

# 1. L'ATMOSFERA

Il termine atmosfera deriva dal greco e significa "sfera di gas". Si tratta di un sottile involucro che avvolge i pianeti e ruota insieme ad essi attorno al sole. Il gas risente dell'attrazione gravitazionale del pianeta, esattamente come tutti gli altri corpi, e diventa sempre più rarefatto man mano che ci allontana dalla superficie del pianeta.

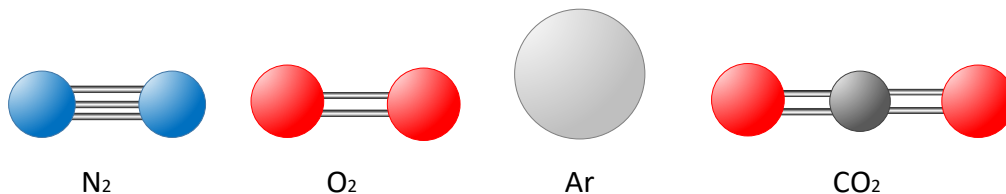
Ogni pianeta ha una diversa atmosfera sia per quanto riguarda la composizione chimica, cioè le molecole che la compongono, sia per quanto riguarda le sue caratteristiche fisiche, cioè le grandezze che in essa si possono misurare come la pressione, la temperatura, la densità e l'umidità.

Poiché gli aeromobili si muovono nell'aria, prima di procedere con lo studio dell'aerodinamica è necessario sapere come è fatta l'atmosfera terrestre.

## 1.1. La composizione chimica

L'atmosfera terrestre è formata principalmente da 4 gas:

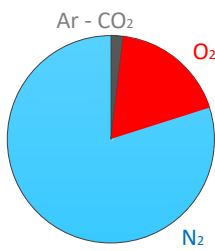
- **AZOTO  $N_2$** : presente in forma biatomica, cioè formato da due atomi di azoto uniti da un triplo legame. Grazie a questo triplo legame, la molecola di azoto è molto forte e stabile.
- **OSSIGENO  $O_2$** : presente anch'esso in forma biatomica. E' formato da un doppio legame e quindi risulta abbastanza stabile, anche se in certe condizioni che vedremo più avanti può rompersi e ricombinarsi per formare ozono.
- **ARGON  $Ar$** : essendo un gas nobile non ha bisogno di formare legami con altri atomi per essere stabile e quindi è presente in forma monoatomica.
- **ANIDRIDE CARBONICA  $CO_2$**  (anche chiamata diossido di carbonio)



L'atmosfera si può considerare divisa in due parti in base alla sua composizione chimica:

- La **BASSA ATMOSFERA**: è la parte più vicina alla Terra, ha uno spessore di circa 100 Km, ed è la zona in cui volano gli aeromobili.

Qui la composizione del gas è costante. L'azoto è presente per il 78% in volume e l'ossigeno per il 21%. L'argon si trova in percentuale dello 0,94 e l'anidride carbonica in quantità ancora minori.



AZOTO	78,03%
OSSIGENO	20,99%
ARGON	0,94%
ANIDRIDE CARBONICA	0,03%
IDROGENO	0,01%
NEON	0,0012%
ELIO	0,0004%

Nello strato più vicino alla superficie terrestre (nei primi 10 km) sono presenti altre due sostanze molto importanti: il vapore acqueo e il pulviscolo atmosferico, un insieme di particelle di cenere, pollini, polveri di varia natura. Queste sostanze non vengono considerate nella composizione chimica dell'atmosfera perché non si trovano in percentuale fissa, ma variano continuamente.

- L'**ALTA ATMOSFERA**: è la parte più esterna. Il suo spessore è difficile da definire poiché la densità dei gas si riduce man mano che ci si allontana dalla superficie della Terra fino a sfumarsi con l'idrogeno estremamente rarefatto che trova nello spazio. Non esiste quindi un vero e proprio confine. Si può però dare un'indicazione approssimativa di 2500-3000 km. Sappiamo infatti che fino a circa 2500 km è presente dell'elio, gas che non si trova nello spazio.

La composizione chimica dell'alta atmosfera non è costante: mentre nella bassa atmosfera i fenomeni meteorologici e i venti rimescolano il gas e mantengono la composizione chimica costante nelle varie quote, qui i venti sono assenti e i gas si stratificano in base al loro peso atomico. Le molecole più grosse, come l'azoto e l'ossigeno biatomico, sono quasi assenti (o comunque concentrate nella parte bassa che confina con la bassa atmosfera). Fino a 800 km si trova ossigeno monoatomico; più su, fino a 2500 km, si trova l'elio, anch'esso in forma monoatomica. Oltre i 2500 km si trova solo idrogeno e qui possiamo considerare finita l'atmosfera.

## 1.2. *Le grandezze fisiche*

Oltre che dalla composizione chimica, l'atmosfera è caratterizzata da alcune grandezze fisiche molto importanti: la pressione, la densità, la temperatura e l'umidità.

### 1.2.1. *La pressione atmosferica*

La pressione dell'aria può essere definita come la forza con cui le particelle premono sulla superficie degli oggetti. La pressione, pur variando di giorno in giorno, esercita su di noi la stessa forza in ogni direzione. Questo significa che non ci accorgiamo della sua presenza, ma possiamo sentire le sue variazioni. Ad

esempio quando andiamo in montagna, man mano che la pressione diminuisce, ci si tappano le orecchie perché il nostro corpo impiega un certo tempo per uniformare la pressione interna a quella esterna.

La pressione viene misurata in Pascal nel Sistema Internazionale, ma spesso in meccanica si utilizzano altre unità di misura che è bene conoscere.

- Il **bar** è un'unità di misura usata moltissimo negli impianti.
- L'**ettopascal hPa** è un multiplo del Pascal utilizzato dai piloti.
- L'**atmosfera atm** è un'unità usata soprattutto in meteorologia. 1 atm corrisponde alla pressione presente al livello del mare.

Le formule per passare dall'una all'altra sono le seguenti:

$$1 \text{ atm} = 1013 \text{ hPa}$$

$$1 \text{ bar} = 1000 \text{ hPa}$$

$$1 \text{ atm} = 1,013 \text{ bar}$$

La pressione varia continuamente, da luogo a luogo e di giorno in giorno, ma possiamo utilizzare dei valori medi. Al suolo (in inglese Sea Level SL) la pressione media è 1013 hPa. Questo valore viene scelto come dato standard da usare ogni qualvolta non sia possibile misurare la pressione per via strumentale. Questo valore (al quale si aggiungono i valori di quota e temperatura media) viene chiamato valore ISA, acronimo di International Standard Atmosphere.

La pressione diminuisce con la quota in modo costante: ogni 20 Km la pressione diventa un decimo di quella precedente assumendo così un andamento esponenziale decrescente.

Questa diminuzione tuttavia varia con la temperatura e quindi non esiste una vera e propria formula per il calcolo della pressione in quota. Sono state ricavate diverse formule che forniscono un valore approssimato, valido entro 11 km di altezza. Una formula per il calcolo della pressione è la seguente:

$$p = 101325 \cdot e^{-\frac{h}{8,006}}$$

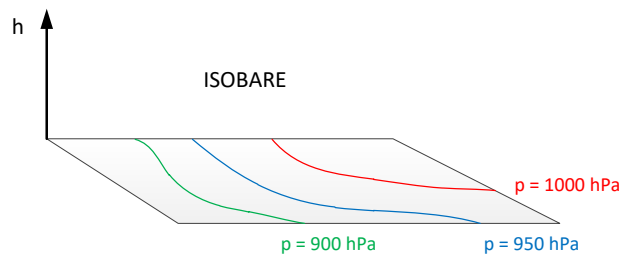
Il risultato  $p$  è la pressione misurata in Pascal alla quota  $h$ , espressa in chilometri. Per capire di quanto si riduce la pressione all'aumentare della quota, possiamo dividere il valore della pressione alla quota  $h$  per la pressione al livello del mare:

$$\frac{p}{p_{SL}}$$

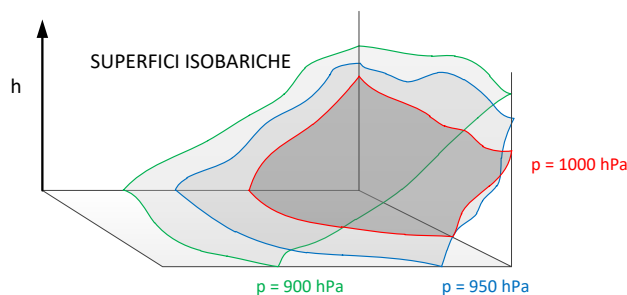
Questo numero, chiamato **PRESSIONE RELATIVA**, vale 1 al livello del mare, quando la pressione è uguale a  $p_{SL}$  (numeratore e denominatore hanno lo stesso valore, quindi il rapporto vale 1), e diminuisce all'aumentare della quota.

