Liceo Scientifico "E. Torricelli" Esame di Stato 2008-2009

LA FISICA DEL VOLO



Luca Degasper Classe 5^aA



INDICE DEI CONTENUTI

Perché una tesina sul volo	pag. 5
La nascita e lo sviluppo del trasporto aereo	
Il sogno di volare	pag. 6
I primi tentativi	pag. 7
L'esperienza dei fratelli Wright	pag. 7
Gli sviluppi successivi	pag. 8
Aerei in guerra	pag. 9
Lo sviluppo del trasporto aereo	pag. 10
I principi fisici del volo	
Introduzione	pag. 12
La portanza secondo il terzo principio della dinamica	pag. 12
Cosa accade intorno all'ala	pag. 16
Upwash, downwash e l'effetto Coanda	pag. 16
La circolazione e l'effetto Magnus	pag. 17
Pressioni sull'ala	pag. 19
Il calcolo della portanza	pag. 20
Lo stallo	pag. 21
La resistenza	pag. 22
La polare dell'ala	pag. 24
Il principio di Bernoulli	pag. 25
I tubi di Pitot	
Principio di funzionamento	pag. 28

Anemometro, variometro ed altimetro	pag. 29
Affidabilità degli altimetri e spazio aereo RVSM	pag. 31
Il problema della misurazione dell'altitudine	pag. 32
Misurazione della temperatura esterna	pag. 33
La bussola magnetica	
Principi di funzionamento	pag. 34
L'invenzione della bussola magnetica	pag. 35
Errori di misurazione	pag. 35
Determinazione della posizione di un aeromobile	
Rilevamento di posizione mediante l'uso di VOR e NDB	pag. 37
Funzionamento del DME	pag. 40
Stima della posizione ed incertezza	pag. 40
Le piattaforme inerziali	pag. 41
La forza di Coriolis	pag. 42
Principi di funzionamento del GPS	pag. 43
Aeropittura e futurismo	
Le avanguardie del 900 ed il Futurismo	pag. 45
L'aeropittura	pag. 47
Il Manifesto dell'aeropittura futurista	pag. 49
Primavera umbra (Gerardo Dottori)	pag. 50
Experimentation in England: Finnegans Wake (James Joyce)	pag. 52
Bibliografia e sitografia	pag. 55

PERCHE' UNA TESINA SUL VOLO

L'evoluzione dei mezzi di trasporto avvenuta durante l'ultimo secolo ha condizionato in maniera determinante la nostra vita quotidiana. Quando ci si appresta a fare un viaggio ci si preoccupa soltanto del soggiorno, ma sempre meno attenzione viene dedicata al viaggio in sé. Questo accade forse perché oggi il comfort a cui ci hanno abituato i mezzi di trasporto moderni è tale da permetterci di ignorare questi aspetti, ma ci sono mezzi che, come gli aerei, sono relativamente giovani e si sono sviluppati e aperti al mercato del consumo di massa solo recentemente. Questo è uno dei motivi per i quali molte persone ignorano come facciano a volare, nonostante i principi fisici che stanno alla base della generazione della portanza siano, con le dovute semplificazioni e senza una preparazione scientifica particolare. Negli anni passati ho avuto più volte modo di parlare con amici e conoscenti dell'argomento, e molto spesso ho notato una generale ignoranza dei principi che stanno alla base del trasporto aereo. Ho persino sentito dire che un aeromobile è in grado di volare per la differenza di pressione tra interno ed esterno, un po' come le mongolfiere!

Un altro elemento che causa una grande confusione in questo ambito è la poca chiarezza di molti libri di testo. Molto spesso, per questioni di facilità e di comprensibilità, la generazione della portanza viene spiegata prendendo in considerazione il principio di Bernoulli. Come avremo modo di mettere in evidenza in questo percorso di approfondimento, questo ragionamento parte però da premesse sbagliate e introduce condizioni necessarie in modo del tutto arbitrario. La confusione viene ulteriormente peggiorata dal fatto che la generazione della portanza viene spiegata in questo modo anche in testi destinati agli "addetti ai lavori", per esempio nel libro su cui studiano coloro che vogliono conseguire il brevetto di pilota privato all'aeroporto di Bolzano. Io stesso ho avuto difficoltà a reperire due testi che spiegassero la portanza allo stesso modo.

In questo percorso di approfondimento ho quindi scelto di affrontare questo argomento da un punto di vista fisico, anche per coloro che hanno paura di volare o semplicemente per chi si chiede come faccia un aereo a "stare su".



5

LA NASCITA E LO SVILUPPO DEL TRASPORTO AEREO

Il sogno di volare

Forse per l'idea di libertà e di indipendenza che il volo suscita sia in chi ne è il protagonista diretto, sia in un semplice spettatore, fin dall'inizio l'uomo ha manifestato il desiderio di volare, al pari degli uccelli.

Ne è una dimostrazione il mito greco di Dedalo e Icaro (Fig. 1). Secondo la tradizione, Dedalo, che era ospitato dal re Minosse nel palazzo reale di Creta, si accoppiò con una schiava della corte, generando Icaro. Quest'ultimo fu l'artefice della mucca di legno nella quale Pasifae, moglie di Minosse, si nascose per accoppiarsi con un toro mandato da Poseidone; da questa unione nacque il minotauro, che venne rinchiuso da Minosse nel labirinto insieme a Icaro e Dedalo, poiché quest ultimo, avendolo costruito, ne conosceva la struttura. Allora Dedalo, per fuggire, costruì per entrambi un paio d'ali usando delle penne di uccello, e le attaccò ai loro corpi con della cera. Icaro però, esaltato dalla sensazione di libertà e di



Fig. 1 - Dedalo e Icaro

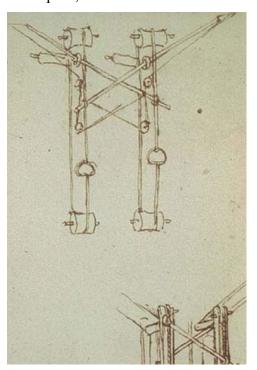


Fig. 2 – Leonardo, Macchina per il volo

onnipotenza che il volo provocò in lui, dimenticò le raccomandazioni del padre e si spinse troppo in alto; quando però il Sole sciolse la cera precipitò rovinosamente in mare. Dedalo riuscì a scappare da Creta, e quando Minosse lo trovò in Sicilia si fece aiutare dalla servitù di re Cloalo, dove si era rifugiato, per ucciderlo.

Il celebre Leonardo da Vinci, nato a Vinci nel 1452, fu una delle prime persone ad analizzare il problema del volo razionalmente e a cercare di costruire delle macchine che permettessero all'uomo di volare (Fig. 2). Nel 1486 egli espresse per la prima volta la sua fiducia nella possibilità del volo umano, che lo accompagnò per tutta la vita, nonostante gli insuccessi e l'obiettiva difficoltà dell'impresa:

"Tanta forza si fa colla cosa incontro all'aria, quanto l'aria contro la cosa. Vedi l'alie percosse contro l'aria far sostenere la pesante aquila nella suprema e sottile aria. Ancora vedi la mossa aria sopra il mare ripercossa nelle

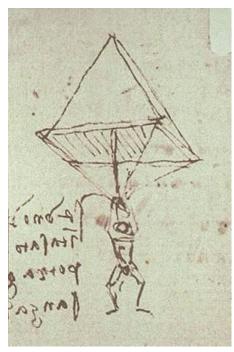


Fig. 3 - Leonardo, Paracadute

gonfiate vele, far correre carica e pesante la nave; sicché per queste dimostrative e assegnate ragioni potrai conoscere l'uomo colle sue congegnate e grandi alie, facendo forza contro alla resistente aria, vincendo, poterla soggiogare e levarsi sopra di lei". ¹

Come si vede, lo studio del volo è basato su un'analisi e su una classificazione razionale e organica dei fenomeni e delle situazioni che interessano il volo. Leonardo estese i suoi studi anatomici al corpo degli uccelli, dai quali voleva "estrapolare" i segreti del volo. Nel 1505 redasse il "Codice sul volo degli uccelli", ora conservato presso la Biblioteca Reale di Torino, dove raccolse i risultati dei suoi studi. Oltre a svariate macchine per volare, progettò il primo paracadute (Fig. 3), proponendolo come il mezzo più semplice per volare:

"Se un uomo ha un padiglione di pannolino intasato, che sia di 12 braccia per faccia e alto 12, potrà gittarsi d'ogni grande altezza sanza danno di sé".²

I primi tentativi

I primi esperimenti di volo ad ali fisse risalgono al 1809, quando l'inglese George Cayley fece volare un aliante capace di trasportare un uomo. Prima della fine del secolo vennero portati a termine migliaia di voli controllati con vari tipi di aliante; anche l'aquilone, già conosciuto in Cina da 2500 anni e occasionalmente già utilizzato per sollevare l'uomo, venne utilizzato a fini militari e per ricognizioni meteorologiche, dopo essere stato opportunamente modificato. A cavallo tra il XIX e il XX secolo fecero la loro comparsa strutture aeree più complesse, derivanti dall'aquilone e dall'aliante, nonché dallo sviluppo del motore a combustione, sviluppato dopo il 1866 principalmente per il trasporto su strada.

L'esperienza dei fratelli Wright

I famosi fratelli Wilbur e Orville Wright, usando solo le loro modestissime risorse economiche, furono i primi a portare a termine un volo prolungato e controllato con un aeroplano dotato di motore: era il 17 dicembre 1903 a Kitty Hawk, negli Stati Uniti. Questo aereo, chiamato *Flyer*, era dotato di un motore a benzina da 9 kW; esso poteva effettuare solo dei brevi voli rettilinei, sollevandosi di poco al di sopra del terreno con l'ausilio di un leggero vento frontale e di una rotaia di lancio (Fig. 4). I fratelli Wright

Fig. 4 - Il Flyer

^{*}

¹ Leonardo da Vinci, *Codice Atlantico*, fol. 272, 1478-1518

² Leonardo da Vinci, *Codice Atlantico*, fol. 272, 1478-1518

continuarono a perfezionare il loro aeromobile; nel 1905 una terza versione del *Flyer* effettuò numerosi voli circolari, di cui uno di oltre 38 km. In seguito sospesero le sperimentazioni e tennero segreto il loro lavoro, che ebbe pochissima pubblicità; il loro successo non fu ufficialmente riconosciuto fino a quando non diedero una dimostrazione di volo in pubblico nel 1908. Il *Flyer* dei fratelli Wright accoppiava con successo un sistema di propulsione leggero ad una struttura efficiente, ed incorporava per la prima volta un sistema di controllo a tre assi. Meno soddisfacente fu l'assenza degli impennaggi di coda e la posizione frontale dello stabilizzatore, in una soluzione simile a quella dei *canard* moderni, che rendeva l'aeromobile instabile e difficile da manovrare. Durante il breve periodo di predominanza del biplano senza coda dei fratelli Wright, ne furono costruiti circa 30 esemplari.

