

di Marco Tadini

Altimetria

La posizione verticale di un aeromobile, ai fini delle procedure di volo e di controllo del traffico aereo, viene determinata mediante uno strumento detto *altimetro*, fondamentalmente costituito da un *barometro aneroide*, cioè da un misuratore di pressione graduato per indicare incrementi di quota invece che variazioni bariche; le letture altimetriche sono rese possibili grazie a una capsula, solidale ad un sistema indicatore, all'interno della quale è stato creato il vuoto e che reagisce, rispettivamente contraendosi o espandendosi, agli aumenti o alle diminuzioni della pressione statica esterna, cioè della pressione atmosferica che agisce su un aeromobile in volo e che è indipendente dal moto dell'aeromobile stesso attraverso l'aria.

La taratura della capsula interna all'altimetro viene fatta in atmosfera ISA (*ICAO Standard Atmosphere*), cioè in un'aria tipo dalle proprietà riportate nelle tabelle di **Figura 1**. Poiché l'altimetro determina la sua quota (cioè la distanza da una superficie di riferimento) misurando la pressione atmosferica al livello del proprio volo o, in altre parole, considerando il peso dell'aria che lo preme dall'alto, ciò implica che se l'aeromobile si trovasse realmente a volare in atmosfera standard, alla pressione di 1013,25 hPa verrebbe associata una quota pari a "zero", a quella di 850 hPa una pari a 1457 metri e così via, secondo i dati caratteristici delle superfici isobariche¹ in atmosfera ISA.

In realtà, il più delle volte l'atmosfera reale si discosta da quella ISA, generando così errori nella valutazione delle quote. Agli errori altimetrici dovuti a fattori strumentali e a quelli di lettura si devono così aggiungere quel-

¹ Viene detta *isobarica* una superficie costituita da punti aventi tutti lo stesso valore di pressione atmosferica.

li più prettamente meteorologici, dovuti appunto al fatto che un altimetro non può misurare la temperatura dell'aria e la sua densità, parametri le cui variazioni sono intrinsecamente legate tra loro e in grado di influire su quelle del campo barico e, di conseguenza, anche sulla condotta di volo di un aereo. Abbiamo, infatti, già visto come una variazione nella temperatura dell'aria possa riflettersi in variazioni della sua densità, aumentando o diminuendo il numero di molecole di atmosfera presenti nell'unità di volume e, quindi, aumentando o diminuendo il numero di molecole disponibili per "creare portanza". Una variazione nella temperatura dell'aria crea, oltretutto, anche venti locali (ad esempio, le brezze), che, se non opportunamente considerati in fase di volo, possono portare a variazioni di rotta anche consistenti.

Gli errori di temperatura sono provocati dal discostamento del gradiente termico verticale reale da quello stabilito per l'aria tipo; l'altimetro darà quindi indicazioni corrette solo nel caso in cui la temperatura esterna all'aeromobile risulterà uguale a quella prevista per l'atmosfera ISA a quella stessa quota. Com'è infatti evidenziato in **Figura 2a**, un aeromobile che vola seguendo la superficie isobarica identificata dal valore della pressione atmosferica a quella quota, si trova ad una quota reale pari a quella indicata dall'altimetro solo in condizioni atmosferiche standard, cioè solo se all'interno della sottostante colonna d'aria la temperatura varia in ragione di 0,65°C ogni 100 metri di quota. Nella realtà, pur rimanendo identica la

pressione al suolo e alla quota dell'aeromobile, se viene variata la temperatura dell'aria nelle colonne, rendendole una più calda e l'altra più fredda rispetto allo standard, allora nel primo caso l'altimetro leggerà quote inferiori a quella vera dell'aeromobile (**Figura 2b**), nel secondo maggiori (**Figura 2c**).