La pressione atmosferica è uno dei parametri più importanti per le previsioni meteorologiche ed è quindi utile indicarla su una cartina in modo da veder in quali luoghi della Terra essa è alta e in quali luoghi della Terra è bassa.

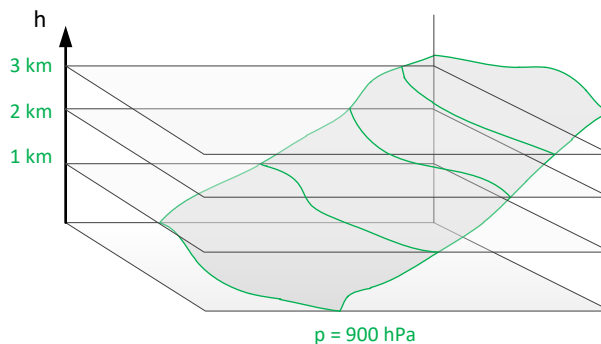
Se prendiamo una cartina sulla quale è segnata, punto per punto, la pressione al suolo e uniamo i punti che hanno la stessa pressione, otteniamo delle linee che prendono il nome di **ISOBARE** (dal greco, “stessa pressione”).



Se facciamo lo stesso per diverse quote, anziché avere delle linee otterremo delle superfici, chiamate **SUPERFICI ISOBARICHE**.



Ma la pressione al suolo non è l'unico parametro importante. Per un pilota è molto importante conoscere anche la pressione in quota e per questo si utilizzano altre linee, chiamate isoipse, ottenute intersecando una superficie isobarica con dei piani paralleli al suolo in modo da ottenere un insieme di curve, tutte alla stessa pressione, ma con altitudini differenti:



### 1.2.2. La densità atmosferica

La pressione è strettamente legata ad un'altra grandezza fisica: la densità. Sappiamo che la densità è la quantità di massa contenuta in un certo volume e che si misura in  $\frac{kg}{m^3}$ . La densità dipende dalla pressione e dalla temperatura. In particolare:

- è proporzionale alla pressione: se la pressione è alta lo è anche la densità dell'aria.
- è inversamente proporzionale alla temperatura: se la temperatura è alta, la densità è minore.

La densità è una delle grandezze più importanti per lo studio dell'aerodinamica. Come abbiamo visto nel capitolo 3, la pressione dinamica contiene la densità e questa grandezza è di fondamentale importanza per lo studio della portanza e della resistenza.

Anche per la densità l'ICAO ha stabilito un valore standard al livello del mare, da utilizzare per i calcoli:

$$\rho_{SL} = 1,225 \frac{kg}{m^3}$$

Per il calcolo della densità valgono le stesse considerazioni fatte per la pressione. Una formula che può essere utilizzata per il calcolo della densità ad una certa quota  $h$  è la seguente:

$$\rho = 1,226 \cdot (1 - 2,26 \cdot 10^{-5}h)^{4,256}$$

Anche per la densità si può calcolare il rapporto:

$$\sigma = \frac{\rho}{\rho_{SL}}$$

Questo numero, indicato con la lettera  $\sigma$ , è chiamato **DENSITÀ RELATIVA** e indica di quanto si è ridotta la densità rispetto al livello del mare.

Nella tabella seguente sono riassunti i valori che assumono la pressione e la densità per le varie quote.

QUOTA [Km]	PRESSIONE	PRESSIONE RELATIVA	DENSITA'	DENSITA' RELATIVA
	$p = 101325 \cdot e^{-\frac{h}{8,006}}$	$\frac{p}{p_{SL}}$	$\rho = 1,226 \cdot (1 - 2,26 \cdot 10^{-5}h)^{4,256}$	$\frac{\rho}{\rho_{SL}}$
0	101325	1,000	1,226	1,000
1	89427	0,883	1,096	0,894
2	78926	0,779	0,977	0,797
3	69659	0,687	0,868	0,708
4	61479	0,607	0,768	0,627
5	54260	0,536	0,678	0,553
6	47889	0,473	0,596	0,486
7	42266	0,417	0,521	0,425
8	37303	0,368	0,454	0,371
9	32923	0,325	0,394	0,322
10	290577	0,287	0,340	0,278
11	25645	0,253	0,292	0,238

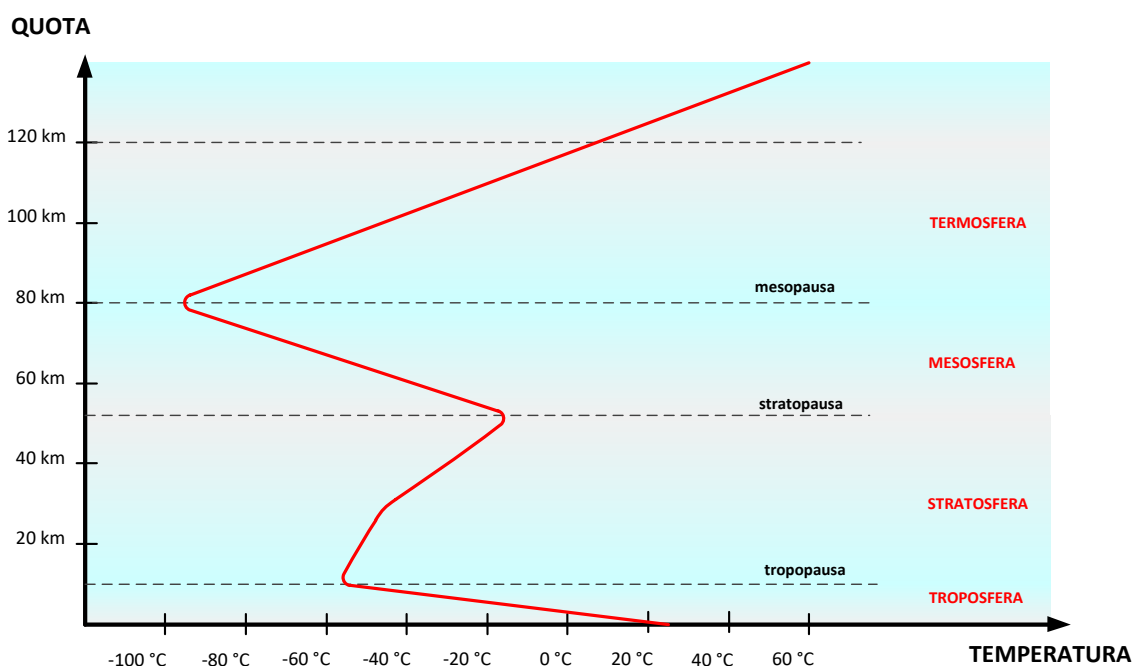
### 1.2.3. La temperatura atmosferica

La divisione dell'atmosfera in base alla composizione chimica (in alta e bassa atmosfera) è solo una delle classificazioni utilizzate. Un altro modo per studiare l'atmosfera è classificare i suoi strati in base all'andamento della temperatura. Questa grandezza non è costante, bensì varia in base alla fonte di energia che riscalda il gas (il sole, la superficie terrestre, ecc...), sia in base al tempo di esposizione a questa fonte di calore: basta pensare alla differenza di temperatura che si registra tra il giorno e la notte.

Per capire questo concetto, dobbiamo partire dal principio che nulla si crea, nulla si distrugge, ma tutto si trasforma. Il calore presente nell'atmosfera deve quindi provenire da qualche parte. Le due principali fonti di calore sono:

- **IL CALORE INTERNO ALLA TERRA:** la temperatura interna alla Terra è molto elevata e garantisce un flusso di calore costante, anche se poco intenso, verso la superficie;
- **IL SOLE:** durante le ore diurne la Terra riceve dal Sole grandi quantità di energia sotto forma di onde elettromagnetiche che attraversano tutti gli strati dell'atmosfera e giungono fino al suolo, riscaldando il terreno che a sua volta emette calore.

In base all'andamento della temperatura, l'atmosfera è stata quindi suddivisa in sfere, chiamate anche **STRATI TERMICI**, separati l'uno dall'altro da una superficie di discontinuità chiamata **PAUSA**.



Gli strati termici che ci interessano al fine del volo atmosferico sono i primi due: la troposfera, nella quale volano i piccoli aerei da turismo, e la stratosfera, nella quale volano gli aeromobili di linea e quelli militari.