Gli sviluppi successivi

Il primo tentativo di volo motorizzato in Europa si ha il 23 ottobre 1906, ad opera del brasiliano Alberto Santos-Dumont; tuttavia il suo biplano, dotato di timoni anteriori, era insoddisfacente. Più

significativi in questo senso furono lo *Standard*, un biplano ad elica spingente dei Voisin (Fig. 5) apparso per la prima volta nel 1907, e il *Blériot XI*, un monoplano ad elica traente che fu il protagonista della prima traversata aerea della Manica il 25 luglio 1909 (Fig. 6). Entrambi questi tipi di velivoli vennero perfezionati

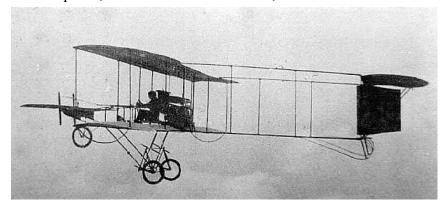


Fig. 5 – il biplano dei fratelli Voisin

negli anni successivi, ma il monoplano ad elica traente, nonostante fosse destinato a predominare negli anni successivi, venne momentaneamente accantonato a favore degli esemplari ad elica spingente, più robusti ed affidabili, come l'*Henri Farman III* (da Farman, l'inglese che riprese il progetto dello Standard e ne migliorò l'efficienza dotandolo di alettoni). Nel 1909 debuttò invece un ibrido tra queste due tipologie di aereo, il biplano ad elica traente; prodotto per la prima volta da Louis Breguet, dominò la scena dell'aviazione per i venti anni successivi.



Fig. 6 – Il Blériot XI

I grandi progressi tecnologici permisero di aumentare notevolmente prestazioni, soprattutto per quanto riguarda il motore e la struttura, sempre più leggera e resistente. La Prima guerra mondiale, inoltre, rappresentò un grande incentivo per l'industria aeronautica, poiché la ricerca in questo campo venne in gran parte finanziata dai Ministeri della Difesa delle varie nazioni, dopo che compresero l'utilità di questi nuovi mezzi ai fini bellici.

Aerei in guerra

Fino al 1914 gli aeroplani erano stati costruiti in numero limitato (circa 5000), la maggior parte dei quali in via sperimentale o comunque frutto di una limitata esperienza; alla fine della guerra erano stati prodotti più di 200000, e la ricerca in campo aeronautico poteva contare su milioni di ore di volo. Durante la guerra vennero fatti passi avanti per quanto riguarda le dimensioni degli aeroplani, il loro peso, la potenza e l'affidabilità dei motori. Nonostante questo, i principi costruttivi rimasero essenzialmente gli stessi ed anche i miglioramenti aerodinamici furono limitati, probabilmente perché si era interessati ad un riscontro pratico immediato e quindi alla produzione in larga scala di macchine già sperimentate. Quasi tutti gli aeroplani messi in servizio nel 1914 per impieghi militari erano a due posti, non armati, con un peso compreso tra i 700 e i 900 chilogrammi, una velocità di circa 120 km/h, un'autonomia inferiore ai 160 km e una quota massima raggiungibile di 3000 metri. Questi aerei servivano principalmente per attività di ricognizione e i più famosi erano i francesi *Voisin III*, i tedeschi *Albatros CIII* (Fig. 7) ed i britannici *BE2C* (Fig. 8) progettati dalla *RAF*. Francia, Germania e Gran Bretagna furono in effetti le nazioni che dominarono, dal punto di vista aeronautico, il periodo della Prima guerra mondiale.



Fig. 7 - L'Albatros CIII



Fig. 8 – Il BE2C

Lo sviluppo del trasporto aereo

Negli anni antecedenti la Prima guerra mondiale gli aerei erano troppo poco affidabili per poter sostenere un servizio di trasporto passeggeri e merci regolare. Ci furono alcuni isolati tentativi, come dei voli panoramici locali in Germania tra il 1910 e il 1914, il *Coronation Aerial Post*, servizio postale sperimentale che in Gran Bretagna si occupò della corrispondenza tra Hendon e Windsor dal 9 al 26 settembre 1911; in America vi era inoltre la *St Petersburg-Tampa Airboat Line*, che trasportava passeggeri in Florida nei mesi di gennaio e febbraio del 1914. Dopo la fine della guerra, i mezzi erano diventati più affidabili e nacquero molti servizi postali e di trasporto passeggeri sia in Europa che, successivamente, in America.

Il primo servizio regolare di trasporto passeggeri fu operato dalla tedesca *Deutsche Luft Reederei* tra Berlino, Lipsia, Weimar e in seguito anche Amburgo; questo servizio cominciò il 22 febbraio 1919 e proseguì per più di cinque mesi. Il primo servizio giornaliero internazionale regolare funzionò per 16 mesi tra Parigi e Londra a partire dal 25 agosto 1919. Era gestito da una società britannica, la *Aircraft Transport and Travel*, che in seguito andò a costituire la *International Air Traffic Association (IATA)*, ancora oggi esistente.

I primi aerei da trasporto erano adattamenti di modelli militari già sperimentati, e solo in seguito comparvero i primi modelli prettamente civili. Negli anni venti gli aerei di linea erano soprattutto biplani, costruiti con legno, fil di ferro e tela (seguendo l'esempio del Flyer), ma già verso la fine del decennio nuovi materiali come l'acciaio e il duralluminio iniziarono a sostituire il legno nell'intelaiatura. C'erano poi alcuni monoplani ad ala bassa completamente metallici, come i tedeschi Junkers, oppure monoplani ad ala alta con ali in legno e fusoliera con strutture tubolari in acciaio rivestite di tela, come i Fokker olandesi. Generalmente i primi aerei civili erano equipaggiati con un solo motore. Pochi erano i casi in cui un aereo era dotato di più di un motore, poiché questo aumentava di molto le possibilità di guasto, in occasione del quale bisognava atterrare e non si poteva proseguire il volo. Per questo motivo ci si concentrò sullo sviluppo di motori più efficienti, ma soprattutto più affidabili. I tempi tra due revisioni obbligatorie di un motore aumentarono dalle 150 ore di volo immediatamente dopo la guerra alle 500 ore agli inizi degli anni Trenta (mentre rimasero – e sono tutt'ora – ridotti per gli aerei militari). Vennero sviluppati i primi motori radiali raffreddati ad aria, che si affermarono sia in campo civile che militare e sostituirono progressivamente i motori rotativi con tutto il blocco motore in rotazione e i motori in linea con raffreddamento ad aria o ad acqua fino ad ora utilizzati.

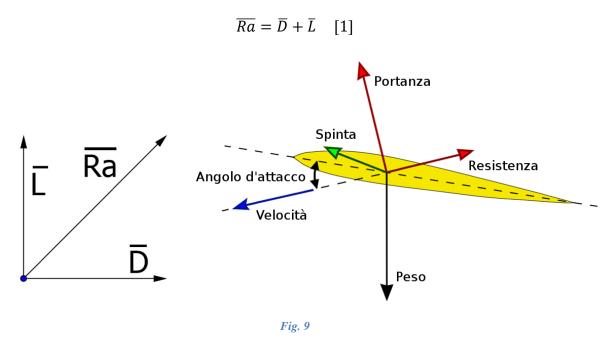
Dopo la Prima guerra mondiale l'Europa ebbe il predominio per quanto riguarda lo sviluppo dei trasporti aerei. Dal 1919 iniziarono inoltre a diffondersi le prime linee aeree, comprese le linee aeree di bandiera: la KLM in Olanda (1920) e la Sabena in Belgio (1923); la Imperial Airways in Gran Bretagna (1924) e la Lufthansa in Germania (1926) nacquero dall'unione di compagnie aeree minori preesistenti. I margini di profitto di queste compagnie erano però molto bassi, e i ricavati coprivano a malapena il 20% dei costi; per questo motivo la maggior parte delle linee aeree erano finanziate dai relativi governi. Nel 1930 si era creata una rete europea di servizi di trasporto aereo finanziata dai governi, e vennero introdotte le prime rotte verso i territori coloniali o all'interno di essi (per la Francia in Africa settentrionale e America meridionale, per il Belgio nel Congo, per la Germania in America meridionale e nel Congo, per la Gran Bretagna in Egitto e in India). Per quanto riguarda i velivoli, i miglioramenti in velocità erano scarsi, ma la sicurezza e l'affidabilità

erano notevolmente aumentate. Le tariffe vennero ulteriormente ridotte, ma nonostante anche i costi di gestione fossero calati, erano coperti dai ricavi solo per il 25%, con punte del 60% per le compagnie aeree di maggior successo. Gli Stati Uniti si svilupparono tardi rispetto all'Europa, ma il loro progresso fu molto veloce: mentre nel 1924 non c'era praticamente alcun servizio di trasporto aereo offerto ai civili, nel 1929 venivano trasportati un terzo di persone in più rispetto alla Germania. Negli anni Trenta la situazione economica delle compagnie aeree statunitensi era leggermente migliore rispetto a quella delle compagnie europee e i loro ricavi arrivavano in media a coprire il 30% dei costi.

I PRINCIPI FISICI DEL VOLO

Introduzione

Ogni oggetto immerso in un fluido e in movimento relativo rispetto ad esso è soggetto ad una forza chiamata **reazione aerodinamica** (\overline{Ra}), scomponibile in due componenti ortogonali (Fig. 9); la componente parallela al movimento relativo del fluido viene detta **resistenza** (\overline{D} , drag), mentre la componente perpendicolare ad esso viene detta **portanza** (\overline{L} , lift).



Nel corso di questo breve percorso di approfondimento vedremo come si genera la reazione aerodinamica, e quindi la portanza. Partiremo da semplici considerazioni basate sul terzo principio della dinamica applicate ad un'ala geometricamente semplificata, per poi passare alla definizione "ufficiale" di portanza e ad alcune considerazioni su di essa. Gli ultimi capitoli di questa sezione sono inoltre dedicati alla trattazione di alcune problematiche più pratiche che interessano il volo di un aeromobile, come lo stallo, la misurazione della quota e la taratura dell'altimetro.

Sui libri di testo, scolastici e non, la portanza viene spesso spiegata basandosi sul principio di Bernoulli (pag. 25), grazie anche alla sua facile comprensibilità ed immediatezza. Esso svolge sicuramente un ruolo nella generazione della portanza, ma come vedremo in seguito si tratta di un ruolo marginale che si somma ad altri fenomeni.

La portanza secondo il terzo principio della dinamica

Iniziamo affrontando questo problema da un punto di vista prettamente fisico. Prendiamo come sistema di riferimento l'ala; durante il volo le molecole d'aria saranno in movimento relativo rispetto ad essa, si scontreranno con essa e in seguito allo scontro, che per comodità considereremo

elastico, verranno deviate in modo differente a seconda dell'angolo con cui colpiscono la superficie inferiore dell'ala, detto angolo di incidenza.

Chiamato α quest'angolo e ricondotta l'ala ad un rettangolo di superficie S che si muove alla velocità v, possiamo dire che nel tempo Δt l'ala "spazzi" un volume pari a $Sv\Delta t\sin\alpha$, pari a quello di un parallelepipedo obliquo di base S e altezza $v\Delta t\sin\alpha$. Quindi, nell'intervallo di tempo Δt , ogni molecola contenuta in questo volume si scontrerà con il ventre dell'ala con un certo angolo di incidenza e verrà deviata di conseguenza. Poiché si tratta di urti elastici, e considerato che l'agitazione termica rimane costante, possiamo affermare che $|\bar{v}| = |\bar{v}'|$, dove v e v' sono le velocità della molecola d'aria rispettivamente prima e dopo l'urto.

Prendiamo ora in considerazione la seconda legge di Newton, che afferma che una forza è una variazione di quantità di moto in un certo periodo di tempo:

$$\bar{F} = \frac{d\bar{p}}{dt} = \frac{m(|\bar{v'} - \bar{v}|)}{\Delta t} \quad [2]$$

Osservando la Fig. 10, possiamo affermare che

$$|\bar{v}' - \bar{v}| = 2v \sin \alpha \quad [3]$$

dove v è la velocità dell'aereo rispetto all'aria.