Gli errori di pressione sono invece dovuti alla differenza tra la pressione effettiva ad un certo livello di riferimento e quella che vi sarebbe in condizioni di aria tipo. La pressione atmosferica su ogni punto della terra è naturalmente soggetta a continue variazioni, così come l'effettiva posizione nello spazio della superficie isobarica di riferimento (**Figura 3**), che potrà oltretutto risultare al di sopra come anche al di sotto del livello del mare. Per conoscere la posizione verticale di un aeromobile rispetto ad un punto, negli altimetri vi è un

Figura 1.
Proprietà dell'atmosfera standard ICAO

Proprietà al livello medio del mare MSL, alla latitudine di 45°

Temperatura	15°C
Gradiente termico verticale	0,65°C/100m nei primi 11 km di quota
Pressione	1013,25 hPa
Peso molecolare	28,966
Densità	1,226 kg/m ³
Umidità relativa	15%

Profilo termico dell'atmosfera ISA

MSL	15°C
Troposfera (da MSL a 11 km)	diminuzione di 0,65°C/100m
Tropopausa (da 11 a 20 km)	-56°C
Stratosfera (da 20 a 32 km)	aumento di 0,1°C/100m
Stratopausa (32 km)	-44,5°C

Superfici isobariche in atmosfera ISA

Si noti la costanza della temperatura tra 200 e 100 hPa, indice della presenza della tropopausa, e il successivo aumento della temperatura con la quota, caratteristico delle superfici isobariche stratosferiche.

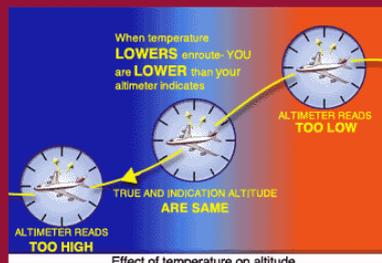
Pressione hPa	Altitudine m	Altitudine ft	Temperatura °C
1000	111	364	+14,3
850	1457	4781	+5,5
700	3012	9882	-4,6
500	5574	18289	-21,2
400	7185	23574	-31,7
300	9164	30065	-44,6
200	11784	38662	-56,5
100	16180	53083	-56,5
50	20576	67507	-55,9
30	23849	78244	-52,7
20	26481	86881	-50,0
10	31055	101885	-45,5

dispositivo che permette di variare il dato di pressione di riferimento; a tal fine, nel quadrante dello strumento esiste una finestrella graduata in valori di pressione, che, mediante una rotellina, può essere regolata in modo da farle indicare un voluto dato di riferimento. Questa operazione si chiama *settaggio* o *regolazione altimetrica* e permette quindi di effettuare letture di quota, riferite a differenti superfici isobariche.

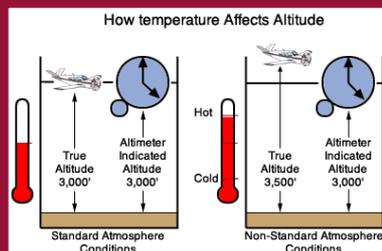
In funzione del riferimento utilizzato, che può essere convenzionale o reale, esistono così varie procedure di regolaggio altimetrico e chi opera in ambito aeronautico sa perfettamente che i termini *altezza*, *altitudine* e *livello di volo* non sono sinonimi, ma indicano le conseguenti diverse possibilità esistenti per indicare la posizione verticale di un aeromobile, in funzione proprio del riferimento prescelto. Si ricordi anche che la conoscenza della quota di un aeromobile è di fondamentale importanza non solo per mantenere la distanza di sicurezza dal suolo, ma anche per garantire le separazioni verticali tra i diversi velivoli e per seguire una determinata traiettoria di procedura, soprattutto in fase di decollo e di avvicinamento.

L'**altezza** è la posizione verticale di un aeromobile *al di sopra del suolo o della superficie*, di qualunque natura essa sia (terra o acqua); tale posizione viene espressa in *ft² AGL (Above Ground Level)* o *ft ASFC (Above Surface)*. Un altimetro indicherà l'*altezza* dell'aereo sulla verticale di un aeroporto quando settato al valore di pressione misurato sulla pista dell'aeroporto medesimo; tale valore viene convenzionalmente indicato con il termine di **QFE**³. Lo stesso altimetro, dopo l'inserimento del QFE quale riferimento e con l'aeromobile fermo sulla pista dell'aeroporto che ne ha fornito il dato, dovrà quindi riportare un'*altezza* tanto più prossima a 0 (zero), quanto più la pressione al livello di pista si avvicina al valore standard previsto per una quota

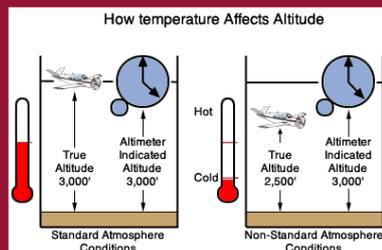
Figura 2.