### **Troposfera**

Il primo strato che si incontra partendo dal suolo è la troposfera. Qui è concentrato l'80% di tutto il gas atmosferico e qui si verificano i fenomeni atmosferici (pioggia, vento, ecc...)

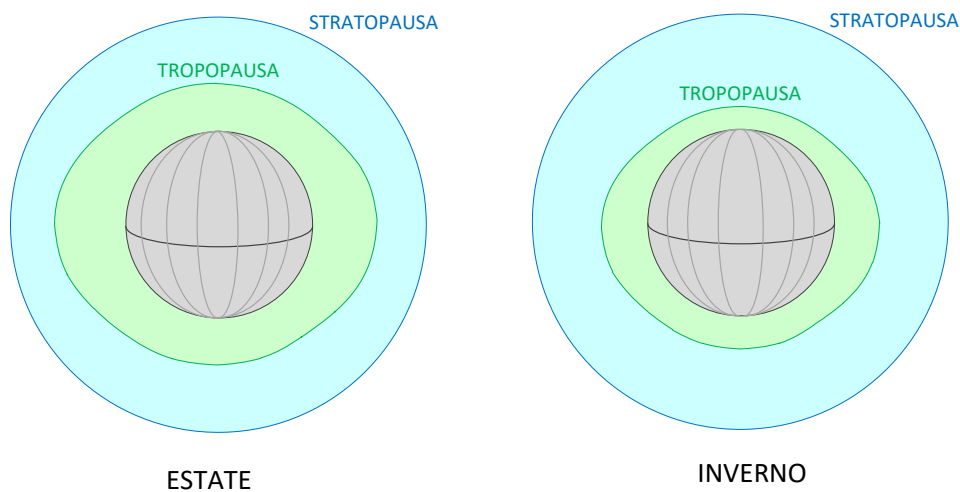
Il calore in questo strato proviene dal suolo: il sole riscalda la superficie della Terra che a sua volta riscalda l'aria più vicina a se. La temperatura diminuisce man mano che ci si allontana dal suolo e anche se essa varia moltissimo in base alla latitudine e all'ora della giornata, è possibile utilizzare dei valori medi.

Al suolo la temperatura media è di 15 °C. **LA SUA DIMINUIZIONE È DI 6,5°C OGNI CHILOMETRO** e questo valore è chiamato **GRADIENTE TERMICO VERTICALE**.

Questo significa che a 1000 m la temperatura media sarà di 8,5 °C mentre a 2000 m sarà di 2,5 °C. Naturalmente questo è solo un valore medio e non corrisponde alla realtà. È utile solo per fare dei calcoli approssimati qualora non si abbia a disposizione un termometro per misurare veramente la temperatura.

La temperatura nella troposfera diminuisce fino a raggiungere il valore di -56 °C, quindi rimane all'incirca costante. Quando la temperatura raggiunge questo valore, la troposfera finisce e inizia lo strato termico successivo, chiamato stratosfera. La superficie di discontinuità tra questi due strati prende il nome di tropopausa.

L'altezza della troposfera varia sia in base alla latitudine (8 km circa sopra i poli e 18 km circa sopra l'equatore) e in base alle stagioni (in estate è più alta perché il calore fa espandere il gas).



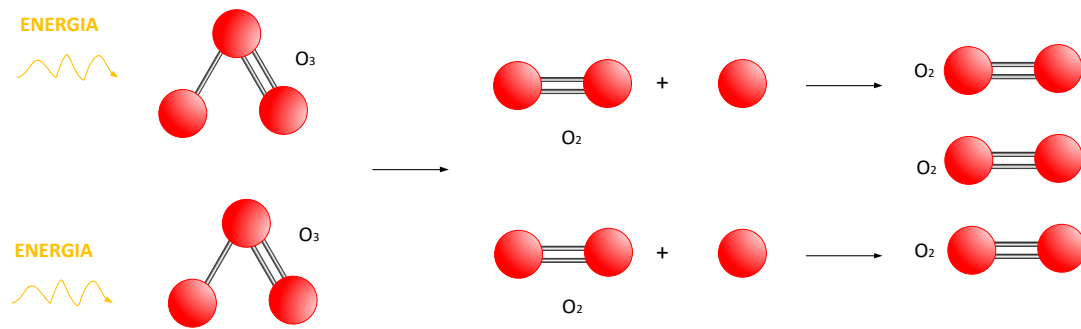
## ***Stratosfera***

In questo strato termico la temperatura si mantiene quasi costante (in leggera crescita) entro i 50 km, poi la crescita diventa più elevata. Qui l'aria è calma: non ci sono venti né perturbazioni atmosferiche legate a pioggia, grandine o altro. L'aria risulta molto più rarefatta, ma la sua composizione chimica si mantiene pressoché invariata.

Se osserviamo il grafico della pagina precedente, possiamo vedere che la temperatura aumenta man mano che saliamo di quota. Il motivo di questa inversione di tendenza sta nel fatto che, mentre la troposfera viene riscaldata dal basso (cioè dal suolo) la stratosfera viene riscaldata dall'alto.

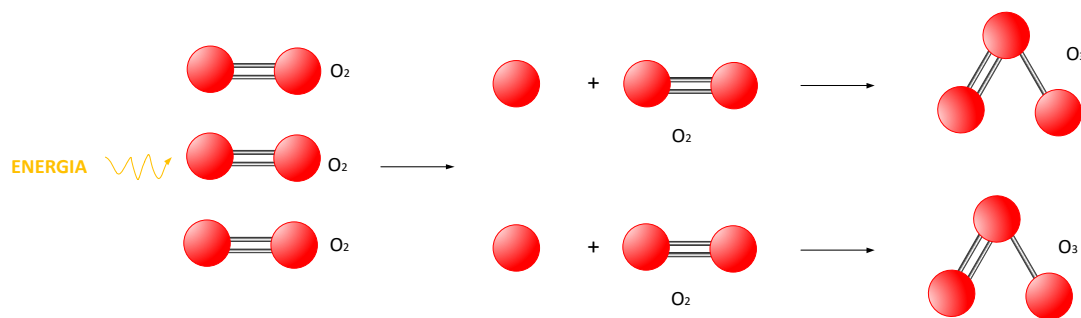
Il riscaldamento della stratosfera è legato ad un fenomeno molto importante per la vita sulla terra: la formazione dell'ozono della cosiddetta "fascia dell'ozono" che si trova appunto nella stratosfera, fra 15 e 50 km di altezza.

L'ozono è una molecola formata da 3 atomi di ossigeno. Sulla terra è difficile trovare dell'ozono perché l'ossigeno è stabile nella forma biatomica. Per formare ozono bisogna che una molecola di ossigeno si spezzi, rendendo disponibili 2 atomi di ossigeno per la formazione di 2 molecole di ozono:



Affinché questo succeda serve energia, fornita dalla radiazione solare.

L'ozono ha una proprietà molto importante: assorbe la radiazione ultravioletta del sole (quella che ci scotta quando non mettiamo le creme solari, quelle con i famosi filtri UVA e UVB) e grazie a questa energia si spezza, tornando alla forma di ossigeno biatomico:



In questo modo il ciclo prosegue. Ogni volta che l'ozono si rompe a causa dell'assorbimento della radiazione solare, viene rilasciato calore e questo provoca il riscaldamento della stratosfera a partire dalla fascia di ozono.

### 1.2.4. Il vapore acqueo

Nella troposfera è contenuta una grande quantità di **VAPORE ACQUEO**, ovvero di **ACQUA SOTTO FORMA DI GAS**. Il vapore acqueo è trasparente e quindi invisibile, ma ha una grande importanza sia per quanto riguarda i fenomeni meteorologici, sia per quanto riguarda la formazione di ghiaccio sulla struttura dell'aeromobile.

La quantità di vapore acqueo presente nell'aria varia continuamente e viene misurata con strumenti chiamati **IGROMETRI**. Esiste un limite alla quantità di vapore acqueo che una massa d'aria può contenere: quando l'aria contiene la massima quantità di vapore possibile si dice che è **SATURA**. In questa situazione il vapore acqueo in eccesso torna ad essere liquido e si formano delle goccioline.

La quantità massima di vapore acqueo che può essere contenuto in una certa massa d'aria non è costante: se la temperatura aumenta la massa d'aria può contenere più vapore. Un fenomeno simile, anche se correlato ai liquidi, si verifica con lo zucchero nel caffè: nel caffè caldo è possibile sciogliere più zucchero che nel caffè freddo; allo stesso modo nell'aria calda è possibile mettere più vapore acqueo che nell'aria fredda.