Possiamo quindi sostituire il valore ottenuto nella formula [2] e ottenere una forza pari a

$$|\bar{F}| = \frac{2mv \sin \alpha}{\Delta t}$$
 [4]

Abbiamo detto che questa è la reazione aerodinamica dell'ala, ovvero la forza che si genera quando nel tempo Δt un gruppo di molecole di massa complessiva m colpiscono alla velocità v il ventre dell'ala con un angolo di attacco α . Definita ρ la densità dell'aria, possiamo ricavare che la massa complessiva di queste molecole è pari a

$$m = \rho \Delta V = \rho S v \Delta t \sin \alpha$$
 [5]

Sostituendo quindi nella formula [4] e semplificando otteniamo

$$|\bar{F}| = |\overline{Ra}| = 2\rho S v^2 \sin^2 \alpha$$
 [6]

Di questa forza vogliamo considerare solamente la portanza, ovvero la componente verticale. Otterremo quindi

$$|\bar{L}| = 2\rho S v^2 \sin^2 \alpha \cos \alpha \quad [7]$$

Analizzando il nostro risultato vediamo che la portanza dipende essenzialmente dall'angolo di incidenza delle ali e dal quadrato della velocità dell'aereo, valori che durante il volo devono essere adeguatamente bilanciati tra loro a seconda delle necessità. Infatti, quando un aereo vola a basse velocità dovrà mantenere un assetto più cabrato rispetto al regime di crociera per continuare a

generare una portanza sufficiente. O, molto più semplicemente, quando un aereo vuole aumentare la propria quota, alzerà il muso in modo da generare più portanza. E' anche possibile andare a

modificare la superficie alare durante il volo, in particolar modo nelle fasi di atterraggio e decollo, quando è necessario mantenere velocità molto basse senza però eccedere con l'angolo di incidenza delle ali per evitare di entrare in stallo (pag. 21) o toccare la pista con la parte posteriore dell'aereo. A questo scopo gli aerei sono dotati di apposite superfici mobili situate sul bordo d'uscita delle ali, chiamate flaps; i liners più grandi hanno anche delle superfici analoghe, chiamate slats, in corrispondenza del bordo di attacco delle ali. Essi hanno il compito, oltre che di abbassare il leading edge dell'ala e "invitare" quindi una maggior quantità di aria, grazie alla circolazione, a scorrere lungo il bordo superiore di essa, quello di "soffiare" e dirigere il flusso sulla superficie, suddetta energizzandolo ritardando un eventuale stallo dell'aeromobile. A mano a mano che si rende necessaria una diminuzione della velocità, il pilota estende progressivamente flaps e slats (Fig. 11) in modo da aumentare il volume d'aria "spazzato" dalle ali e quindi, a parità di velocità, la portanza.

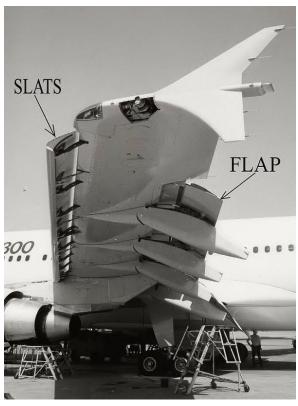


Fig. 11 - Slats e flaps

In realtà questa formula, ottenuta con semplici calcoli a partire da uno dei principi su cui si basa la fisica, semplifica il problema e non tiene in considerazione molti altri fattori che influiscono sulla

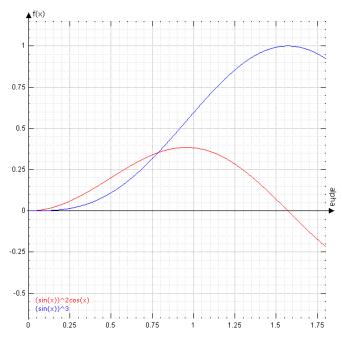


Fig. 12 - L'andamento della portanza

generazione della portanza, tra cui limitazioni fisiche dell'aria stessa. possiamo rendere conto di queste limitazioni se, invece che prendere in considerazione la portanza, analizziamo la resistenza generata delle molecole, ovvero dagli urti componente orizzontale della reazione aerodinamica calcolata a partire dalla formula [6], pari a

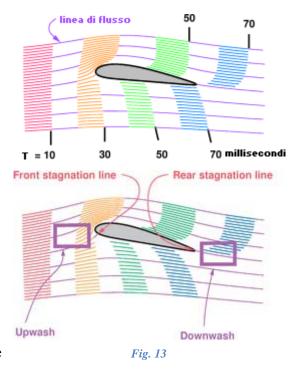
$$\overline{|D|} = 2\rho S v^2 \sin^3 \alpha \quad [8]$$

Riportando in un grafico l'andamento di $\sin^2 \alpha \cos \alpha$ (portanza) e $\sin^3 \alpha$ (resistenza), possiamo vedere che le resistenze che si generano sono eccessive e che quindi sono state introdotte eccessive semplificazioni (Fig. 12).

Si conclude qui la prima parte di questo approfondimento. Dopo aver fatto queste considerazioni di carattere generale per renderci conto di cosa sia la portanza e da quali grandezze essa dipenda, possiamo affrontare il tema più dettagliatamente analizzando cosa effettivamente accade intorno all'ala di un aeromobile.

Cosa accade intorno all'ala

La Fig. 13 rappresenta una simulazione in galleria del vento degli effetti dell'ala di un aeroplano quando è in moto relativo rispetto alla massa d'aria che la circonda. Le linee orizzontali sono dette linee di flusso (flow lines), e ci mostrano la traiettoria seguita dalle molecole d'aria. Le fasce verticali colorate ci permettono di osservare le variazioni di velocità del flusso d'aria. Possiamo immaginare di avere del fumo colorato che viene emesso all'inizio della galleria del vento ad intervalli regolari (nel caso dell'esperimento raffigurato, ogni emissione di fumo colorato dura 10 ms); quindi, nei punti dove le fasce colorate appaiono più larghe avremo una velocità maggiore, poiché l'aria copre una distanza maggiore nello stesso intervallo di tempo. Un riscontro delle variazioni di velocità ci è dato anche dalle linee di flusso: poiché l'aria può essere considerata incomprimibile in queste circostanze,



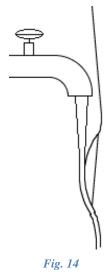
possiamo dire che quando le linee di flusso si restringono la stessa quantità di aria deve passare in uno spazio più piccolo, e di conseguenza aumenta la propria velocità.

Come possiamo osservare dalle linee di flusso orizzontali, l'aria non si sposta solo da sinistra verso destra, ma nella parte di spazio che precede il bordo d'attacco dell'ala si sposta anche verso l'alto (upwash); analogamente, nella parte di spazio che sovrasta e segue l'ala l'aria riceve una spinta verso il basso (downwash). Il dawnwash è relativamente intuitivo da comprendere poiché, per i principi della dinamica, la funzione dell'ala è generare uno spostamento netto di aria verso il basso, con lo scopo di generare una forza rivolta verso l'alto. L'upwash è invece un fenomeno più insolito e curioso da comprendere; analizzeremo più dettagliatamente entrambi in seguito. La linea che divide l'aria che passerà sopra l'ala da quella che invece passerà sotto prende il nome di linea di stagnazione (stagnation line) ed è collocata longitudinalmente lungo il bordo di attacco dell'ala, o meglio in prossimità di esso. Una seconda linea di stagnazione è collocata lungo il bordo posteriore dell'ala, e indica il ricongiungimento del flusso superiore con il flusso inferiore. Le particelle d'aria in avvicinamento prenderanno quindi una strada o l'altra a seconda della loro posizione rispetto alla stagnation line situata sul bordo di attacco dell'ala.

Upwash, downwash e l'effetto Coanda

Mentre è facile comprendere la deflessione verso il basso delle linee di flusso che si trovano sotto l'ala, considerando il fenomeno una semplice deviazione della loro traiettoria da parte del ventre alare, è lecito chiedersi come faccia il dorso dell'ala a deviare verso il basso l'aria che si trova sopra di esso. Per spiegare questo fenomeno si prende in considerazione il cosiddetto **effetto Coanda**, ovvero la forza che agisce su un fluido in movimento relativo rispetto ad una superficie curva mantenendolo aderente alla superficie stessa. Per il **principio di non slittamento**, in ogni fluido viscoso (e quindi non ideale) ci sarà uno strato, detto **strato limite**, che si manterrà aderente alla superficie lungo la quale avviene il movimento e che avrà una velocità relativa rispetto ad essa pari

Luca Degasper La fisica del volo



a zero. Questo fenomeno lo si può osservare ad esempio facendo scorrere l'acqua del rubinetto sulla superficie curva di un bicchiere tenuto in posizione orizzontale o sulla superficie convessa di un cucchiaino (Fig. 14). Analogamente, le molecole di aria tendono a rimanere aderenti alla superficie alare, ed essendo il dorso alare incurvato verso il basso anche le molecole seguiranno questo profilo; ogni strato di molecole che si sposta verso il basso al passaggio dell'ala genererà una depressione nello spazio sovrastante che trascinerà verso il basso gli strati d'aria superiori fino a raggiungere un'altezza di qualche metro sopra l'ala stessa, in corrispondenza della quale gli effetti del passaggio dell'ala sono pressoché nulli. Questo spostamento netto costituisce il downwash. Come già scritto, l'effetto Coanda dipende dalla viscosità del fluido, ed è proporzionale al raggio di curvatura della superficie da seguire. Con l'aumentare dell'angolo di incidenza, la curvatura che le molecole d'aria devono seguire per poter percorrere il dorso dell'ala è sempre più accentuata; si arriva così ad un certo angolo di incidenza in

corrispondenza del quale il flusso d'aria si stacca dal dorso dell'ala e si ha un'improvvisa perdita di portanza. Questo fenomeno è detto **stallo** e lo analizzeremo più dettagliatamente in seguito (pag. 21).

Il downwash è quindi una forza che agisce sulle molecole deviandole verso il basso, per il terzo principio della dinamica deve però esistere una forza uguale e contraria (Fig. 15): essa agisce sull'ala ed è proprio la portanza. Tutto questo per quanto riguarda il downwash. Ma come si spiega l'upwash? Come si può notare nella Fig. 13, con l'aumentare dell'angolo di incidenza la linea di ristagno frontale si sposta verso il basso lungo il ventre dell'ala, mentre quella posteriore mantiene la sua posizione. Quindi le molecole d'aria che in queste condizioni si avvicinano all'ala subito sopra la linea di ristagno anteriore, torneranno indietro lungo il ventre dell'ala, verranno spinte verso l'alto e percorreranno

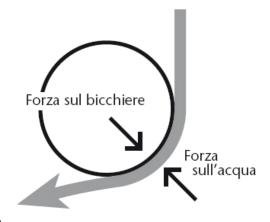


Fig. 15 - L'effetto Coanda

in seguito il dorso dell'ala, fino a ricongiungersi con il flusso inferiore in corrispondenza del bordo d'uscita. L'*upwash* complica le cose in quanto uno spostamento dell'aria verso l'alto genera necessariamente una deportanza sull'ala. Per spiegare questo spostamento dell'aria verso l'alto che avviene davanti all'ala, analizziamo il fenomeno della **circolazione**.

La circolazione e l'effetto Magnus

Il fenomeno della circolazione si riferisce al movimento dell'aria in senso circolare che avviene intorno all'ala.

Per quantificare il fenomeno della circolazione possiamo basarci sulla cosiddetta **condizione di Kutta**, che afferma che l'aria, per la sua viscosità, tende ad evitare di girare intorno ad angoli molto acuti. Nell'ala questa condizione si verifica in corrispondenza del bordo d'uscita, e la quantità di circolazione varia in modo tale da mantenere la linea di stagnazione posteriore in corrispondenza del bordo d'uscita, poiché essa altrimenti tenderebbe a spostarsi in avanti lungo il dorso dell'ala con l'aumentare dell'angolo di incidenza (vedi Figg. 16 e 18). Nelle figure seguenti possiamo vedere,

analizzati separatamente, rispettivamente le linee di flusso dell'aria intorno ad un'ala senza circolazione, il fenomeno puro della circolazione e le linee di flusso dell'aria intorno all'ala con il fenomeno della circolazione.

