:

$$\rho = \frac{54019}{287,05 \cdot 268,2} \approx 0,702 \text{ kg/m}^3, \quad \sigma \approx 0,573 \Rightarrow z_\rho \approx 5450 \text{ m}.$$

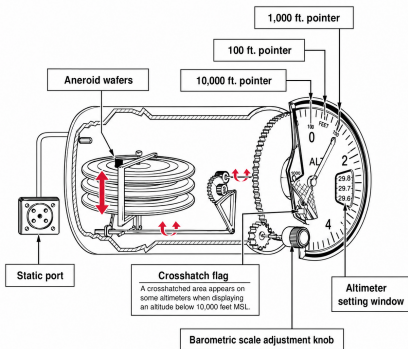
- 4) **Verifica**: $\delta/\theta = 0,533/0,931 \approx 0,573 = \sigma$ ✓ — il velivolo vola circa 450 m *più in alto* di quanto segni l'altimetro.

Parte 6

Regolaggio altimetrico e separazione verticale

6

L'altimetro barometrico

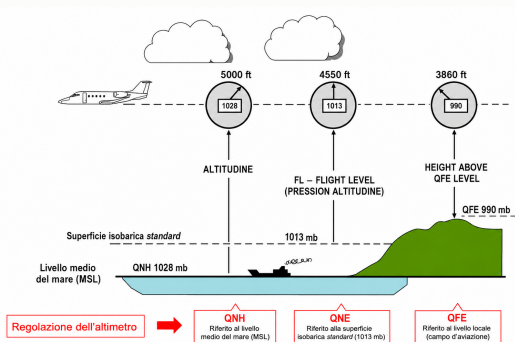


Un *barometro aneroide*: una capsula sotto vuoto si deforma con la pressione statica; i leveraggi portano la deformazione alle lancette. Nota $p = p(z)$ dell'aria tipo, la pressione diventa quota.

Attenzione

L'altimetro indica la distanza da una *superficie isobarica di riferimento*: coincide con la quota reale solo in atmosfera esattamente standard.

Il regolaggio altimetrico: il Codice Q



- **QNH:** pressione reale al mare $\Rightarrow$ *altitudine*; a terra segna l'elevazione dell'aeroporto;
- **QNE** (1013,25 hPa): *quota pressione*; in piedi/100 dà il Livello di Volo (FL200 = 20 000 ft);
- **QFE:** pressione della pista $\Rightarrow$ *altezza sul campo, zero a terra*.

Le correzioni di pressione e di temperatura

Le isobare non sono mai piani orizzontali perfetti:

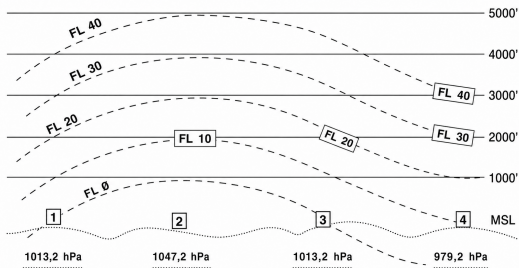
- la **pressione** al mare cambia ogni giorno: circa 28 ft per ogni hPa di scostamento (si passa alla quota QNH);
- la **temperatura** alza (caldo) o abbassa (freddo) le isobare.

Correzione empirica di temperatura

$$\Delta z \text{ [ft]} \approx \frac{4 \cdot (\text{QNH Altitude}) \cdot \Delta t}{1000}$$

con Δt scostamento rispetto allo standard.

La separazione verticale degli aeromobili

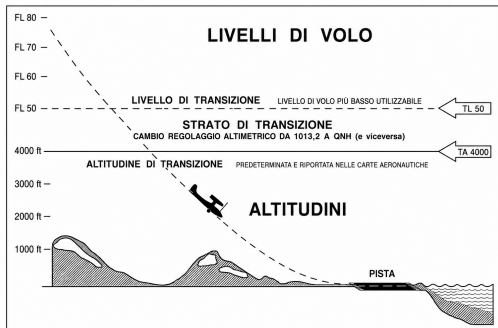


Con tutti gli altimetri su QNE, ogni scostamento dell'atmosfera agisce *allo stesso modo* su tutti: la separazione verticale resta garantita, qualunque sia la quota geometrica.

Attenzione

Mescolare QNH e QNE in zone a pressione variabile riduce la separazione e, con QNH basso, avvicina agli ostacoli: serve l'ATC.

Altitudine e livello di transizione



- **TA**: fissa per aeroporto (≥ 3000 ft); sotto si vola in QNH;
- **TL**: primo FL utilizzabile, varia con il QNH del giorno; sopra si vola in QNE;
- strato TA–TL (mai < 1000 ft): qui si cambia regolaggio.