E' possibile misurare tre tipi di umidità:



- l'umidità assoluta, ovvero la quantità di vapore, espressa in grammi, contenuta in un metro cubo di aria. Viene quindi misurata in  $\frac{g}{m^3}$
- l'umidità specifica, ovvero la quantità di vapore, espressa in grammi, contenuta in un chilogrammo di aria. Viene quindi misurata in  $\frac{g}{kg}$
- l'umidità relativa (in inglese Relative Humidity RH), chiamata anche **STATO IGROMETRICO DELL'ARIA**, ovvero la percentuale di vapore acqueo contenuta in una certa massa rispetto alla massima quantità che quella massa può contenere.

$$\text{Umidità relativa} = \frac{\text{vapore acqueo contenuto}}{\text{vapore acqueo massimo}}$$

Quando la massa d'aria è satura, l'umidità relativa è del 100%.

### 1.2.5. L'atmosfera standard

Come abbiamo già anticipato nel paragrafo precedente, le grandezze dell'atmosfera (pressione, densità, temperatura, umidità, ecc...) variano con le stagioni e con la latitudine. Per poter effettuare calcoli in assenza di misurazioni strumentali o per poter tarare gli strumenti, l'ICAO (l'organismo che si occupa di stabilire le regole dell'aviazione civile), ha scelto dei valori standard che rappresentano una media delle diverse condizioni atmosferiche. L'aria che presenta queste caratteristiche viene chiamata **ATMOSFERA STANDARD**. Le sue caratteristiche sono raccolte nella tabella seguente:

Latitudine considerata	45°
Pressione al livello del mare	101325 Pa
Densità al livello del mare	$1,225 \frac{kg}{m^3}$
Temperatura al livello del mare	288 K
Umidità e pulviscolo	Assenti
Gradiente termico verticale fino a 11 km	$-\frac{6,5^\circ}{1000m}$

## 1.3. I moti dell'aria

All'interno della troposfera l'aria è in continuo movimento. A volte si tratta di movimenti che durano nel tempo, anche per diverse ore. Altre volte i movimenti dell'aria sono improvvisi e durano pochi istanti; in questo caso si parla di raffiche di vento. Queste ultime sono molto più insidiose rispetto ai venti che soffiano con continuità, perché cambiano continuamente le condizioni di volo e sollecitano la struttura dell'aeromobile.

Possiamo, per semplicità, distinguere i moti dell'aria in due categorie:

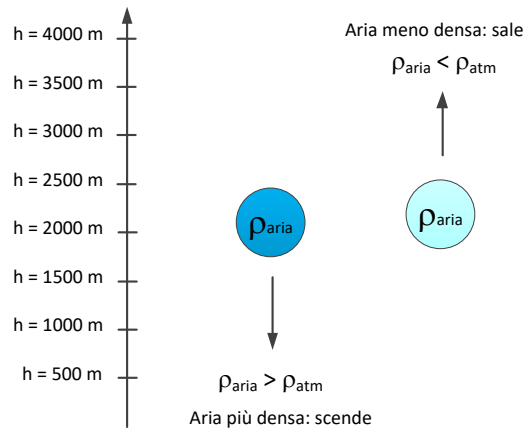
- I **MOTI VERTICALI**, nei quali le masse d'aria salgono o scendono, cambiando quota.
- I **MOTI ORIZZONTALI**, nei quali le masse d'aria si muovono da un punto all'altro della superficie terrestre.

In realtà le masse d'aria si spostano sia in verticale che in orizzontale e solo in casi particolari i moti avvengono davvero lungo una sola direzione. Tuttavia, è utile semplificare suddividendo i moti in queste due categorie e studiandoli separatamente.

### 1.3.1.1 moti verticali dell'aria

Il meccanismo fisico che porta l'aria a salire o a scendere in direzione verticale è sostanzialmente legato alla densità dell'aria.

Se una massa d'aria si trova ad avere una densità minore di quella circostante  $\rho_{aria} < \rho_{atmosfera}$  (possiamo dire che è più leggera) essa salirà; se invece si trova ad avere una densità maggiore dell'atmosfera circostante  $\rho_{aria} > \rho_{atmosfera}$  (cioè è più pesante) scenderà:



Ciò che mette in moto le masse d'aria è quindi una differenza di densità tra il suolo e le quote superiori.

La densità è strettamente legata alla temperatura. Quando la temperatura diminuisce, aumenta la densità:

$$T \downarrow \quad \rho \uparrow$$

Al suolo, il terreno è riscaldato dal sole e cede il calore all'aria adiacente al terreno, riscaldandola. L'aria calda diventa più leggera e sale. La velocità di risalita dipende dalla differenza di temperatura  $\Delta T$  tra il suolo e gli strati superiori dell'atmosfera: maggiore è il  $\Delta T$ , maggiore è la velocità.

Quando la velocità è alta, la massa d'aria in risalita non ha tempo di scambiare calore con l'aria circostante.

Di conseguenza questo moto può essere considerato come una **TRASFORMAZIONE ADIABATICA** nella quale la diminuzione di pressione, dovuta all'aumento della quota, provoca un'espansione della massa d'aria, cioè un aumento del suo volume e una conseguente diminuzione di temperatura:

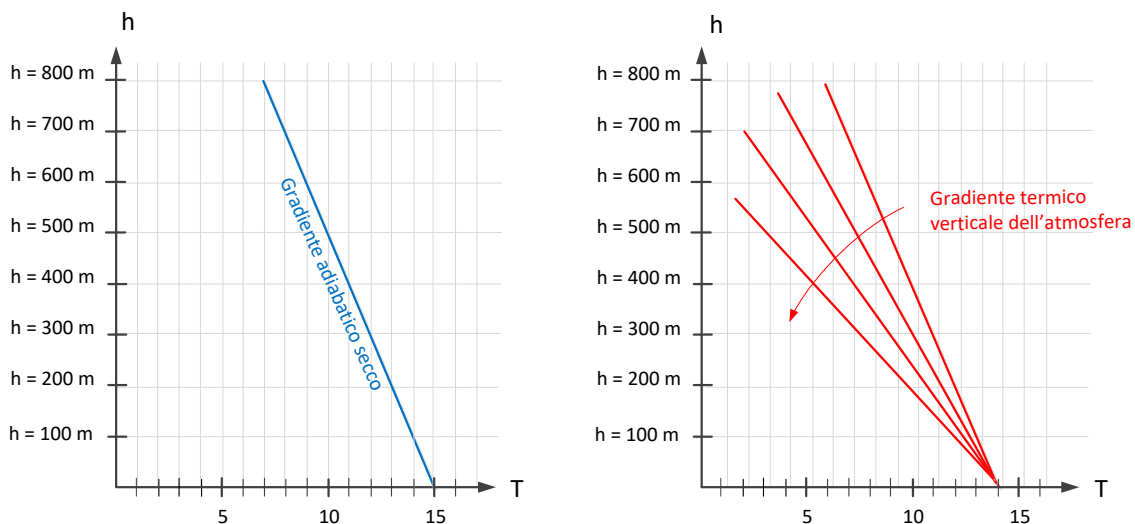
$$h \uparrow \quad p \downarrow \quad V \uparrow \quad T \downarrow \quad \rho \uparrow$$

A questo punto dobbiamo distinguere due casi:

- Aria non satura di vapore. In questo caso, la diminuzione di temperatura con la quota risulta costante. In particolare, la temperatura diminuisce di un  $1^{\circ}\text{C}$  ogni 100 m. Questo valore costante prende il nome di **GRADIENTE ADIABATICO SECCO**.
- Aria satura. In questo caso, la diminuzione di temperatura con la quota non è costante quindi il **GRADIENTE ADIABATICO SATURO** ha un valore variabile (di solito inferiore a quello secco). In particolare, più l'aria è calda, più il gradiente adiabatico saturo diminuisce.

L'**ATMOSFERA** che circonda la massa d'aria in movimento ha un **GRADIENTE TERMICO VERTICALE MEDIO** di  $6,5^{\circ}$  ogni 1000 m ( $0,65^{\circ}\text{C}$  ogni 100m). Questo valore però può variare moltissimo e assumere valori superiori a  $1^{\circ}\text{C}$  ogni 100 m. Il gradiente termico verticale varia da luogo a luogo e di giorno in giorno.