Fig. 16: linee di flusso senza circolazione (situazione innaturale); notare la linea di stagnazione posteriore, che si trova spostata sul dorso dell'ala, e la quantità quasi nulla di *upwash* in corrispondenza del bordo di attacco dell'ala.

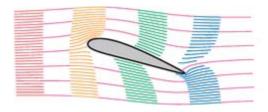


Fig. 16

Fig. 17: fenomeno della circolazione puro.

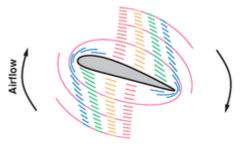


Fig. 17

Fig. 18: risultato della somma di questi due fenomeni; notare la separazione delle molecole che passano sopra l'ala dalle loro "gemelle" corrispondenti che passano sotto di essa, che procedono più lentamente a causa del verso della circolazione che sotto l'ala non è concorde alla velocità delle molecole d'aria.

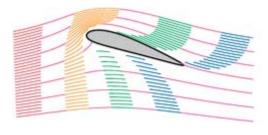


Fig. 18

Per dare una definizione di circolazione, possiamo immaginare di prendere una linea chiusa C immersa nel campo di velocità da studiare, e dividerla in segmentini $d\bar{l}$ infinitamente piccoli, l'intensità di ognuno dei quali verrà moltiplicata per l'intensità della componente parallela ad esso della velocità vettoriale \bar{v} che le molecole d'aria hanno in quel punto, ovvero viene eseguito il prodotto scalare tra il vettore \bar{v} ed il vettore $d\bar{l}$. La circolazione è quindi definita come

$$\Gamma = \oint_{C} (\bar{v} \cdot d\bar{l}) = \oint_{C} (v \cdot dl \cdot \cos \alpha) \quad [9]$$

dove α è l'angolo che si forma tra \bar{v} e $d\bar{l}$.

Ogni singolo contributo $\bar{v} \cdot d\bar{l}$ è definito come positivo o negativo se imprime una circolazione oraria od antioraria lungo la linea chiusa C.

Il fenomeno della circolazione viene avviato da un vortice antiorario che si crea superiormente all'ala in corrispondenza del bordo d'uscita quando l'aereo, da fermo, inizia a muoversi. Questo vortice, a mano a mano che l'aereo acquista velocità, viene "stirato" all'indietro, ma per il **teorema di Helmholtz** sulla conservazione della vorticità, quest'ultima si trasferirà sull'ala, generando una circolazione uguale ed opposta (cioè oraria).

Il fenomeno della circolazione genera inoltre un altro effetto, il cosiddetto **effetto Magnus**, secondo il quale su di un corpo che sia in movimento relativo rispetto ad un fluido ma che presenti un'asimmetria per quanto riguarda la velocità del fluido, generata dalla rotazione del corpo stesso o da fenomeni di circolazione, agisce una forza che lo spinge verso la zona di pressione minore, ovvero di velocità maggiore. Quando i tennisti imprimono alla pallina una rotazione in un verso o nell'altro (*topspin* o *backspin* a seconda del verso di rotazione), è proprio per sfruttare questa forza per avere una gittata più lunga o più corta. Nell'ala l'asimmetria viene data proprio dalla circolazione, che fa sì che la velocità delle particelle d'aria sul dorso dell'ala sia superiore a quella delle particelle sottostanti, e la forza che si genera è appunto la portanza.

Pressioni sull'ala

Come abbiamo appena visto, l'ala è soggetta di diverse forze che agiscono sulla sua superficie, ovvero a diverse pressioni.

Nella Fig. 19 le zone colorate in blu (s) sono pressioni negative (un "risucchio", se vogliamo), mentre quelle colorate in rosso sono pressioni positive (p). Molto spesso in aerodinamica la pressione che agisce sulla superficie alare viene espressa in funzione della pressione dinamica Q, e quindi in funzione della velocità relativa dell'aria. Ogni linea isobara rappresentata in figura divide due zone la cui differenza di pressione è di 0,2 Q. Dalla figura vediamo quindi che nel primo quarto della superficie dorsale dell'ala viene generata circa la metà della portanza, e che aumentando l'angolo di incidenza si ottengono pressioni negative che possono raggiungere i 3Q. Per questo motivo è possibile trasportare oggetti attaccati al ventre alare, ad esempio i motori degli aerei di linea, ma è molto pericoloso ai fini della portanza andare a modificare la superficie superiore dell'ala. Come si vede nella Fig. 20, aumentando l'angolo di incidenza aumenta il downwash, e con esso la depressione dorsale e quindi la portanza. Si verifica inoltre

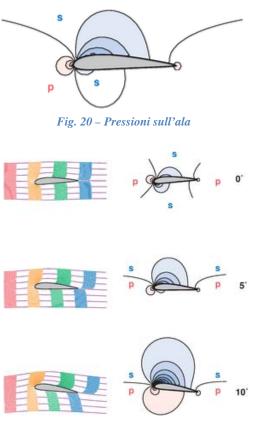


Fig. 19 – Pressioni sull'ala

un aumento della pressione ventrale, che può essere spiegato considerando che, come abbiamo calcolato all'inizio del percorso, l'ala deflette verso il basso una quantità di aria proporzionale, per piccoli angoli, all'angolo di incidenza.

Il calcolo della portanza

La formula per il calcolo della portanza è

$$L = \frac{1}{2}\rho v^2 SC_l \quad [10]$$

dove S è la superficie alare e C_l è il **coefficiente di portanza**, che dipende dall'angolo di incidenza e dalla geometria delle ali. Possiamo quindi dedurre che in volo rettilineo la portanza dipenda essenzialmente dalla velocità dell'aeromobile e dall'angolo di incidenza, essendo la densità dell'aria, la superficie alare e la geometria delle ali costanti (escludendo l'eventuale utilizzo di ipersostentatori).

Il grafico rappresentato in Fig. 21 mostra come varia il coefficiente di portanza C_p al variare dell'angolo di incidenza. Come vediamo, per piccoli angoli la portanza è direttamente proporzionale all'angolo di incidenza e aumenta linearmente fino a raggiungere un punto massimo corrispondente a circa 15° di incidenza, detto **angolo di incidenza critico**, dopo al quale cala rapidamente (si verifica lo stallo, che tratteremo più dettagliatamente in seguito).

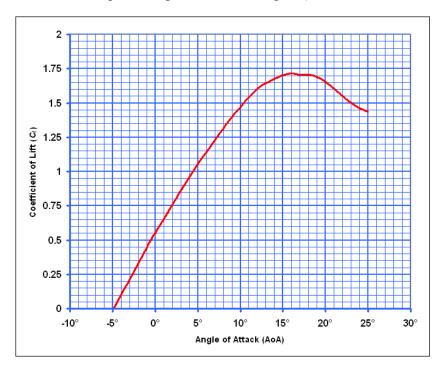


Fig. 21 – Andamento della portanza

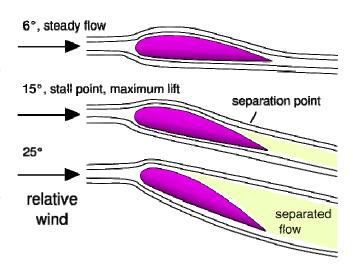
Un'altra formula per il calcolo della portanza ci è data dal **teorema di Kutta-Joukowski**, che tiene conto del fenomeno della circolazione che, come abbiamo visto, è direttamente proporzionale alla portanza:

$$L = \rho v \Gamma l$$
 [11]

dove l è l'apertura alare, ρ la densità dell'aria, Γ la circolazione dell'aria intorno all'ala e v la sua velocità relativa.

Lo stallo

Se superiamo l'angolo di incidenza critico, che generalmente si aggira intorno ai 15°, ma è maggiore per ali più allungate, la portanza cala drasticamente ed e si verifica il fenomeno dello stallo. Questo accade perché l'aria, nel suo fluire intorno all'ala, ha delle limitazioni fisiche e se superiamo un certo angolo di incidenza il flusso superiore, non riuscendo più a seguire la superficie alare, si stacca letteralmente da essa (Fig. 22). Analizzando il fenomeno più dettagliatamente, durante uno stallo le linee di flusso non sono più tali, ma vengono sostituite da moti vorticosi che non

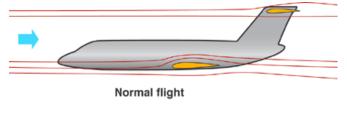


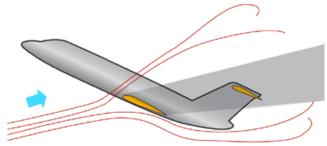
generano portanza. La linea lungo il dorso dell'ala oltre la quale il flusso laminare dell'aria viene sostituito da questi moti vorticosi prende il nome di **linea di separazione**.

Lo stallo non è un fenomeno improvviso e imprevedibile, bensì graduale, per il progressivo aumentare dei suddetti moti vorticosi. Esso è infatti preceduto da una situazione in cui l'aereo inizia a rispondere peggio ai comandi del pilota e, soprattutto, a vibrare (**buffeting**). Questa vibrazione è causata dal continuo staccarsi e riattaccarsi del flusso d'aria al dorso dell'ala. Il pilota ha quindi il tempo di rimediare dando potenza e diminuendo l'angolo di incidenza dell'aereo. Per concedere al pilota un tempo di reazione più lungo, le ali sono **svergolate**, ovvero sottoposte a torsione durante la

produzione. Lo svergolamento fa sì che l'angolo di incidenza interno dell'ala sia maggiore di quello alla sua estremità. In questo modo lo stallo "inizia" all'interno dell'ala, ma nello stesso momento l'estremità di essa è ancora in grado di produrre portanza.

Se ad entrare in stallo è solo una delle semiali, cosa possibile soprattutto durante le derapate a causa della diversa velocità relativa dell'aria rispetto alle due semiali, si dice che l'aereo entra in **vite**. Una condizione di stallo può inoltre evolversi in un cosiddetto *deep stall* (**stallo profondo**), se i vortici prodotti dalle ali interessano anche l'impennaggio dell'aereo, in particolar modo lo stabilizzatore, rendendolo inutilizzabile (Fig. 23).





Deep Stall condition - T-tail in "shadow" of wing

Per ogni aereo viene dichiarata la velocità di stallo, considerando il peso massimo per il quale quell'aereo è certificato (**MTOW**, *Maximum Take-Off Weight*). Non è permesso alzarsi in volo con un peso superiore a quello massimo dichiarato. Quando l'aereo mantiene una quota costante, avremo

$$P = L = \frac{1}{2}\rho v^2 SC_p \quad [12]$$

e quindi

$$P = L = kv^2C_n \quad [13]$$

Essendo P costante, avremo che in corrispondenza dell'angolo di incidenza critico, ovvero con C_p massimo, v è minima, e il suo valore corrisponderà a

$$v_s = \sqrt{\frac{2P_{max}}{\rho S C_{p max}}} \quad [14]$$

Nei grandi liners la situazione è più complessa, poiché questo calcolo include anche l'utilizzo degli ipersostentatori nelle loro diverse estensioni e configurazioni, che introducono quindi una variazione più o meno marcata nei termini S e C_p dell'equazione.

La resistenza (D)

RESISTENZA DI ATTRITO

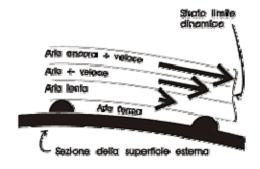


Fig. 24

La resistenza è la componente della reazione aerodinamica di un oggetto in movimento relativo rispetto ad un fluido parallela e di verso opposto alla direzione del moto. Nel caso degli aeromobili, possiamo identificare tre tipi di resistenza.