Nota

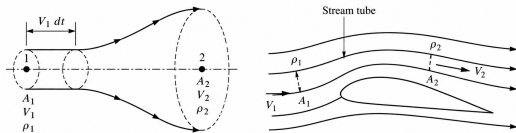
Napoli/Capodichino: TA = 8000 ft;
con QNH 995–1013 hPa, TL = FL95.

Parte 7

Misura della velocità rispetto all'aria



L'equazione di continuità



In regime stazionario la massa non si accumula: la **portata massica** $\dot{m} = \rho AV$ si conserva.

Equazione di continuità

$$\rho_1 A_1 V_1 = \rho_2 A_2 V_2$$

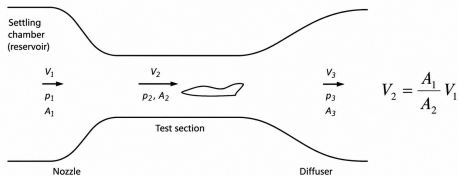
Lege densità, area e velocità in due sezioni qualsiasi dello stesso tubo di flusso.

Il caso incomprimibile e le gallerie del vento

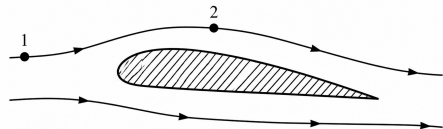
Per $M \lesssim 0,3$ la densità è di fatto costante e la continuità diventa geometrica: l'ugello convergente accelera il flusso, il diffusore lo rallenta.

Formula chiave

$$A_1 V_1 = A_2 V_2 \implies V_2 = \frac{A_1}{A_2} V_1 \quad \text{— dove il condotto si stringe, il flusso accelera.}$$



Il teorema di Bernoulli



Conservazione dell'*energia* per fluido non viscoso e incompressibile, lungo una linea di corrente:

Teorema di Bernoulli

$$\underbrace{p}_{\text{statica}} + \underbrace{\frac{1}{2}\rho V^2}_{\text{dinamica}} = \underbrace{p_t}_{\text{totale}} = \text{cost}$$

Dove la velocità cresce, la pressione statica cala: è il meccanismo della portanza.

Continuità + Bernoulli: la velocità in galleria

Tra calma (1) e prova (2), eliminando V_1 : basta un Δp statico.

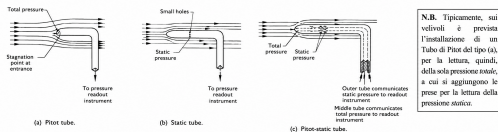
Formula di Venturi

$$V_2 = \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho[1 - (A_2/A_1)^2]}}$$

$$A_1/A_2 = 9, \quad p_1 - p_2 = 800 \text{ Pa}, \quad \rho = \rho_0$$

$$V_2 = \sqrt{\frac{1600}{1,225 \cdot 0,9877}} \approx 36,4 \text{ m/s.}$$

Il tubo di Pitot



Nota

Nelle formule compare la densità *alla quota di volo*: senza atmosfera standard non si legge nemmeno la velocità.

Misura *puntuale*: si rileva $\Delta p = p_t - p_s$.

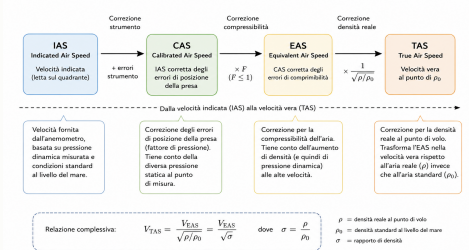
Regime incompressibile

$$V = \sqrt{2(p_t - p_s)/\rho}$$

Regime comprimibile ($M < 1$), $\gamma = 1,4$

$$V = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \frac{p_s}{\rho} \left[\left(\frac{\Delta p}{p_s} + 1 \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right]}$$

La catena delle velocità



- **IAS:** lettura del quadrante, con gli errori dello strumento;
- **CAS:** IAS corretta dagli errori di posizione della presa;
- **EAS:** CAS corretta dalla comprimibilità, $V_{EAS} = F V_{CAS}$, $F \leq 1$;
- **TAS:** velocità vera, $V_{TAS} = V_{EAS}/\sqrt{\sigma}$.