Un grafico molto utile per rappresentare i gradienti termici è quello che mostra la temperatura al variare della quota:

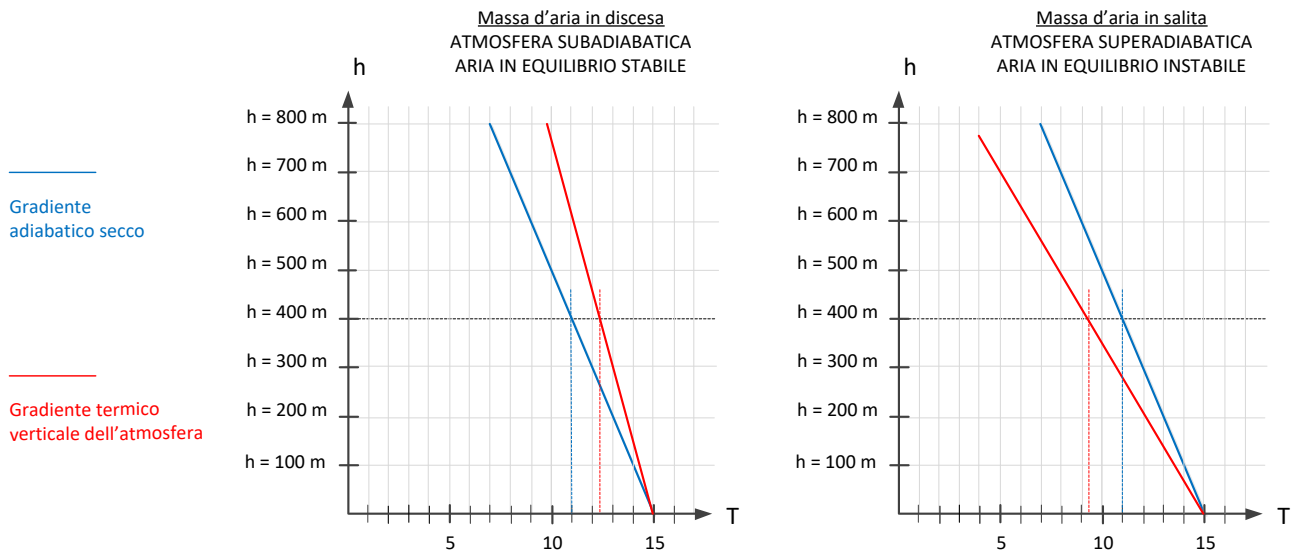


Dai grafici si vede che il gradiente della massa in movimento è costante e viene rappresentato tramite una sola linea. Invece il gradiente termico verticale varia e quindi è rappresentato da un fascio di rette con pendenza variabile. Quando il gradiente diminuisce, la retta diventa più pendente: un gradiente nullo sarebbe rappresentato da una linea verticale.

Se rappresentiamo su uno unico grafico queste due rette, vediamo che si possono presentare due casi:

- Il **GRADIENTE ADIABATICO SECCO** è **MAGGIORE** del **GRADIENTE TERMICO VERTICALE**: in questo caso la massa d'aria in risalita si raffredda più rapidamente dell'atmosfera circostante; una volta arrivata in quota la sua densità risulterà maggiore e quindi tenderà a tornare al suolo. In questo caso si dice che l'atmosfera è **SUBADIABATICA**. L'aria è in uno stato di **EQUILIBRIO STABILE**: le masse d'aria che si trovano in risalita, dopo un certo tempo arrestano il loro moto e ritornano al suolo.
- Il **GRADIENTE ADIABATICO SECCO** è **MINORE** del **GRADIENTE TERMICO VERTICALE**: in questo caso la massa d'aria si raffredda meno dell'atmosfera circostante; la sua densità risulterà quindi minore e la massa tenderà a continuare la sua salita.

In questo caso si dice che l'atmosfera è **SUPERADIABATICA**. L'aria è in uno stato di **EQUILIBRIO INSTABILE**: le masse d'aria che si trovano in risalita non vengono fermate da nulla e continuano a salire sempre di più.

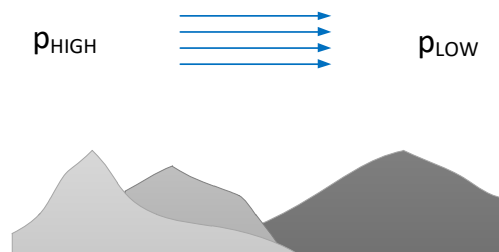


Questo meccanismo è di notevole importanza nella meteorologia aeronautica perché consente di capire come si sviluppano le nubi e le correnti ascendenti o discendenti.

### 1.3.2.1 moti orizzontali dell'aria

Quando l'aria si muove in orizzontale, da un punto all'altro della superficie terrestre, si parla di vento.

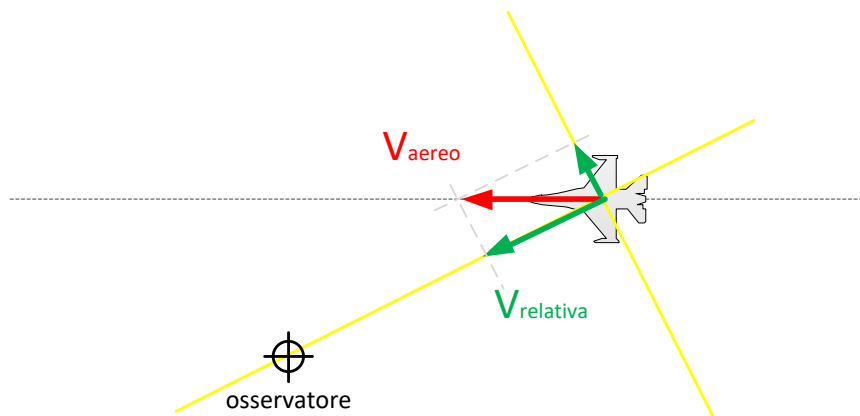
Il vento è generato da una differenza di pressione, determinata da una diversa temperatura tra due luoghi.



Esistono moltissimi tipi di venti, classificati in base alla direzione da cui soffiano e dalle forze che li creano. A prescindere da queste classificazioni, possiamo analizzare l'effetto che il vento ha su un aeromobile.

Abbiamo visto nei capitoli precedenti che gli effetti aerodinamici su oggetto che si muove nell'aria sono gli stessi, sia qualitativamente che quantitativamente, se l'oggetto è fermo ed è l'aria a muoversi su di esso.

Questo principio, noto come principio di reciprocità, ci consente di capire perché il vento è così importante per un aeromobile. Le forze aerodinamiche (la portanza e la resistenza) nascono grazie al moto dell'aeromobile nell'aria, ma non ha importanza se l'aria è ferma o si muove: quello che conta è la velocità relativa. La velocità relativa si ottiene scomponendo il vettore velocità lungo due direzioni perpendicolari, una delle quali congiunge l'oggetto in questione con l'osservatore. La componente di velocità relativa è proprio quella sulla congiungente i due oggetti:

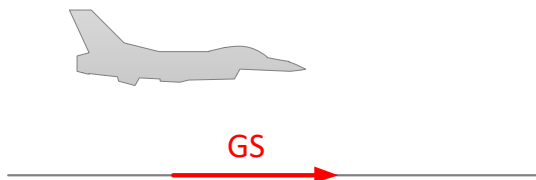


Per il vento vale lo stesso principio. Se però il vento è frontale (cioè soffia sul muso dell'aeromobile) o in coda, le cose si semplificano perché il vettore velocità non deve essere scomposto.

Il vento può essere favorevole o sfavorevole allo sviluppo della portanza a seconda della direzione in cui soffia.

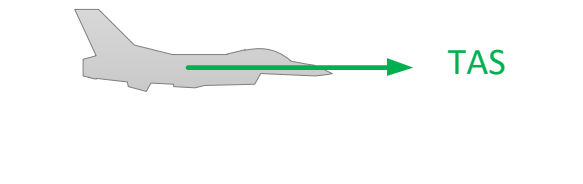
Per capire bene questo concetto, dobbiamo analizzare le tre velocità con cui si trova a fare i conti un pilota:

- La velocità dell'aeromobile rispetto al suolo, chiamata **GROUND SPEED, GS**  
 È la velocità con cui una persona a terra vedrebbe volare l'aeromobile. Può essere paragonata alla velocità di un'automobile, che viene sempre misurata rispetto alla strada. È questa la velocità che si usa per stabilire quanto tempo impiega un aeromobile ad andare dall'aeroporto di partenza a quello di arrivo.



Purtroppo questa velocità è difficile da misurare e viene quindi calcolata tramite una formula, che vedremo alla fine del paragrafo, che coinvolge le altre due velocità.

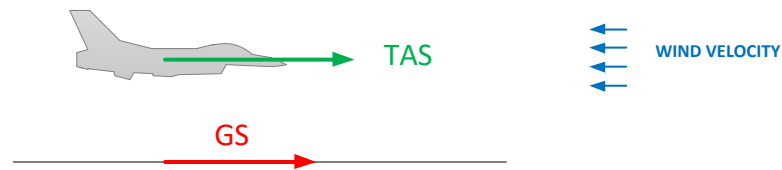
- La velocità dell'aeromobile rispetto al vento, chiamata **TRUE AIR SPEED, TAS**.  
 Questa è la famosa velocità relativa. In pratica si tratta della velocità con cui l'aria colpisce l'aeromobile.