La resistenza di attrito (Fig. 24) è causata dalla viscosità dell'aria. Per comprenderla possiamo pensare al concetto di strato limite già enunciato in precedenza (pag. 16); lo

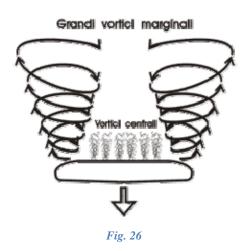
strato d'aria sovrastante avrà una velocità maggiore, quello dopo ancora maggiore, fino a raggiungere la stessa velocità del flusso d'aria libero.



Fig. 25

Resistenza di attrito e **resistenza di forma** (determinata dalla forma dell'ala esposta all'aria, quindi dalla geometria alare e dall'angolo di incidenza, Fig. 25), costituiscono la cosiddetta **resistenza di profilo**, che aumenta all'aumentare della velocità.

RESISTENZA INDOTTA



La **resistenza indotta** (Fig. 26) è una conseguenza della naturale tendenza che ha l'aria a formare vortici in corrispondenza dell'estremità dell'ala, i quali costituiscono una dispersione di energia e quindi una resistenza. Questi vortici vanno a costituire la cosiddetta **turbolenza di scia** di un aereo (*wake turbulence*), motivo per il quale esistono precise regole per la separazione orizzontale degli aeromobili in fase di decollo ed atterraggio in base al loro peso che deve essere garantita dai controllori di volo. La resistenza indotta si può idealmente annullare costruendo un'ala di estensione infinita, e questo è il motivo per il quale gli alianti, che devono ridurre al minimo le resistenze, hanno ali lunghe e sottili (Fig. 27). Essa aumenta con il diminuire della velocità; per questo motivo, nella fase di avvicinamento all'aeroporto

di destinazione, che prevede una velocità molto bassa, è richiesta una grande potenza ai motori dell'aeromobile.



Fig. 27 – L'ala di un aliante

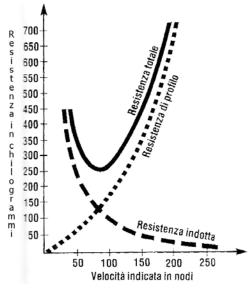
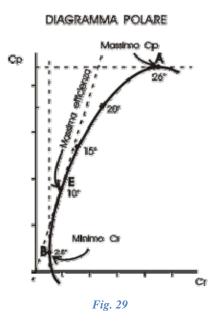


Fig. 28 – L'andamento della resistenza

Considerando gli effetti combinati di questi tre tipi di resistenze, il grafico di Fig. 28 ci illustra l'andamento della resistenza totale al variare della velocità. Notiamo come alle basse velocità prevalga la resistenza indotta, mentre ad alte velocità ci sia principalmente resistenza di profilo; inoltre, non si raggiunge mai lo zero in quanto l'aereo, incontrerà sempre un minimo di resistenza, per quanto bassa possa essere la velocità.

La polare dell'ala



Una volta compresi i coefficienti di portanza e di attrito, è opportuno introdurre una nuova misura, ovvero l'efficienza dell'ala. Essa viene definita come il rapporto tra la portanza e la resistenza generate ad un determinato angolo di incidenza.

$$E = \frac{L}{D} = \frac{C_p}{C_r} \quad [15]$$

Poiché i coefficienti di portanza e resistenza variano in maniera diversa al variare dell'angolo di incidenza, anche l'efficienza dell'ala varierà di conseguenza, secondo un grafico chiamato **polare dell'ala** (Fig. 29).

Dalla polare dell'ala possiamo ottenere valori importanti per le dinamiche di volo, quali l'incidenza di massima portanza, l'incidenza di minima resistenza e l'incidenza di massima efficienza, ottenuta tracciando la tangente alla curva passante per il

centro di origine degli assi.

Generalmente la polare del velivolo corrisponde alla polare dell'ala, ma è leggermente spostata verso destra a causa della maggior resistenza che tutta la fusoliera offre all'aria.

L'efficienza del velivolo precedentemente definita può essere intesa anche come lo spazio che l'aeromobile è in grado di percorrere perdendo un metro di quota e senza essere influenzato da fattori esterne (a motori spenti):

$$E = \frac{L}{D} = \frac{d}{h} \quad [16]$$

dove d è la distanza percorsa e h è la quota persa per percorrere quella distanza. In questo caso si parla più correttamente di **rapporto di planata**. Come si può intuire, questo valore ha un'importanza fondamentale nelle situazioni di emergenza in cui l'aereo non ha più mezzi di propulsione e può contare solo sulla perdita di quota per mantenere una velocità tale da generare

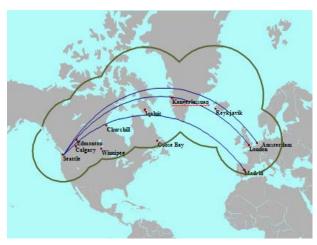


Fig. 30

una portanza sufficiente a rimanere in volo. Nei voli transoceanici ogni aereo ha una determinata certificazione **ETOPS** (Extended-range Twinengine Operational Performance Standards) che indica la distanza massima che l'aereo può mantenere durante il volo dall'aeroporto più vicino in grado di accogliere un eventuale atterraggio di emergenza. Ogni rotta ha un suo valore ETOPS, e un aereo deve essere certificato per quel determinato valore per poterla percorrere. Ad esempio, le rotte dell'Oceano Atlantico del Nord (**NATs**, North Atlantic Tracks), usate per i

voli transoceanici Europa-America, sono generalmente ETOPS-120, ovvero garantiscono la presenza di un aeroporto di emergenza disponibile entro 120 minuti di volo "in planata" da ogni loro punto. Attualmente il limite massimo ammesso è di ETOPS-180. In Fig. 30 è possibile vedere la zona all'interno della quale un aereo che effettua un volo transoceanico deve mantenersi per rispettare le normative ETOPS.

Il principio di Bernoulli

Concludiamo questo capitolo con la dimostrazione del principio di Bernoulli e muoviamo alcune considerazioni sulla sua validità per quanto riguarda la generazione della portanza.

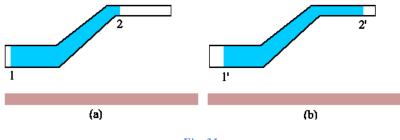


Fig. 31

Consideriamo un fluido ideale incomprimibile che si sta muovendo con moto stazionario (a velocità costante) attraverso una tubatura di sezione e quota variabile (Fig. 31). Chiamiamo 1 e 2 l'inizio e la fine di una determinata porzione di fluido. Dopo un intervallo di tempo Δt si sarà verificato uno spostamento di una certa massa di liquido, e i punti 1 e 2 si saranno spostati rispettivamente in 1' e 2'. Poiché il fluido in questo caso è incomprimibile, possiamo affermare che il volume di liquido che si è spostato equivale a

$$\Delta V = \Delta x_1 A_1 = \Delta x_2 A_2 \quad [17]$$

dove Δx è lo spostamento orizzontale di fluido e A è la sezione della conduttura.

La massa di fluido che nell'intervallo Δt attraversa una qualsiasi sezione trasversale della conduttura sarà quindi

$$\Delta m = \rho \Delta V$$
 [18]

dove ρ è la densità, invariabile, del fluido.

Possiamo calcolare la variazione di energia potenziale e di energia cinetica di questa massa di fluido in movimento:

$$\Delta E_c = \frac{1}{2}v_2^2 \Delta m - \frac{1}{2}v_1^2 \Delta m = \frac{1}{2}\rho \Delta V(v_2^2 - v_1^2) \quad [19]$$

$$\Delta U = mg(h_2 - h_1) = \rho \Delta V g(h_2 - h_1)$$
 [20]

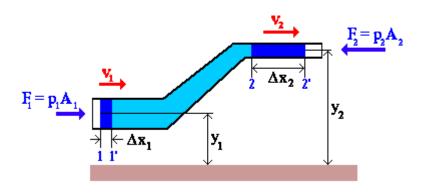


Fig. 32

Abbiamo quindi calcolato la variazione di energia cinetica e di energia potenziale, ma dobbiamo ancora considerare la pressione esercitata dalle porzioni di fluido immediatamente precedenti e successive nella conduttura a quella considerata. Il lavoro esercitato dalle forze generate da queste pressioni nella porzione di fluido da noi presa in considerazione è il seguente.

$$L_1 = F_1 \Delta x_1 = p_1 A_1 \Delta x_1 = p_1 \Delta V \quad [21]$$

$$L_2 = -F_2 \Delta x_2 = -p_2 A_2 \Delta x_2 = -p_2 \Delta V$$
 [22]

Possiamo quindi calcolare il lavoro complessivo eseguito dalle forze generate dalla pressione del liquido a destra e a sinistra della porzione da noi considerata.

$$L_{tot} = L_1 + L_2 = p_1 \Delta V - p_2 \Delta V = (p_1 - p_2) \Delta V$$
 [23]

Dal teorema di conservazione dell'energia cinetica sappiamo che

$$L_{tot} = \Delta U + \Delta E_c$$
 [24]

quindi

$$(p_1 - p_2)\Delta V = \rho \Delta V g(h_2 - h_1) + \frac{1}{2}\rho \Delta V (v_2^2 - v_1^2)$$
 [25]

Dividendo tutto per ΔV e separando gli addendi otteniamo

$$p_1 + \rho g h_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_2 + \rho g h_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2$$
 [26]

Poiché abbiamo preso due punti a caso all'interno della conduttura, abbiamo ragione di pensare che questa legge valga per qualsiasi punto di essa, e quindi possiamo scrivere

$$p + \rho g h + \frac{1}{2} \rho v^2 = costante \quad [27]$$

L'addendo ρgh , indipendente dalla velocità, è detto **pressione statica** ed esiste anche quando il liquido è fermo (da cui deriva la **legge di Stevino** sulla pressione nei vari punti in un fluido).

L'addendo $\frac{1}{2}\rho v^2$ è invece detto **pressione dinamica** e aumenta come la velocità al quadrato.

Per la sua facile comprensione, il principio di Bernoulli viene generalmente utilizzato anche nei manuali di volo per spiegare la generazione della portanza, ma non riesce a spiegare molti aspetti di questo fenomeno. Esso infatti si riferisce ad un fluido ideale privo di resistenza di attrito, ovvero in cui la superficie stessa lungo la quale avviene il movimento è una linea di flusso per il fluido. Ciò non accade nel caso dell'ala dell'aereo poiché, come abbiamo visto, per l'effetto Coanda l'aria rallenta nelle immediate vicinanze della superficie alare, tanto che per una distanza fluido-superficie che tende a zero anche la velocità relativa dell'aria tende a zero. Esso non contempla le variazioni di portanza ottenute variando l'angolo di incidenza, che per assurdo sono le più facili ed immediate da comprendere; non riesce inoltre a spiegare il volo rovesciato e il funzionamento delle ali simmetriche. Inoltre, come abbiamo visto, il principio di Bernoulli necessita di una differenza di velocità tra due flussi di un fluido; generalmente la differenza di velocità dell'aria sopra e sotto l'ala viene giustificata secondo il principio di "maggior distanza da percorrere in tempo uguale". In realtà questa supposizione non ha alcun senso poiché non esistono regole fisiche che impediscano a due particelle d'aria che passano rispettivamente sopra e sotto l'ala di arrivare in fondo all'ala in tempi diversi, e anzi, come è possibile vedere nelle immagini a pagina 16 è proprio questo ciò che accade. Anche le leggi della dinamica contraddicono questo principio: se il flusso d'aria non viene disturbato nel suo complesso dal passaggio dell'ala, significa che complessivamente nessuna forza ha agito sulle molecole d'aria, e di conseguenza non ci può essere portanza.