(a) Un aeromobile in volo seguendo una rotta isobarica, cioè mantenendo costante l'indicazione fornita dal proprio altimetro, si troverà a seguire una rotta in salita se si dirige verso una zona di aria calda, in discesa se si dirige verso una zona a temperatura decrescente.



delle superfici isobariche, che tendono ad allontanarsi l'una dall'altra. Anche l'aereo, vincolato alla propria rotta isobarica, subisce gli effetti di un tale spostamento verso l'alto, vedendosi così trasportato ad una quota maggiore di quella indicata dal proprio altimetro, rimasto invece fermo sull'indicazione corrispondente a quella del riferimento isobarico in aria standard.



quindi trasportato verso il basso ed il suo anemometro segna ora una quota maggiore di quella effettiva.

(b) Un aumento della temperatura dell'aria all'interno della colonna compresa tra l'aeromobile in volo e la superficie di riferimento, si riflette infatti in un aumento della sua densità, cioè al "gonfiarsi"

(c) Il raffreddamento della colonna d'aria porta invece al fenomeno opposto, cioè al riavvicinamento delle superfici isobariche causato dall'aumentata densità atmosferica; anche l'aereo viene

pari a quella dell'aeroporto. Il QFE viene raramente utilizzato in ambito aeronautico e non ha comunque alcuna utilità nel volo in rotta.

L'**altitudine** è la posizione verticale di un aeromobile *al di sopra del livello medio del mare in condizioni standard*, espressa in *ft AMSL (Above Mean Sea Level)*, questa pressione venendo anche indicata come *settaggio altimetrico locale (local altimeter setting)*. Un altimetro indicherà l'*altitudine* di un aeromobile sulla verticale di un aeroporto quando settato ad un valore di pressione detto **QNH**, che rappresenta la trasformazione del QFE in quello che sarebbe il dato barico misurato sulla pista dell'aeroporto, se questo fosse al livello del mare e se l'atmosfera si trovasse in condizioni standard. Lo stesso altimetro, dopo l'inserimento del QNH quale riferimento e con l'aeromobile fermo sulla pista dell'aeroporto che ne ha fornito il dato, dovrà ovviamente riportare un'*altitudine* pari a quella dell'aeroporto stesso. In effetti, quando il pilota chiede a terra il QNH, egli intende chiedere con quale pressione deve regolare il suo altimetro perché, se fosse a terra sullo stesso punto della stazione, esso indichi l'*altitudine*

effettiva della stazione medesima. Per un aeromobile che usa il QNH, la distanza verticale dagli ostacoli è ottenibile per differenza tra l'*altitudine* letta sull'altimetro e la nota elevazione degli ostacoli stessi (ottenibile dalle carte aeronautiche).

Un **livello di volo**, infine, è la posizione verticale di un aeromobile *al di sopra della superficie isobarica 1013,25 hPa*

³ Le lettere utilizzate nel cosiddetto codice Q non hanno alcun significato letterale, trattandosi di ciò che rimane di un esteso sistema di notazione a tre lettere usato ai tempi della telegrafia; tuttavia, almeno una volta in un campo dominato dalla lingua inglese come quello aeronautico, noi italiani siamo facilitati a ricordare il significato di QFE (ma purtroppo solo di quello) come scherzoso acronimo di *Quota del Filo d'Erba*... Più seriamente, una lista di tutti i significati delle voci di codice Q, solo alcune delle quali ancora oggi usate in ambito aviatorio, può essere facilmente reperita sui libri di testo o su Internet, per esempio alla pagina <http://www.cbug.org.uk/allqcodes.htm>.

² Secondo consuetudine, tutte le posizioni verticali sono espresse nell'unità anglosassone dei *feet*, *ft* (piedi): 1 ft = 30,48 cm.