Questa velocità viene misurata con uno strumento, chiamato tubo di Pitot, che si trova a bordo degli aeromobili. Tuttavia il tubo di Pitot non fornisce veramente questa velocità poiché è soggetto a degli errori che devono essere corretti tramite un computer. Parleremo di come si ottiene questa velocità nel prossimo paragrafo.

- La velocità del vento rispetto al suolo, chiamata **WIND VELOCITY, WV**

E' la velocità con cui soffia il vento e modifica la GS e la TAS, aumentandole o diminuendole a seconda della sua direzione.



In particolare, un vento frontale diminuisce la ground speed (è come se frenasse l'aeromobile), ma aumenta la TAS (l'aria scorre sull'aeromobile con velocità maggiore).

Invece un vento in coda aumenta la ground speed (è come se spingesse l'aeromobile, aiutando i propulsori), ma diminuisce la TAS (l'aria scorre sull'aeromobile con velocità minore).

In conclusione, un vento in coda fa arrivare l'aeromobile a destinazione in anticipo, mentre un vento frontale fa arrivare l'aeromobile a destinazione in ritardo (o fa consumare di più se si vuole evitare di arrivare in ritardo...).

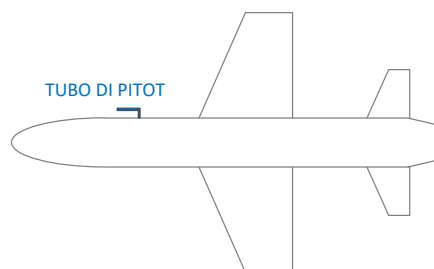
Un vento in coda è però pericoloso in fase in di decollo e atterraggio, perché l'aeromobile è lento e non può sopportare un'ulteriore diminuzione della TAS. Per questo motivo si cerca sempre di decollare e atterrare con il vento frontale.

La formula che lega queste tre velocità è la seguente:

$$TAS = GS - WV$$

## 1.4. *La misura della TAS tramite il tubo di Pitot*

La velocità rispetto all'aria può essere misurata con uno strumento chiamato tubo di Pitot. Si tratta di un piccolo tubo che solitamente viene posizionato sulla fusoliera dell'aeromobile in modo da sporgere parallelamente alla fusoliera:



Il tubo di Pitot in realtà misura la **PRESSIONE DINAMICA**, che contiene la velocità:

$$Q = \frac{1}{2} \rho v^2$$

Quindi invertendo la formula si ottiene:

$$\frac{1}{2} \rho v^2 = Q \quad \rightarrow \quad \rho v^2 = 2Q \quad \rightarrow \quad v^2 = \frac{2Q}{\rho} \quad \rightarrow \quad v = \sqrt{\frac{2Q}{\rho}}$$

Ma come si misura la pressione dinamica?

Sappiamo dai capitoli precedenti che le pressioni coinvolte nell'aerodinamica sono tre:

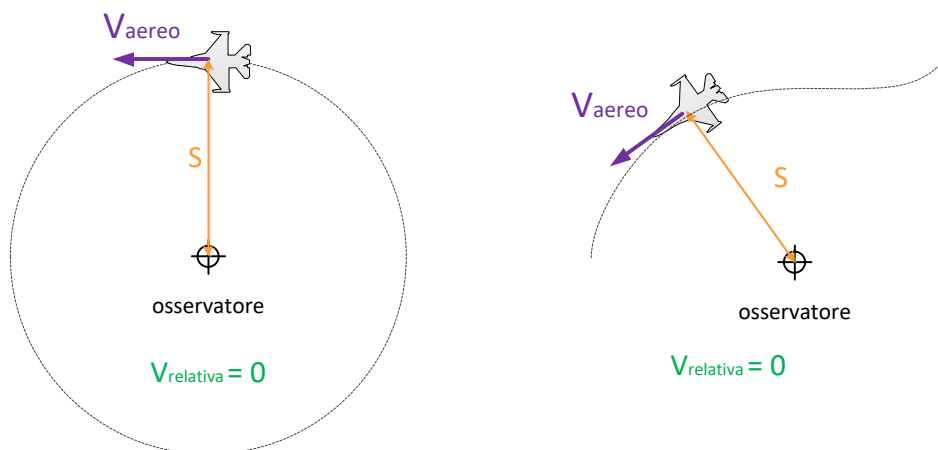
- La **PRESSIONE STATICA**, cioè quella che l'aria esercita sulle pareti quando è ferma
- La **PRESSIONE DINAMICA**, cioè quella dell'aria in movimento
- La **PRESSIONE TOTALE**, cioè la somma delle due precedenti.

La pressione statica e quella totale possono essere misurate, anche non si tratta di una cosa semplice poiché la misura è affetta da moltissimi errori.

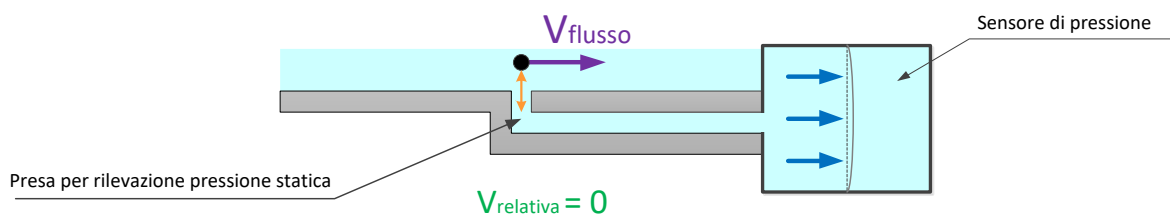
Partiamo dalla **PRESSIONE STATICA**. Con un semplice barometro è possibile misurare questa pressione quando l'aria è davvero ferma; quando però siamo di fronte ad un flusso d'aria, le cose si complicano. Per rilevare la pressione statica è necessario che l'aria non abbia velocità relativa rispetto al punto di misurazione. Per capire questo concetto, consideriamo un aeromobile che si muove in cerchio attorno ad un osservatore: la sua velocità relativa risulta sempre nulla perché lo spazio che lo separa dall'osservatore non cambia:

$$v_{REL} = \frac{\Delta S}{\Delta t}$$

Questa capita ogni qualvolta la velocità dell'aeromobile, che è sempre tangente alla traiettoria, risulta perpendicolare alla retta che unisce l'osservatore con l'oggetto:

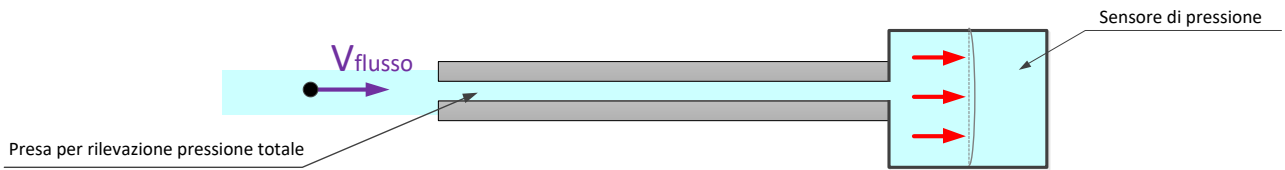


Nel caso di un flusso, possiamo immaginare che le particelle siano come l'aeromobile e che il punto in cui viene rilevata la pressione sia come l'osservatore. Per misurare la **PRESSIONE STATICA** è quindi necessario che la velocità delle particelle sia perpendicolare alla linea che unisce le particelle alla presa per la rilevazione della pressione statica:

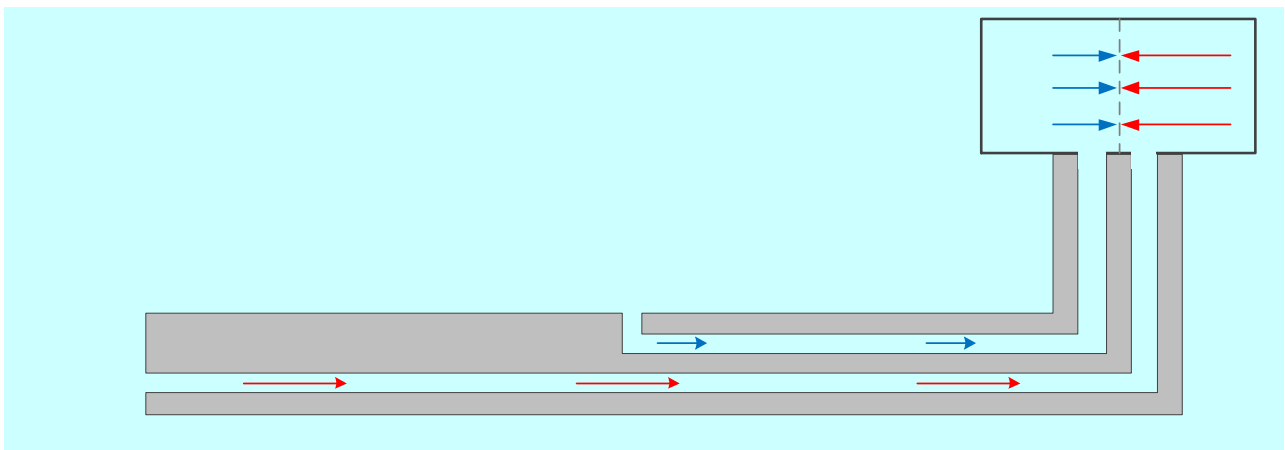


Il flusso giunge fino al sensore, costituito da una membrana sottile, che si deforma sotto l'azione della **PRESSIONE STATICA**.