I TUBI DI PITOT

Principio di funzionamento

I tubi di Pitot (Figg. 33 e 34) sono degli strumenti che ci permettono di misurare la pressione totale e la pressione statica di un fluido in movimento e, per differenza, la pressione dinamica. Sui bimotore essi sono generalmente posti sotto la cabina di comando, in modo che le misurazioni non vengano influenzate da fattori esterni, mentre sui monomotore si trovano generalmente su una semiala.

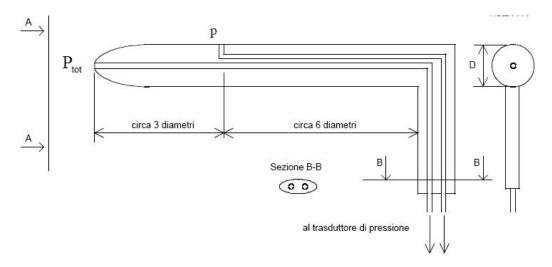


Fig. 33 - Sezione di un tubo di Pitot

Come si può vedere nella figura, essi non sono altro che dei tubicini metallici con due cavità concentriche al loro interno. L'apertura di una di esse è rivolta lateralmente in modo tale che la pressione al suo interno corrisponda alla pressione statica ρgh . La seconda tubatura è invece rivolta in avanti e ci permette di misurare la pressione totale (data dalla pressione statica, sempre presente, e da quella dinamica $\frac{1}{2}\rho v^2$), considerato che in quel punto le molecole vengono completamente fermate.



Fig. 34

Esistono anche tubi di Pitot con un'unica presa dinamica; in questo caso l'aereo è dotato di apposite prese statiche situate lungo la fusoliera dell'aeromobile. Generalmente esse si trovano a coppie, una a destra e l'altra a sinistra rispetto all'asse centrale, in modo da bilanciare eventuali disturbi generati da manovre che cambiano la velocità relativa del vento in maniera diversa a destra e a sinistra (scivolate e derapate).

Anemometro, variometro ed altimetro

Le prese statiche e quelle dinamiche sono in collegate con tre strumenti di bordo: anemometro, variometro ed altimetro. Questi tre strumenti sono chiamati **strumenti a capsula**, poiché al loro interno contengono una **capsula differenziale**, la cui dilatazione dovuta a una differenza di pressione opportuna ci permette di ottenere le informazioni di cui necessitiamo.

La cassa dell'anemometro (Fig. 35) è collegata alla presa statica dell'aeromobile, mentre la capsula è collegata alla presa dinamica. Quando siamo fermi, la pressione statica equivale alla pressione dinamica e l'anemometro è fermo sullo zero. Quando però iniziamo a muoverci, supponendo di rimanere a quota costante, la pressione statica rimane invariata, ma con l'aumentare della velocità aumenta la pressione dinamica. La differenza di pressione che in questo modo si crea tra capsula e cassa dello

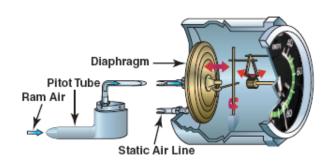


Fig. 35 - Anemometro

strumento provoca una dilatazione della capsula che, misurata da appositi strumenti, viene indicata dalla lancetta dell'anemometro sottoforma di un'indicazione di velocità. L'anemometro (Fig. 36) fornisce in realtà informazioni molto più dettagliate che la mera velocità; è infatti dotato di tacche e strisce colorate che indicano al pilota le prestazioni che quell'aeromobile può raggiungere in determinate condizioni.



Fig. 36 - Anemometro

Per ricavare manualmente il valore della velocità conoscendo pressione statica e pressione totale possiamo svolgere questo semplice calcolo. Sapendo che

$$P_{tot} = P_S + P_D = \rho g h + \frac{1}{2} \rho v^2$$
 [28]

possiamo ricavare

$$v = \sqrt[2]{\frac{2}{\rho}(P_{tot} - \rho gh)} \quad [29]$$

Il variometro (Figg. 37 e 38) misura invece la velocità della variazione dell'altitudine e per funzionare ha bisogno solamente della pressione statica. La presa statica è collegata con la capsula dello strumento, che presenta un foro capillare che permette all'aria di passare dalla capsula alla cassa dello strumento e viceversa. Quando c'è una variazione di quota, ovvero una variazione di pressione statica, la pressione della capsula cambia e l'aria inizierà a uscire o entrare dal foro capillare, fino a portarsi ad una situazione di equilibrio in cui la pressione della capsula è nuovamente uguale a quella della cassa. Per fare un esempio pratico, quando iniziamo a salire la pressione statica inizia a diminuire e l'aria inizia quindi a passare dalla cassa dello strumento

alla capsula, che nel frattempo si sarà contratta per la diminuzione di pressione, attraverso il foro capillare. Questa contrazione della capsula viene rilevata dal variometro, che indicherà un rateo di salita positivo. Se fermiamo la salita la situazione si equilibrerà in pochi secondi, la differenza di pressione tra capsula e cassa ritornerà a zero e il variometro segnerà un rateo di salita nullo. Se invece continuiamo a salire l'aria continuerà a scorrere tra cassa e capsula, ma non si raggiungerà una situazione di equilibrio poiché la pressione statica sarà in costante diminuzione. Una delle maggiori limitazioni del variometro è data dal suo tempo di risposta elevato, dai 6 ai 9 secondi.

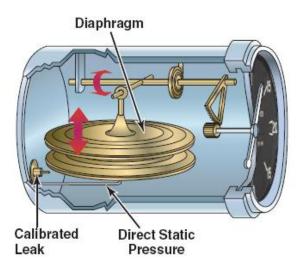


Fig. 37 - Variometro



Fig. 38 - Variometro

Anche l'**altimetro** (Fig. 39) ha bisogno solamente della pressione statica per funzionare, che viene trasmessa alla cassa dello strumento, mentre la capsula è sigillata e a pressione costante. Al variare della quota e quindi della pressione statica, la capsula si dilata o si contrae a seconda della differenza di pressione e l'altimetro rileva la contrazione indicandola al pilota sottoforma di un'indicazione di quota (Fig. 40).

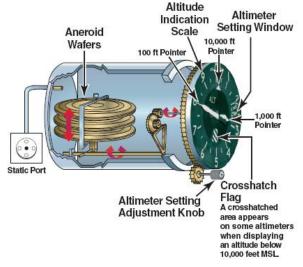


Fig. 39 - Altimetro



Fig. 40 - Altimetro

In Fig. 41 è raffigurato uno schemino riassuntivo di quanto appena spiegato. E' da notare la presenza, in questo caso, di una porta statica separata da quella dinamica, nonché di una porta statica di emergenza e di un apparato per il riscaldamento del tubo di Pitot che serve per evitare che su di esso si formi del ghiaccio che lo ostruirebbe ostacolandone il funzionamento.

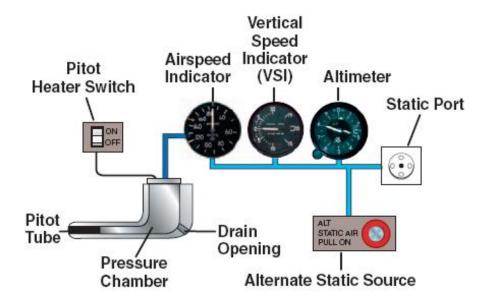


Fig. 41 - Gruppo statico

Affidabilità degli altimetri e spazio aereo RVSM

Grazie all'elevata precisione raggiunta oggi dagli altimetri di cui sono dotati gli aeromobili, la separazione verticale tra gli aerei in crociera nello spazio aereo di molti Paesi è regolamentato secondo lo standard **RVSM** (*Reduced Vertical Separation Minima*, minime di separazioni verticali ridotte). Esso venne introdotto per la prima volta negli anni Settanta a causa della saturazione dello spazio aereo sopra l'oceano Atlantico che, essendo privo di controllo

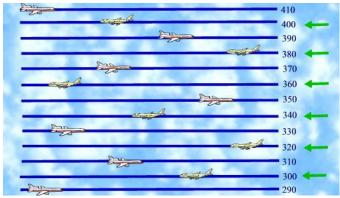


Fig. 42 – Rotte aeree RVSM

radar, e quindi caratterizzato da un controllo del traffico aereo di tipo procedurale, aveva bisogno di separazioni orizzontali molto elevate. Con lo standard RVSM si ridusse la separazione verticale minima da 2000 a 1000 piedi; in seguito questo standard si è diffuso ed è stato adottato dalla maggior parte dei Paesi, tranne Africa e Asia (solo al di sopra dell'Himalaya), il cui spazio aereo è ancora non-RVSM. In Fig. 42 è possibile vedere una rappresentazione grafica dello spazio aereo RVSM; le frecce verdi a destra rappresentano invece le quote alle quali gli aerei possono volare in uno spazio aereo non-RVSM. Un'altra cosa da notare è che come si vede dalla figura, ai fini della separazione tra aeromobili la quota dipende anche dalla direzione di volo. Come principio generale a livello europeo, aerei che si dirigono verso Est mantengono livelli di volo dispari (ad esempio FL330, 33000 piedi), mentre quelli diretti verso Ovest mantengono livelli di volo pari (ad esempio

FL340, 34000 piedi); in Italia e in pochi altri Paesi questa regola si applica allo stesso modo, ma prendendo in considerazione rispettivamente il Sud e il Nord, poiché la maggior parte dei traffici è orientata secondo questa direttrice. Ovviamente questa regola vale solo in uno spazio aereo RVSM, poiché altrimenti i livelli disponibili sarebbero solamente quelli pari e non quelli dispari; avremmo quindi una separazione di ben 4000 piedi, anziché 2000, tra i traffici che sono diretti nella stessa direzione.

Il problema della misurazione dell'altitudine

E' facile rendersi conto di quali siano le limitazioni dell'altimetro. Poiché la pressione atmosferica è variabile, un altimetro potrebbe indicarci, nello stesso luogo, quote diverse in giorni con pressione atmosferica diversa. Se il giorno successivo alla misurazione la pressione atmosferica si fosse abbassata, sullo strumento leggeremmo una quota superiore, nonostante noi non ci siamo mossi. Questo è perché l'altimetro misura una differenza di pressione, ma non è in grado di distinguere se essa sia generata da una variazione della pressione atmosferica o da un'effettiva variazione di quota. Per questo motivo, prima di iniziare ogni volo è necessario tarare l'altimetro secondo la pressione atmosferica locale, in modo che indichi l'altitudine effettiva sul livello del mare anche se non siamo in condizioni atmosferiche standard. Per fare questo è necessario conoscere la pressione atmosferica locale in millimetri di mercurio (mmHg) o in ettopascal (hPa). Questa informazione è fornita dalle autorità aeroportuali tramite le informazioni meteorologiche che ogni aeroporto pubblica e aggiorna periodicamente (METAR, METeorologiacl Aerodrome Report) e che è necessario ricevere e decifrare. Un esempio di METAR è il seguente.

LIPB 242050Z 35006KT CAVOK 06/M08 Q1022

La sua decifrazione ci fornisce le seguenti informazioni: si tratta del METAR dell'aeroporto di Bolzano (*LIPB*), del giorno 24 del mese corrente, aggiornato alle ore 2050Z (o 2050 GMT o UTC, corrispondenti alle 21.50 o 22.50 locali, a seconda del periodo dell'anno), vento proveniente da 350 a 6 nodi, condizioni del cielo *CAVOK* (assenza di nubi e visibilità orizzontale superiore ai 10 km), temperatura 6°C, punto di rugiada -8°C, QNH 1022.