Perché CAS ed EAS non coincidono

L'anemometro misura *una sola* grandezza, $\Delta p = p_t - p_s$, ma è tarato su p_0, ρ_0 .
Dalla stessa lettura nascono tre velocità:

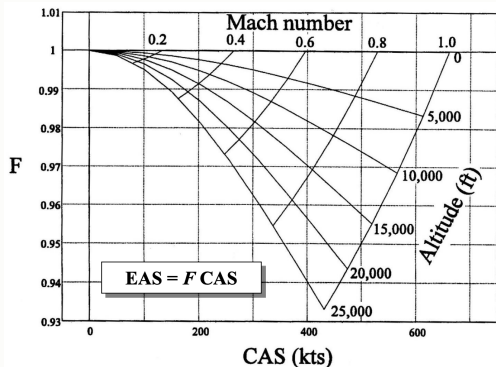
$$V_{\text{CAS}}(p_0, \rho_0), \quad V_{\text{EAS}}(p_s, \rho_0), \quad V_{\text{TAS}}(p_s, \rho) = \frac{V_{\text{EAS}}}{\sqrt{\sigma}}.$$

In quota $p_s < p_0$, dunque sempre $V_{\text{EAS}} \leq V_{\text{CAS}}$.

Fattore di comprimibilità

$$F = \frac{V_{\text{EAS}}}{V_{\text{CAS}}} = \sqrt{\frac{p_s}{p_0} \frac{(\Delta p/p_s + 1)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1}{(\Delta p/p_0 + 1)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1}} \quad (F \leq 1)$$

Il fattore F in pratica: i diagrammi



In pratica F si legge sui diagrammi dei manuali di volo, in funzione di CAS e quota; in alternativa, correzione additiva $V_{EAS} = V_{CAS} + \Delta V_c$ con $\Delta V_c \leq 0$.

Nota

$F \approx 1$ a bassa velocità e quota; cala al crescere di Mach e quota, dove p_s è più piccola.

La procedura operativa, sempre nello stesso ordine

1. si parte dalla **IAS** letta sull'anemometro;
2. errori di strumento e posizione $\Rightarrow$ **CAS**;
3. fattore di comprimibilità: $V_{EAS} = F V_{CAS} \Rightarrow$ **EAS**;
4. correzione di densità: $V_{TAS} = V_{EAS} / \sqrt{\sigma} \Rightarrow$ **TAS**.

Da ricordare

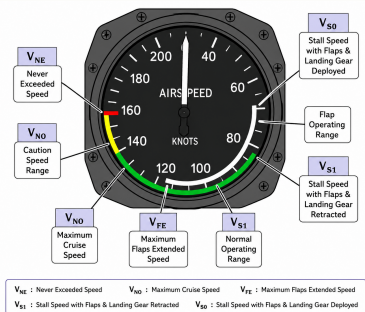
IAS $\rightarrow$ CAS $\rightarrow$ EAS $\rightarrow$ TAS: quattro passi, sempre gli stessi, per *ogni* problema di anemometria.

Esempio svolto: dalla pressione dinamica alla TAS

$$h = 8000 \text{ m: } p_s = 35\,652 \text{ Pa, } \sigma \approx 0,429, \Delta p = 8000 \text{ Pa}$$

- 1) **CAS** (con p_0, ρ_0 ; $2\gamma/(\gamma - 1) = 7$): $V_{\text{CAS}} = \sqrt{7 \cdot 82714 [(1,0790)^{0,2857} - 1]} \approx 112,7 \text{ m/s.}$
- 2) **EAS** (con p_s, ρ_0): $V_{\text{EAS}} = \sqrt{7 \cdot 29104 [(1,2244)^{0,2857} - 1]} \approx 110,1 \text{ m/s.}$
- 3) **Fattore**: $F = 110,1/112,7 \approx 0,977.$
- 4) **TAS**: $V_{\text{TAS}} = 110,1/\sqrt{0,429} \approx 168 \text{ m/s.}$
- 5) **Commento**: comprimibilità $\approx 2,6 \text{ m/s}$, densità quasi 58 m/s : in quota è la densità a fare la parte del leone.

Gli archi colorati dell'anemometro

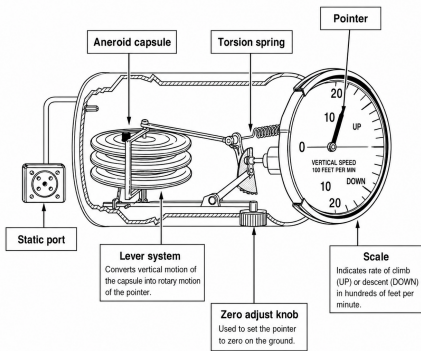


- **arco bianco:** flap estesi, da V_{S0} a V_{FE} ;
- **arco verde:** uso normale, da V_{S1} a V_{NO} ;
- **arco giallo:** cautela, da V_{NO} a V_{NE} , solo in aria calma;
- **linea rossa:** V_{NE} , mai superarla ($\approx 0,9 V_D$, con $V_D \geq 1,25 V_C$).

Nota

Le definizioni discendono dalle norme di certificazione CS-23 / CS-25.

Il variometro



Il variometro (VSI) misura la **velocità verticale**. Cassa e capsula sono collegate alla presa statica, la cassa attraverso un *capillare calibrato*: il ritardo della pressione in cassa deforma la capsula, e la deformazione diventa rateo di salita o discesa.