(29,92 in_{Hg} nella notazione anglosassone⁴), questa pressione venendo anche indicata come *settaggio altimetrico standard* (*standard altimeter setting*). Un altimetro indicherà, dunque, il *livello di volo* di un aeromobile quando il suo altimetro è settato sui 1013,25 hPa, valore altrimenti indicato anche con la voce di codice **QNE**. Tale posizione viene espressa in centinaia di piedi, preceduta dalla dizione FL, acronimo di *Flight Level* (FL330 rappresenta, ad esempio, una posizione verticale di 33000 ft al di sopra della superficie isobarica standard); conseguentemente, il sistema dei *livelli di volo* consiste in una serie di livelli paralleli di pressione atmosferica costante, tra loro separati da specifici intervalli e con il livello zero coincidente con quello che ha come riferimento la 1013,25 hPa.

Con il settaggio altimetrico sul QNE, lo strumento indica, dunque, l'altitudine effettiva sopra un dato punto sul livello del mare, purché su tale punto la pressione esistente sia 1013,25 hPa. Ogni qualvolta la pressione è diversa da tale valore, cioè quando le caratteristiche dell'atmosfera reale non sono conformi a quelle dell'atmosfera tipo (*praticamente sempre!*), l'altimetro indicherà una quota diversa da quella effettiva. I *livelli di volo* vengono, tuttavia, utilizzati invece del QNH poiché i 1013,25 hPa rappresentano un regolamento standard valido in tutto il mondo, diversamente dal QNH che, invece, può variare da un punto all'altro. Per i voli lunghi, infatti, i piloti dovrebbero continuamente chiedere l'aggiornamento del dato di QNH alle stazioni al suolo, mentre non vi è questa necessità con il settaggio standard. Il QNE risulta così ideale per assicurare la separazione verticale degli aeromobili, nella quale non è essenziale la distanza verticale dal terreno, bensì quella tra un velivolo e l'altro. Una volta raggiunto il FL assegnatogli, il pilota,

Figura 3.
Volare da una zona di alta a una di bassa pressione senza correggere il proprio altimetro, ma cercando di mantenere costante la quota indicata, si risolve in realtà in una diminuzione dell'altitudine vera dell'aereo. Al contrario, il volo da una regione ciclonica a una anticiclonica, comporta un aumento dell'altitudine vera.



per mantenerlo, volerà avendo cura che l'indicazione dell'altimetro rimanga costante, anche se ciò comporterà una variazione della quota reale rispetto al suolo.

Come già accennato, il sistema dei FL si basa su un'ipotetica aria tipo e non su quella reale, per cui la posizione dei FL nell'aria vera assume un aspetto pratico im-

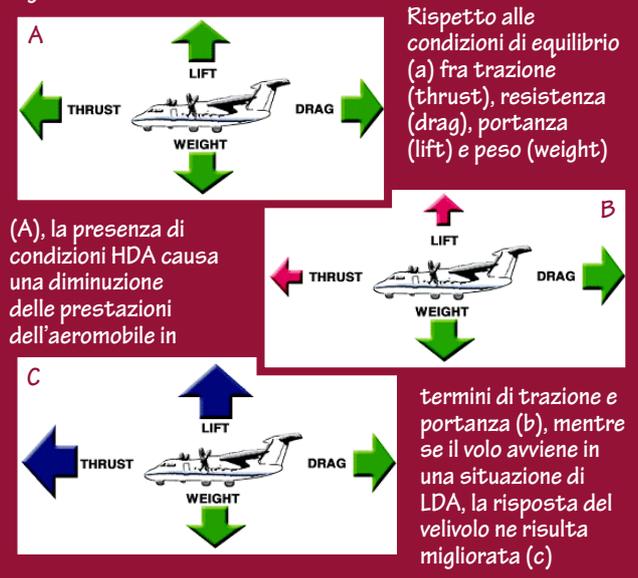
portante. Per un pilota che vola seguendo un FL, l'adeguata separazione dal terreno è ottenibile assicurandosi che il FL prescelto non infranga l'altitudine minima di rotta stabilita; ecco perché i livelli di volo si usano solo al di sopra di una determinata quota fissa per ogni aeroporto, stabilita in modo tale da assicurare una separazione minima dagli ostacoli. A tal proposito, si definiscono:

- **altitudine di transizione TA** (*Transition Altitude*) quella al di sopra della quale si vola per FL;
- **livello di transizione TL** (*Transition Level*) il più basso livello disponibile, al di sotto del quale si vola per altitudini. Varia in funzione del QNH locale del momento, in modo da garantire sempre almeno i 1000 ft di quota dello strato di transizione;
- **strato di transizione** (*Transition Layer*) lo spazio compreso tra la TA e il TL.