Per quanto riguarda la **PRESSIONE TOTALE**, abbiamo già visto che si misura nel punto di arresto, dove la velocità del flusso è perpendicolare al corpo:



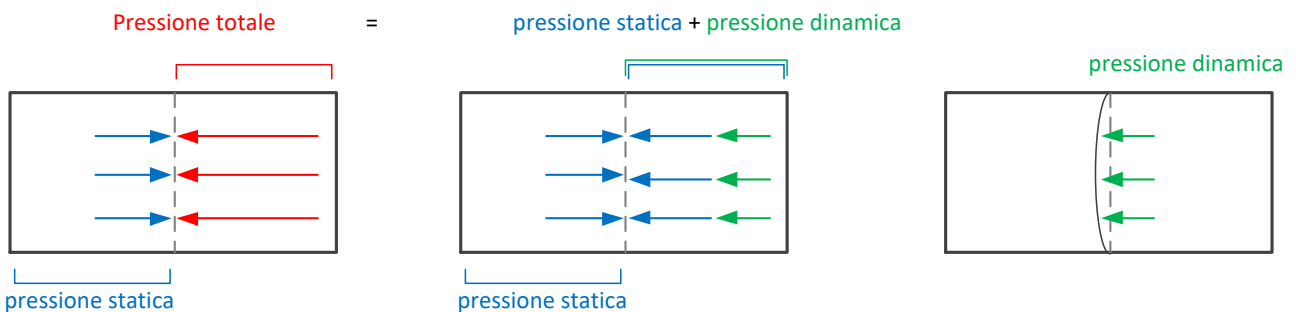
Anche in questo caso il flusso giunge fino al sensore, che si deforma sotto l'azione della **PRESSIONE TOTALE**. Il tubo di Pitot unisce questi due dispositivi in modo da misurare simultaneamente la **PRESSIONE STATICA** e quella **TOTALE** tramite un unico sensore.



Il sensore è formato da due camere, separate da una membrana. La membrana si deforma verso la camera con minore pressione. Nel tubo di Pitot la camera con minore pressione è quella collegata alla presa di **PRESSIONE STATICA**. Sappiamo infatti che la **PRESSIONE TOTALE** è la somma della **PRESSIONE STATICA** e di quella **DINAMICA**:

$$p_{TOT} = p + Q$$

Possiamo quindi rappresentare quello che succede nelle due camere con lo schema vettoriale seguente: le due pressioni statiche (quella proveniente dalla presa di pressione statica e quella contenuta nella pressione totale) si annullano a vicenda e rimane solo la pressione dinamica, la quale deforma la membrana.



Dalla deformazione della membrana è possibile risalire alla pressione dinamica e da qui alla velocità:

$$v = \sqrt{\frac{2Q}{\rho}}$$



Questa velocità viene indicata da uno strumento chiamato anemometro e si chiama **IAS**, acronimo di **INDICATED AIR SPEED**.

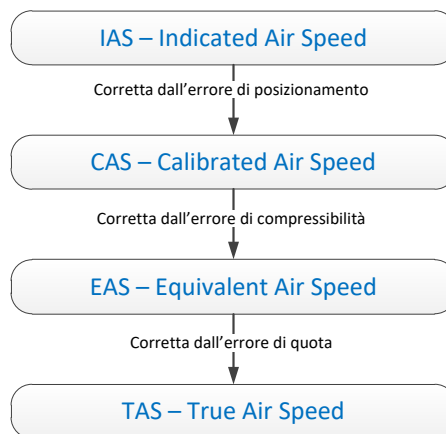
Non si tratta della vera velocità relativa, cioè della TAS, perché contiene degli errori:

- La presa di pressione statica deve essere perfettamente parallela a flusso d'aria e quella di pressione totale deve essere perfettamente perpendicolare al flusso d'aria. Queste due condizioni si verificano solo in alcuni momenti. Il tubo di Pitot infatti è fisso sull'aeromobile, il quale viene investito dall'aria in direzione che varia continuamente durante il volo.

Per questo motivo è necessario correggere sia l'errore dovuto al cattivo posizionamento della presa di pressione statica sia quello dovuto al cattivo posizionamento della presa di pressione totale. Una volta corretto l'errore di posizionamento si ottiene la **CAS**, acronimo di **CALIBRATED AIR SPEED**.

- Il flusso d'aria deve essere incompressibile. Questo risulta vero solo fino al mach di drag rise. Al di sopra di questa velocità il valore della CAS deve essere corretto. Dopo la correzione si ottiene la **EAS**, acronimo di **EQUIVALENT AIR SPEED**.

- Infine si deve considerare che all'aumentare della quota, anche se il flusso d'aria fosse incompressibile, la densità diminuirebbe comunque. Dopo aver corretto il valore della EAS per tenere in considerazione la diminuzione di densità con la quota, si ottiene finalmente la **TAS**, al **TRUE AIR SPEED**.



## 1.5. *Fenomeni pericolosi per il volo*

Nella troposfera si verificano i fenomeni meteorologici che tutti conosciamo, come il vento, le precipitazioni (pioggia, grandine, neve) e i fulmini.

La pericolosità di questi fenomeni dipende dalla loro intensità (una grandinata leggera non fa danni, ma quando i chicchi raggiungono dimensioni ragguardevoli possono distruggere il vetro di un'automobile...) e anche dal tipo di aeromobile su cui si sta viaggiando: un piccolo ultraleggero sopporta raffiche di vento minori rispetto ad un grosso aeromobile di linea.

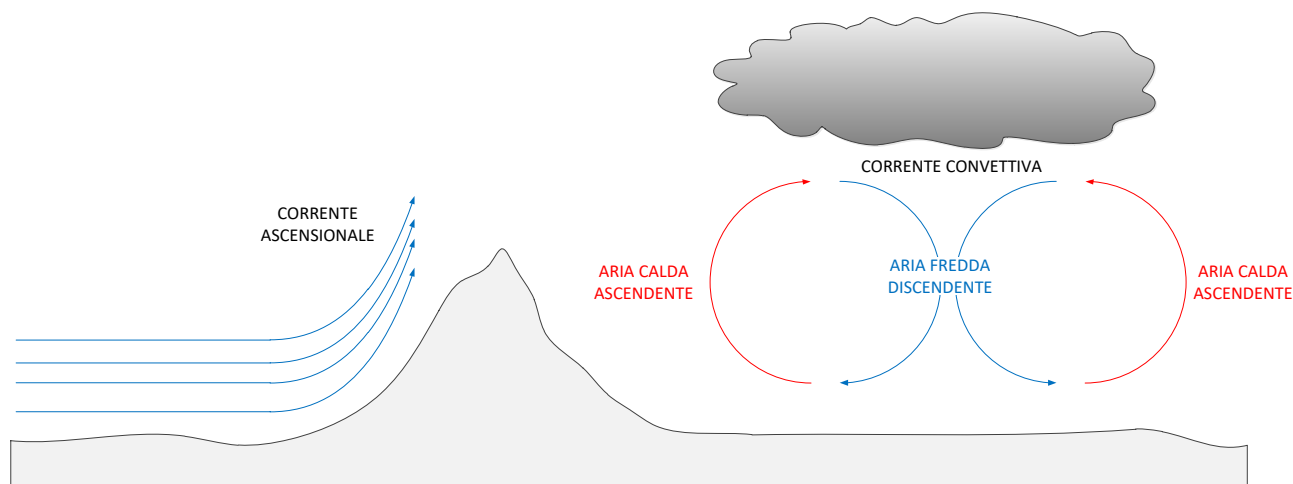
In questo paragrafo vedremo in maniera sintetica due dei principali pericoli legati ai fenomeni meteorologici: la turbolenza e il wind shear. Parleremo invece del ghiaccio nella parte III, quando studieremo gli impianti di bordo e il particolare il sistema antighiaccio.