Osservazione

Altimetro, anemometro, variometro: tre strumenti, *un solo* tipo di misura — la pressione.

Parte 8

Unità di misura e conversioni

8

Le conversioni che servono davvero

Da	A
1 nmi (miglio nautico)	1852 m
1 smi (miglio statuto)	1609 m
1 ft	0,3048 m
1 kt (nodo)	1,852 km/h = 1,151 mph
1 ft/min	0,005 08 m/s
1 inHg	33,8639 hPa
1 hp (anglosassone)	$\Pi = 745,7 \text{ W}$
1 hp metrico (CV)	$\Pi = 735,5 \text{ W}$

Attenzione

Miglio nautico $\neq$ statuto; horsepower $\neq$ cavallo vapore.

Parte 9

Esercizi

9

Esercizio svolto: dalla quota densità alla temperatura

L'altimetro legge 4000 m; la quota densità è 3000 m. Trovare T .

- 1) **Dati:** $z_p = 4000$ m, $z_\rho = 3000$ m.
- 2) **Modello:** legame adimensionale $\theta = \delta/\sigma$.
- 3) **Dalla tabella ISA:** $\sigma(3000 \text{ m}) = 0,742$; $\delta(4000 \text{ m}) = 0,608$.
- 4) **Calcolo:**

$$\theta = \frac{0,608}{0,742} \approx 0,82 \Rightarrow T = \theta T_0 \approx 236,3 \text{ K} = -36,9^\circ \text{C}.$$

- 5) **Verifica:** $z_\rho < z_p \Rightarrow$ aria più densa del previsto $\Rightarrow$ giornata *fredda*, coerente con T ben sotto lo standard di quota.

Esercizio svolto: da CAS a EAS e TAS

$V_{CAS} = 300 \text{ kt}$, $F = 0,96$, $\sigma = 0,30$. **Trovare EAS e TAS.**

- 1) **Dati:** CAS, fattore di comprimibilità, rapporto di densità.
- 2) **Modello:** catena delle velocità.
- 3) **Velocità equivalente:** $V_{EAS} = F V_{CAS} = 0,96 \cdot 300 = 288 \text{ kt}$.
- 4) **Velocità vera:**

$$V_{TAS} = \frac{288}{\sqrt{0,30}} \approx 526 \text{ kt } (\approx 974 \text{ km/h}).$$

- 5) **Commento:** $\sigma = 0,30$ colloca il volo intorno ai 9000 m; la TAS supera la CAS di oltre il 70 %, quasi tutto per la bassa densità.

Esercizi proposti (per casa)

1. Altimetro standard su 7000 m, T esterna -10°C : quota densità?
2. Pista a 1000 m, $p = 85\,000\text{ Pa}$ e $T = 15^{\circ}\text{C}$ sulla pista; altimetro su QFE; in volo legge 9000 m. Quota vera sul mare e sulla pista?
3. Alta pressione: al mare $p = 105\,000\text{ Pa}$, $T = 25^{\circ}\text{C}$; l'altimetro standard segna 8000 m. Quota vera?
4. Calcolare T , p , ρ standard a 8000 m e confrontare con la tabella.
5. Quota geopotenziale per $h_G = 20\,000\text{ m}$: quanto vale lo scostamento?
6. $V_{\text{CAS}} = 300\text{ kt}$, $F = 0,96$, $\sigma = 0,30$: stimare EAS e TAS.

Nota

Soluzioni complete, passo per passo, nell'appendice della monografia.

Il senso di tutto questo

Il senso di tutto questo

Da una domanda semplice — *com'è fatta l'aria in cui voliamo?* — e tre soli ingredienti (gas perfetto, Stevino, profilo di temperatura) abbiamo costruito un modello che regge l'intera pratica del volo: tabella ISA, quote convenzionali, regolaggio altimetrico, catena delle velocità. Ogni strumento barometrico di bordo è un'applicazione della legge di Stevino letta attraverso l'atmosfera tipo.

Da ricordare

Da ricordare: $\delta = \theta^{5,256}$, $\sigma = \theta^{4,256}$, $\sigma = \delta/\theta$, $V_{TAS} = V_{EAS}/\sqrt{\sigma}$ — quattro relazioni, e i problemi d'esame si aprono come porte.

Riferimenti

- V. Losito, *Fondamenti di Aeronautica Generale*, Accademia Aeronautica, Napoli, 1994.
- J.D. Anderson, *Introduction to Flight*, McGraw-Hill.
- ICAO, *Manual of the ICAO Standard Atmosphere*, Doc. 7488; ISO 2533.
- Serie Raucci, monografia *Caratteristiche dell'atmosfera e tabelle di conversione* (testo completo, esercizi e soluzioni).