Per completezza riportiamo in conclusione anche la dicitura **QFF**, che rappresenta la trasformazione del QFE nella pressione al MSL, calcolata però in atmosfera reale, quindi da non confondersi con il QNH, che invece richiede che tale trasformazione avvenga in condizioni standard ICAO.

Per terminare la nostra analisi delle procedure altimetriche e di come esse siano influenzate dai diversi parametri atmosferici, vediamo come i piloti devono procedere per correggere gli effetti della pressione, della temperatura e della densità dell'aria in relazione alle prestazioni del proprio aeromobile.

Figura 4.



⁴ Come riportato nel primo di questa serie di articoli dedicati all'atmosfera terrestre e pubblicato sul numero 55 di AS (Ottobre 03), in alcuni paesi è ancora in pratica l'abitudine di misurare la pressione atmosferica in *pollici di mercurio in_{Hg}*, unità che deriva direttamente da quella dei *millimetri di mercurio mm_{Hg}*, nata con l'esperimento di Torricelli ed in voga nei paesi a sistema decimale sino all'avvento dei *millibar mb* e dei successivi *ectopascal hPa*. Ricordiamo che la pressione atmosferica al livello medio del mare in condizioni standard (temperatura 0°C e latitudine 45°) vale proprio:

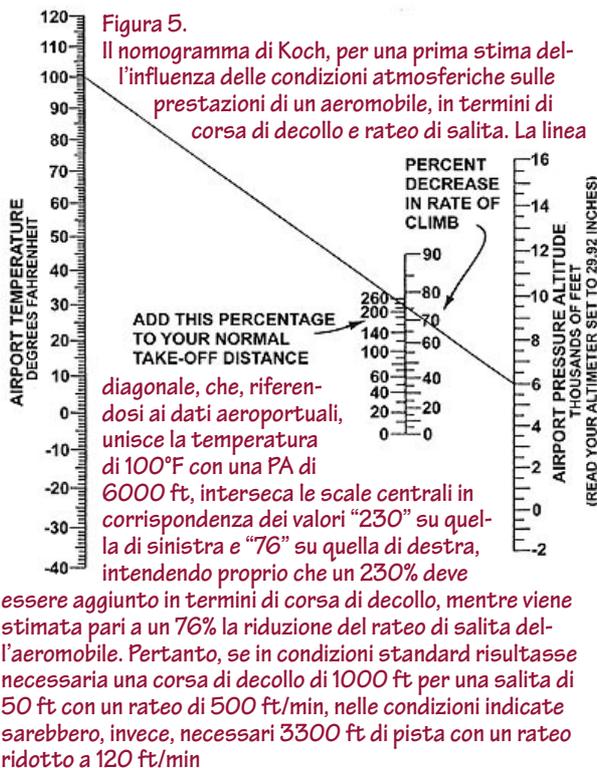
$$p_{std,msl} = 1013,25 \text{ hPa} = 1013,25 \text{ mb} = 760 \text{ mm}_{Hg} = 29,92 \text{ in}_{Hg}$$

mosferiche standard dell'ISA, dopo che è stato eseguito il relativo settaggio strumentale;

- la **PA** (*Pressure Altitude*), è il valore di quota letto direttamente dall'altimetro, e quindi riferito alle condizioni atmosferiche dell'ISA, dopo che questi è stato settato sul valore di 1013,25 hPa. Rappresenta quindi la quota che, in condizioni standard, risulterebbe associata a un valore di pressione esterna pari a quella effettivamente riscontrata dall'aeromobile in volo;
- la **DA** (*Density Altitude*), è il valore di PA corretto per compensare le deviazioni della temperatura reale rispetto al gradiente termico standard, o, equivalentemente, la quota a cui si troverebbe l'aereo in atmosfera standard, in presenza di una densità dell'aria pari a quella reale.