### **1.5.1. Turbolenza**

Si definisce turbolenza l'insieme dei fenomeni a cui va incontro un aeromobile quando viene sollecitato da improvvise raffiche di vento verticali, le quali causano sobbalzi (rendendo difficile mantenere l'aeromobile in traiettoria) e, se diventano molto intense, possono danneggiare la struttura dell'aeromobile. Nella IV parte del corso, quando studieremo la meccanica del volo, vedremo che le raffiche diventano sempre più dannose per la struttura e per i passeggeri man mano che la velocità di volo aumenta.

Spesso si pensa che la turbolenza sia presente solo quando il cielo è coperto dalle nubi o durante un temporale. In realtà la turbolenza può essere presente in qualunque momento.

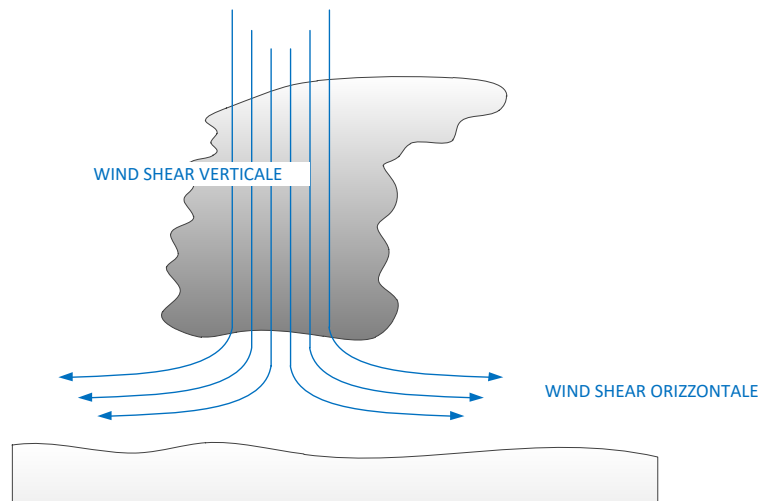
Abbiamo infatti visto nel paragrafo 1.3 che i moti verticali dell'aria sono provocati da differenze di temperatura, le quali sono fortemente accentuate durante le giornate estive quando il sole riscalda molto il suolo. I diversi materiali vengono riscaldati in maniera differente e quindi il passaggio da uno specchio d'acqua ad una zona densamente abitata potrebbe creare un'intensa corrente verticale. Inoltre la presenza di ostacoli sul terreno, come catene montuose, potrebbe costringere l'aria a risalire bruscamente creando una corrente ascensionale.



### **1.5.2. Il wind shear**

Il wind shear è una corrente d'aria molto intensa, che sorge all'improvviso, e può essere orizzontale o verticale.

Il **WIND SHEAR ORIZZONTALE** crea variazioni di portanza, la quale può addirittura scendere al di sotto del peso dell'aeromobile e causare una perdita di quota improvvisa, chiamata stallo. In questa condizione un aeromobile può perdere anche qualche centinaia di metri di quota e se si trova vicino al terreno le conseguenze possono essere catastrofiche.



Il **WIND SHEAR VERTICALE** può essere molto pericoloso se la raffica di vento è discendente, in quanto si traduce in una grande perdita di quota, mentre solitamente non crea problemi se si tratta di raffiche ascendenti. Il wind shear più pericoloso è quello che si crea in corrispondenza dei temporali con nubi a sviluppo verticali (ad esempio il cumulonembo).

## 1.6. *Sintesi e mappe*

L'atmosfera è un sottile involucro di gas che avvolge il nostro pianeta. La parte più bassa dell'atmosfera, quella in contatto con il suolo, è chiamata troposfera; qui si verificano i fenomeni meteorologici. La troposfera termina con la tropopausa, che si trova ad un'altezza variabile sia in base alla latitudine, sia in base alla stagione. Con la tropopausa inizia la stratosfera. Gli aeromobili volano principalmente nella troposfera; alcuni aeromobili possono volare nella parte più bassa della stratosfera.

L'atmosfera può essere descritta in termini chimici (al suo interno troviamo principalmente azoto e ossigeno) o in termini fisici (pressione, temperatura e densità).

Le tre grandezze fisiche diminuiscono con la quota, in modo variabile in base alle coordinate geografiche e al momento considerato. Per questo motivo è stato creato un modello di atmosfera con caratteristiche medie che può essere usato quando non è possibile effettuare delle misurazioni strumentali. Questo modello è chiamato ISA, acronimo di International Standard Atmosphere. In italiano viene semplicemente chiamata atmosfera standard. Secondo questo modello:

- La temperatura, che al suolo ha il valore di 15°C, nella troposfera diminuisce di circa 6,5 °C ogni chilometro fino a raggiungere il valore di -56 °C che si mantiene costante nella parte bassa della stratosfera.
- La pressione, che al suolo ha il valore di 1013 hPa, diminuisce con la quota diventando il 10% del valore precedente ogni 20 km.
- La densità, che al suolo ha il valore di 1,225 kg/m<sup>3</sup>, diminuisce anch'essa con la quota. A 40000 ft (12192 m) la densità ha un quarto del valore che aveva al livello del mare.

Nella troposfera l'aria è in continuo movimento: in particolare i moti verticali sono creati da differenze di temperatura (che a loro volta creano differenze di densità), mentre i moti orizzontali sono creati da differenze di pressioni (il flusso d'aria si muove da zone ad alta pressione verso zone a bassa pressione).

I moti dell'aria creano alcuni fenomeni pericolosi per il volo, come la turbolenza e il wind shear.

La turbolenza è formata da raffiche di vento che creano sobbalzi e, se troppo intense, possono danneggiare la struttura.

Il wind shear è un vento improvviso, molto forte, che si manifesta solitamente in prossimità di una nube a sviluppo verticale. Il wind shear orizzontale è molto pericoloso quando investe l'aereo in coda perché fa diminuire la portanza; il wind shear verticale è molto pericoloso quando è discendente perché fa perdere quota all'aeromobile molto rapidamente.

## 1.7. *Esercizi*

### ESERCIZIO 1: completa il testo con le parole mancanti

L'atmosfera è una miscela di \_\_\_\_\_ formata prevalentemente da \_\_\_\_\_ e \_\_\_\_\_. La temperatura \_\_\_\_\_ all'aumentare della quota con un \_\_\_\_\_ termico verticale costante nella troposfera, pari a 6,5°C ogni \_\_\_\_\_ metri. La pressione e la densità \_\_\_\_\_ all'aumentare della quota.

La pressione può essere misurata con molte unità di misura. I piloti utilizzano prevalentemente l'\_\_\_\_\_, che ha simbolo \_\_\_\_\_.

### ESERCIZIO 2: completa il testo con le parole mancanti

L'atmosfera internazionale standard, indicata con l'acronimo \_\_\_\_\_, è un modello che considera per i calcoli i valori \_\_\_\_\_ di pressione, temperatura e densità dell'atmosfera. In particolare:

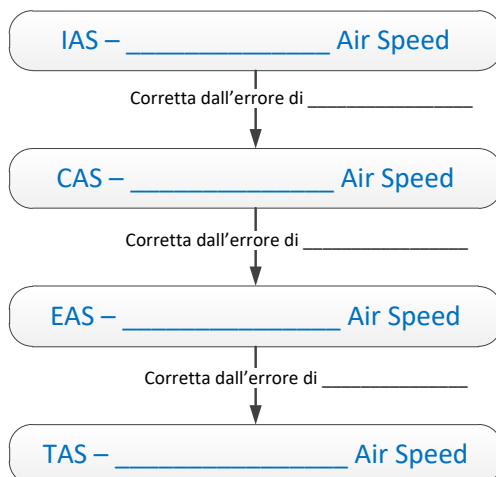
L'umidità è \_\_\_\_\_

La temperatura al suolo vale \_\_\_\_\_ °C

La pressione al suolo vale \_\_\_\_\_ hPa

La densità al suolo vale \_\_\_\_\_ kg/m<sup>3</sup>

### ESERCIZIO 3: completa lo schema con le parole mancanti



### ESERCIZIO 4: rispondi alle seguenti domande

- Spiega come è fatto e come funziona il tubo di Pitot
- Cos'è la turbolenza? Perché è pericolosa per il volo?
- Cos'è il wind shear? Perché è pericoloso per il volo?