L'informazione di cui abbiamo bisogno è proprio il QNH, in questo caso 102,2 hPa, che andremo ad impostare sull'altimetro. Il QNH è una dei tanti "codici Q", abbreviazioni introdotte dal governo inglese all'inizio del ventesimo secolo usate in ambito radiofonico; esso è definito come la pressione atmosferica dell'aeroporto sul livello del mare, e quando lo impostiamo l'altimetro ci restituisce la nostra altitudine sul livello del mare. Se invece impostiamo il QFE, sullo strumento possiamo leggere la nostra altitudine rispetto alla superficie isobarica che include l'aeroporto prescelto; più semplicemente, ci indicherebbe quanto siamo alti rispetto alla pista di atterraggio. Ciò si può fare solamente nel caso in cui a bordo siano presenti due altimetri, in quanto uno deve essere obbligatoriamente impostato sul QNH locale.

Questo ragionamento ci porta però ad un altro problema relativo alla misurazione della quota. Si capisce infatti che sarebbe estremamente scomodo per ogni pilota dover continuamente tarare l'altimetro in base alla pressione atmosferica locale della zona che si sta sorvolando. Per questo motivo al di sopra di una quota detta **altitudine di transizione** (*transition altitude*, per gli aerei in salita, fissa per ogni aeroporto) o **livello di transizione** (*transition level*, per gli aerei in discesa, variabile a seconda della pressione locale ma comunque superiore all'altitudine di transizione)

l'altimetro deve essere impostato sulla pressione standard (QNE) di 101,3 hPa o 29,92 mmHg. Questa sfasatura tra altitudine e livello di transizione, detta *transition layer*, è dovuta al fatto che un aereo in discesa verso una zona di bassa pressione dovrebbe impostare il proprio altimetro su valori di QNH molto bassi, con il rischio di "saltare" una determinata fascia di altitudini, con tutti i pericoli

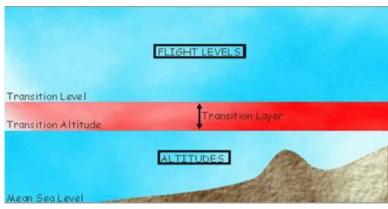


Fig. 43

che ne conseguono. Il *transition layer*, che aumenta con il diminuire della pressione atmosferica secondo regole prestabilite, permette invece di avere un "cuscinetto" per arginare questo fenomeno (Fig. 43).

Misurazione della temperatura esterna

Simile al tubo di Pitot è la sonda del termometro di bordo, che misura la temperatura dell'aria all'esterno dell'aeromobile. Essa è un valore importante per svariati motivi, tra cui il calcolo delle probabilità di formazione di ghiaccio sulle ali o delle performance dei motori durante il decollo o in caso di riattaccata.

Nella misurazione della temperatura bisogna tenere però in considerazione il riscaldamento adiabatico dell'aria dovuto all'aumento di pressione nelle immediate vicinanze della sonda del termometro a causa dell'elevata velocità dell'aeromobile. Alla temperatura rilevata dalla sonda (**OAT**, *Outside Air Temperature*) va quindi sottratto un determinato valore dipendente dalla velocità e ricavabile da apposite tabelle (**TR**, *Temperature Rise*), in modo da ottenere l'effettiva temperatura dell'aria circostante (**SAT**, *Static Air Temperature*).

LA BUSSOLA MAGNETICA

Principi di funzionamento

La bussola magnetica è lo strumento di bordo che fornisce informazioni sull'orientamento dell'aeromobile sfruttando il campo magnetico terrestre (Fig. 44). Nonostante per il pilota il principale strumento per quanto riguarda la posizione e l'orientamento sia la girobussola (vedi pag. 42) per l'accuratezza delle indicazioni fornite, la bussola magnetica conserva il suo ruolo fondamentale poiché permette di controllare il funzionamento e riallineare le piattaforme giroscopiche soggette alla precessione. Esistono svariate teorie sulla generazione del campo magnetico terrestre; in linea generale esso viene

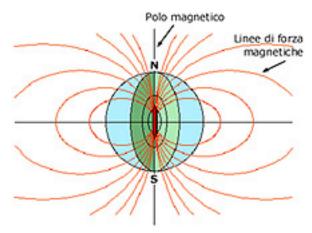


Fig. 44 - Campo magnetico terrestre

ricondotto alla composizione interna della Terra e ad una corrente elettrica autogenerata da campi magnetici all'interno di essa. Il polo Nord magnetico è spostato rispetto al polo Nord geografico, così come il polo Sud; essi non sono punti antipodali della superficie terrestre poiché la loro congiungente non passa per il centro della Terra ma a circa 1200 km di distanza da esso.



Fig. 45 – Bussola magnetica

La bussola (Fig. 45) consiste in un ago magnetizzato libero di ruotare intorno ad un perno: si tratta di un magnete permanente, in modo che possa conservare la magnetizzazione anche a seguito di forti urti. Come ogni magnete, è dotata di un

polo Nord e di un polo Sud, che vengono attratti rispettivamente dai poli magnetici Sud e Nord della Terra. Quindi il polo Nord del

nostro ago magnetico si orienterà verso il polo Sud magnetico della Terra, che corrisponde al polo Nord geografico. Analogamente, il polo S del magnete si orienterà verso il polo Nord magnetico della Terra, corrispondente al polo Sud geografico.

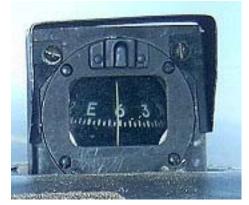


Fig. 46 – Bussola magnetica di un aereo

In Fig. 46 è raffigurata una bussola aeronautica, visibilmente differente dalle bussole "classiche", ma basata sullo stesso principio.

L'invenzione della bussola magnetica

Prima dell'invenzione della bussola magnetica i riferimenti che si avevano per la navigazione erano principalmente di natura visiva, inclusi gli astri celesti. E' infatti possibile orientarsi mediante le stelle: la Stella Polare indica il Nord nell'emisfero boreale, la stella σ Octantis della costellazione dell'Ottante oppure la costellazione della Croce del Sud permettono di individuare il Sud nell'emisfero australe; Ovest ed Est possono essere ricavati di conseguenza. Avendo un orologio regolato sull'ora locale, si può determinare il Sud sapendo che a mezzogiorno il Sole culmina sul meridiano del luogo sempre spostato verso Sud se ci si trova nell'emisfero boreale sopra il tropico del Cancro, oppure verso Nord se ci si trova nell'emisfero australe sotto il tropico del Capricorno. Nella zona tra i due tropici, a mezzogiorno il Sole può trovarsi sia a Nord che a Sud, a seconda della stagione, o esattamente allo zenit.

Possiamo trovare i primi esempi di bussola in Cina: essi risalgono all'inizio del primo millennio, nonostante i fenomeni relativi al magnetismo fossero stati osservati già da molto tempo, e si trattava essenzialmente di pezzi di magnetite liberi di galleggiare in acqua, che venivano utilizzati per la costruzione delle città coerentemente ai principi di armonia del *feng shui*. Il dibattito sull'invenzione della bussola è ancora aperto. Per come la conosciamo noi, comparve per la prima volta in Cina all'inizio del XII secolo; secondo alcuni venne poi portata verso Est fino a raggiungere l'Europa, ma altri sostengono invece che in Europa, dove comparve per la prima volta nel 1190, fosse stata inventata indipendentemente.

Errori di misurazione

Esistono diversi errori a cui sono soggette le bussole magnetiche, che contribuiscono a rendere la girobussola lo strumento di riferimento per il pilota. Il primo "errore" da prendere in considerazione è il fatto che il polo Nord geografico non coincide con il polo Nord magnetico; la differenza angolare tra questi due punti cambia a seconda del luogo e con il passare del tempo. Essendo questo un errore sistematico e quindi ricorrente, è possibile consultare apposite tabelle che forniscono l'angolo di correzione, detto **declinazione magnetica**, valido per un certo periodo di tempo a seconda della zona. Per misurare

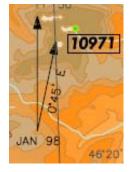


Fig. 47

Fig. 48 – Valori della declinazione magnetica nel 2000

declinazione magnetica, bisogna misurare semplicemente l'angolo che si forma tra la direzione indicata dalla bussola magnetica e il meridiano che passa per quel luogo (questo presuppone, ovviamente, di conoscere già la posizione del polo Nord geografico).

la

La declinazione magnetica corrente e la sua variazione annuale sono riportate su ogni carta aeronautica. In Fig. 47 sono riportate le indicazioni fornite per quanto riguarda l'aeroporto di Bolzano; possiamo vedere che le prue magnetiche delle cartine sono aggiornate

manualmente

al gennaio 1998 e che la variazione ammonta, nel caso di Bolzano, a 45' verso Est ogni anno. Per l'aeroporto di Fiumicino la declinazione magnetica varia di soli 6' verso Est all'anno. In Fig. 48 è invece riportata la declinazione magnetica su tutto il globo nel 2000.

Un altro errore a cui sono soggette le bussole magnetiche è l'influenza da parte di campi magnetici diversi da quello terrestre. Soprattutto nell'abitacolo di un aeromobile, dove abbondano le apparecchiature elettriche, questo errore potrebbe essere particolarmente accentuato e pericoloso. Possiamo considerare anche questo un errore sistematico in un certo senso, poiché un volta posizionata la bussola all'interno dell'abitacolo è possibile misurare i disturbi a cui è sottoposta e correggerli manualmente. La bussola si orienterà secondo le nuove linee forza del campo, indicando una direzione che prende il nome di Nord bussola, diversa dal Nord magnetico. Mediante una complicata procedura che prevede il volo in vari assetti e direzioni, è possibile attenuare questo errore mediante due magnetini di compensazione che, regolati attraverso viti che li avvicinano o li allontanano dall'ago, modificano il campo magnetico che agisce sulla bussola. Tuttavia non è possibile eliminare completamente questo tipo di errore e ciò che rimane di esso prende il nome di deviazione residua. I valori di deviazione residua, che variano al variare dell'orientamento dell'aeromobile e in minima parte anche con la latitudine, vengono registrati su un'apposita tabella visibile nella cabina di pilotaggio e immediatamente consultabile dal pilota in caso di necessità. L'operazione di calibrazione dei magnetini di compensazione va eseguita periodicamente e ripetuta ogni volta che viene installato un nuovo apparato in cabina.

Una terza limitazione deriva dalla cosiddetta inclinazione magnetica. Come si può vedere nella Fig. 44, le linee di forza del campo magnetico terrestre sono parallele al terreno solo all'equatore, e diventano progressivamente più inclinate rispetto ad esso con l'aumentare della latitudine fino ad essere pressoché perpendicolari al terreno in corrispondenza di ciascun polo magnetico. Come sappiamo, l'ago della bussola tende ad orientarsi secondo le linee di forza, quindi non solo secondo la sua componente orizzontale, ma anche secondo quella verticale. L'angolo che l'ago tende a formare spostandosi verticalmente rispetto all'orizzonte prende il nome di **inclinazione magnetica**. Con l'aumentare della latitudine aumenta l'inclinazione magnetica ed allo stesso tempo diminuisce la componente orizzontale dei vettori del campo magnetico, fino a che la bussola diventa completamente inservibile nelle vicinanze dei Poli. L'inclinazione magnetica è responsabile di indicazioni errate anche durante le virate: finché si è in volo orizzontale, la bussola è soggetta solamente alla componente orizzontale del campo magnetico, essendo libera di ruotare mantenendosi però su un piano orizzontale. Quando l'aereo inizia una virata però, questa condizione viene meno e l'inclinazione magnetica fa ruotare la bussola alterando le informazioni fornite al pilota. Al termine della virata, viene ripristinata la situazione originaria.