La DA è forse il parametro più critico per le prestazioni di un aeromobile e le conseguenze di una sua errata valutazione possono anche assumere aspetti disastrosi; non deve essere considerato come un riferimento di quota, ma unicamente come un criterio per determinare le prestazioni del proprio velivolo e, per questo motivo, si è soliti differenziare ulteriormente tra **HDA** (*High Density Altitude*) e **LDA** (*Low Density Altitude*). In presenza di una temperatura assai elevata, l'atmosfera si trova in condizioni di una diminuita densità, a causa del maggior "sparpagliamento" delle molecole di aria, provocato dall'aumento della loro energia cinetica; in aria standard, questo valore di densità corrisponderebbe però a quello che l'aereo sentirebbe a una quota ben maggiore rispetto a quella reale, situazione questa che viene per l'appunto resa con il termine di "volo in condizioni di HDA". Al contrario, una diminuzione della temperatura provoca un aumento della densità dell'aria (molecole "meno sparpagliate") e condizioni che in atmosfera standard sarebbero associate a una quota inferiore a quella reale; l'aereo ora è in volo in condizioni di LDA.

È fondamentale per un pilota conoscere la DA dell'aeroporto ove intende atterrare o decollare, unitamente alla lunghezza della pista e all'altezza degli ostacoli, naturali o artificiali, nelle immediate vicinanze, in funzione del proprio rateo di salita (*climb rate*). Infatti, in condizioni di HDA, le prestazioni di un aereo risultano ridotte perché vi è meno aria esterna a sostenere sia i processi di combustione del motore, sia l'azione dei propulsori e delle superfici portanti; di conseguenza al decollo risulteranno necessari una corsa più lunga e una maggior *clearance area*, cioè più area libera da ostacoli al termine della pista, proprio a causa del ridotto climb rate. Sempre a causa della rarefazione dell'aria, si os-



serva inoltre un aumento della velocità vera del mezzo, a fronte di un dato anemometrico costante; stante la diminuita densità atmosferica, l'aereo dovrà, infatti, "correre di più" rispetto all'aria, per permettere al suo strumento di impattare quel numero di molecole necessario a mantenere costante il dato di velocità riportato. All'opposto le condizioni di aumentata densità atmosferica della LDA si riflettono in un miglioramento delle prestazioni (**Figura 4**).

Il grafico di **Figura 5**, detto **nomogramma di Koch**, permette di visualizzare indicativamente gli effetti della temperatura e dell'altitudine, fermo restando che il principale riferimento per un pilota dovrebbe, comunque, sempre essere il manuale operativo della casa costruttrice del mezzo. L'immagine è tratta

da un articolo ufficiale della FAA americana, e ciò spiega il perché dell'utilizzo dei gradi Fahrenheit⁵ per la temperatura e dei pollici di mercurio per la pressione; alla pagina <http://www.ulm.it/hangar/sicur/densit.htm> del portale *Aviazione Leggera On Line* è possibile consultare la traduzione italiana di tale articolo, che, oltre a presentare alcuni esempi, è accompagnata da una versione del nomogramma che utilizza più familiari unità di misura. Si sottolinea però, ancora una volta, come le valutazioni così ottenibili siano solo indicative, potendo essere ulteriormente inficiate, anche in misura consistente, dalle condizioni della pista: la lunghezza della corsa di decollo, infatti, può persino raddoppiare in presenza di erba alta, sabbia o fango.

Per concludere questo breve ciclo di articoli dedicati alla nostra atmosfera, segnaliamo alcuni indirizzi Internet, dove, tra l'altro, è possibile approfondire ulteriormente le tematiche fin qui affrontate. La prima pagina è quella dell'*Australian Ultralight Federation*, che ospita una serie di interessanti corsi on-line, veramente completi anche se diretti alla realtà australiana, come quello di meteorologia <http://www.auf.asn.au/meteorology/index.html> e quello di teoria del volo <http://www.auf.asn.au/groundschool/contents.html>, quest'ultimo con un intero capitolo riservato proprio alle problematiche altimetriche. Ancora, il sito *Virtual Skies* della NASA con le pagine dedicate alla meteorologia aeronautica <http://virtualskies.arc.nasa.gov/weather/tutorial/tutorial1.html>. Infine, un indirizzo tutto italiano, <http://www.traffico-aereo.it/>, dove i problemi del volo sono esaminati con l'ottica di chi sta "dall'altra parte del radar", cioè dagli addetti ai servizi di controllo del traffico aereo. ✈️

⁵ La trasformazione tra gradi Fahrenheit e Celsius è data dalla relazione $C = [5 (F - 32)] / 9$