DETERMINAZIONE DELLA POSIZIONE DI UN AEROMOBILE

Rilevamento di posizione mediante l'uso di VOR e NDB

Il **rilevamento** della posizione consiste nell'utilizzo di stazioni radio a terra, il cui segnale viene captato dagli strumenti di bordo, che determinano in seguito la propria posizione relativamente a queste stazioni. Un'ulteriore informazione ci è data dall'apparato DME, se presente, che ci permette di conoscere la nostra distanza dal punto in cui è installato. Una navigazione basata su questi principi prende il nome di **radionavigazione**.

Il **VOR** (*VHF Omnidirectional Range*, Fig. 49) è un apparato radio che emette due segnali in tutte le direzioni che dal 1949 è lo standard per la radionavigazione a corto e medio raggio. La trasmissione avviene su frequenze medio-alte (in VHF dai 108 ai 117.95 MHz, con l'eccezione di determinate frequenze, lasciate libere per gli impianti di avvicinamento ILS). A seconda del range di frequenze utilizzate e dalla potenza di emissione, che va dai 50 ai 200 watt, le stazioni VOR si distinguono in HVOR per lo spazio aereo superiore, LVOR per lo spazio aereo



Fig. 49 – Stazione VOR

inferiore o TVOR per le procedure di avvicinamento strumentale. Le alte frequenze alle quali operano i VOR garantiscono un segnale poco disturbato, al contrario degli NDB che operano a basse frequenze, ma necessitano di una congiungente emittente-ricevente libera da ostacoli a causa della lunghezza d'onda ridotta.

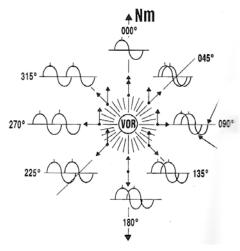


Fig. 50 - Funzionamento di un VOR

Il primo segnale emesso dalla stazione è uguale in tutte le è per direzioni ed modulato in AMtrasmettere l'identificativo Morse della stazione ai fini dell'identificazione da parte del pilota e in FM su una portante di 9960 Hz. Il secondo segnale, anch'esso avente una frequenza di 30 Hz, viene invece emesso da un'antenna rotante a 1800 giri/min, avente quindi anch'essa una frequenza di rotazione di 30 Hz. In questo modo, come si vede in Fig. 50, il segnale secondario è sfasato rispetto al primo di un valore variabile a seconda della direzione in cui viene emesso (in corrispondenza del Nord i segnali saranno in fase, a Sud in controfase e nelle altre posizioni avranno uno sfasamento intermedio). La stazione ricevente, in

questo caso gli apparati radio di un aeromobile, è quindi in grado di calcolare la radiale VOR sulla

quale è posizionata misurando lo sfasamento di questi due segnali. A questo segnale possono associarsi le informazioni ricevute da un'eventuale stazione DME associata al VOR, che permette di misurare con esattezza la distanza da esso. In realtà il segnale secondario non è emesso da un'antenna rotante come un tempo, bensì da una serie di antenne direzionali fisse controllate elettronicamente. Ogni stazione VOR è dotata di un codice identificativo a tre lettere ed emette un segnale Morse per l'identificazione univoca della stazione, nonché, talvolta, informazioni meteorologiche riguardanti la zona interessata. Nel caso di Bolzano è presente un VOR/DME (OZE) situato a Sud-Sudovest dell'aeroporto all'altezza di Bronzolo, che emette sulla frequenza 117.05, utilizzato esclusivamente per le procedure locali di avvicinamento e partenza e non per la navigazione di rotta (è quindi un TVOR). In Fig. 51 sono riportate tutte le stazioni VOR/DME della Germania.



Fig. 51 - I VOR in Germania

L'**NDB** (*Non Directional Beacon*, Fig. 52) è invece un radioaiuto caratterizzato dall'emissione di un segnale uniforme che, a differenza di quello emesso dal VOR, è uguale in tutte le direzioni. La potenza di emissione varia da meno di 50 a 2000 watt a seconda dell'utilizzo previsto, e le frequenze utilizzate sono medio-basse, dai 190 ai 1750 KHz. Ciò comporta il vantaggio di avere un segnale soddisfacente anche quando ci sono ostacoli sulla congiungente aereo-stazione, ma è soggetto a molti altri disturbi tra i quali citiamo i fulmini, l'effetto notte, suolo e costa, in quanto

La fisica del volo



tutti e tre alterano in qualche modo il segnale provocando oscillazioni dello stesso. Per questi motivi l'NDB è un segnale usato molto raramente come ausilio alla navigazione di rotta, mentre mantiene ancora un discreto utilizzo per le procedure locali quali avvicinamenti e partenze. La loro portata nominale massima è di 75 miglia nautiche, ma generalmente è molto superiore e può raggiungere addirittura le 300 miglia.

Come il VOR, anche il segnale NDB porta con sé il proprio identificativo, che generalmente è di tre lettere ma può essere anche di due o di

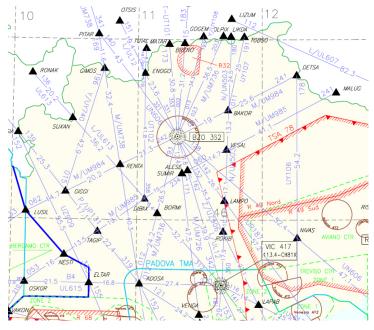
una sola lettera nel caso di NDB a bassissima potenza utilizzati come indicatori di posizione negli avvicinamenti strumentali ILS (nel qual caso prendono il nome di **locators**). L'identificativo della stazione NDB è codificato in Morse secondo lo standard A1A (interruzione del segnale principale per definire la serie di punti e linee che ci indicano il nominativo) o A2A (modulazione AM del segnale principale, usata generalmente solo per emittenti a bassa potenza). L'identificativo della stazione viene trasmesso una o due volte al minuto in modalità A1A e otto volte al minuto in A2A.



Il segnale NDB viene ricevuto dal radiogoniometro di bordo, detto **ADF** (*Automatic Direction Finder*, Fig. 53). Questo apparato può essere sintonizzato però su frequenze molto maggiori, fino a 1999 KHz. In questo modo si possono captare anche i segnali delle stazioni radio AM commerciali, ricevibili a distanza elevate a causa della loro grande potenza, cosa che può risultare utile in zone dove la presenza di radioaiuti è scarsa. Ad esempio, sintonizzandosi sulla stazione AM RAI di

dall'ADF Milano, otteniamo posizione un'indicazione della della stazione emittente e quindi della città. E' anche vero il contrario, cioè che se abbiamo una radio AMche sintonizzarsi su valori un po' più bassi di quelli normalmente utilizzati dalla radio commerciale, possiamo ricevere il segnale emesso da alcuni NDB.

La Fig. 54 è una parte di una cartina di rotta della FIR di Padova, dove è possibile distinguere l'NDB di Bolzano (BZO), operante alla frequenza di 362 KHz. Esso è situato nella parte militare dell'aeroporto,



viene utilizzato prevalentemente per la navigazione di rotta, ed è un nodo fondamentale per le aerovie che dal Nord-Est Italia si dirigono a Nord, soprattutto per quanto riguarda le partenze da Venezia verso Nord, gli arrivi ad Innsbruck e a Monaco da Sud e per i voli che provenendo dall'Adriatico proseguono per l'Europa centrale.

Funzionamento del DME

Il **DME** (*Distance Measuring Equipment*, equipaggiamento per la misurazione della distanza) permette al pilota di determinare con esattezza la distanza tra l'aeromobile e la stazione a terra. Il sistema funziona a frequenze molto alte (UHF dai 960 ai 1150 MHz). Il principio di funzionamento è molto semplice: l'aereo invia tramite un'antenna direzionale posizionata sul ventre coppie di impulsi a determinati intervalli di tempo che, una volta ricevuti dalla stazione di terra, vengono rimandati indietro da un'antenna omnidirezionale con un ritardo di 50 μs. La ricevente dell'aereo analizza tutti i dati che riceve, isolando quelli che corrispondono alla sequenza di impulsi da lei trasmessi in precedenza; in questo modo, tra tutti gli impulsi di risposta trasmessi dalla stazione a terra, si isolano quelli per un determinato aeromobile. Conoscendo la velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche nell'aria, pari alla velocità della luce (6,15 μs per miglio nautico), gli apparati di bordo sono in grado di determinare la distanza tra le due stazioni misurando il tempo trascorso dalla trasmissione del segnale e la ricezione del segnale di risposta, tenendo anche conto dei 50 μs di ritardo della stazione a terra. Generalmente una stazione NDB è in grado di gestire contemporaneamente dai 100 ai 200 aerei; nel caso questa cifra venga superata viene automaticamente diminuita la potenza del ricevitore, in modo da ignorare gli aerei più distanti.

Bisogna però sottolineare che il DME misura la lunghezza della congiungente aereo-stazione, che non corrisponde alla distanza a terra tra l'aeromobile e l'emittente. Questo errore si ritiene trascurabile per distanze elevate dalla stazione o quando si vola a basse quote (in linea generale, si può trascurare quando la distanza misurata espressa in miglia non è inferiore alla quota espressa in migliaia di piedi), e diventa massimo quando si sorvola la stazione di terra, nel qual caso la distanza misurata corrisponderà esattamente alla quota dell'aereo, anche se esso si trova in corrispondenza della stazione.

Molto spesso di DME possono essere associati ai VOR e l'ADF, dopo aver sintonizzato la radio di navigazione sulla frequenza del VOR, è generalmente in grado di sintonizzarsi da solo sulla frequenza del DME corrispondente. Tra i dati ricavabili dagli apparati DME e automaticamente calcolati dagli apparati di bordo di Fig. 42, ci sono inoltre la velocità di avvicinamento od allontanamento da quella stazione e il tempo di raggiungimento della stessa.

Stima della posizione ed incertezza

La **stima** della posizione si basa sulla conoscenza della propria posizione iniziale e sulla velocità e prua mantenute per un intervallo di tempo definito in allontanamento da quella posizione. E' un metodo che introduce delle incertezze notevoli, ma che è indispensabile usare in assenza di altri riferimenti.

Convenzionalmente, l'incertezza introdotta da questo metodo di misura della posizione viene quantificata nel seguente modo: dopo ogni ora di navigazione si ha il 90% di probabilità di trovarsi all'interno di un cerchio con un raggio di 20 miglia nautiche più l'1% della distanza percorsa

costruito intorno alla posizione stimata, e il 50% di probabilità di trovarsi in un cerchio di raggio pari ad un terzo del precedente, ma mai inferiore alle 8 miglia nautiche (Fig. 55). Ad esempio, un aereo che viaggia per un'ora alla velocità di 150 nodi (miglia orarie) avrà il 90% di possibilità di trovarsi all'interno di un cerchio di 21,5 miglia di raggio costruito intorno alla posizione stimata moltiplicando la velocità per il tempo di percorrenza, e una possibilità su due di trovarsi in un cerchio con lo stesso centro ma di raggio pari a 8 miglia.

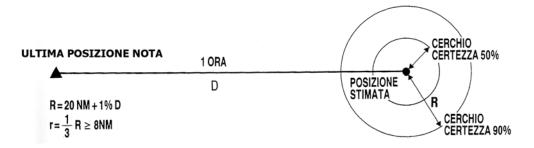


Fig. 55 – Incertezza della posizione stimata

Le piattaforme inerziali

Le piattaforme inerziali sono dei **giroscopi** che misurano tutte le accelerazioni a cui il velivolo è sottoposto durante il volo e ci permettono in questo modo di ricavare la nostra posizione e mantenerla costantemente aggiornata.

Un giroscopio (Fig. 56) è costituito essenzialmente da un massa rotante ad elevata velocità (nel caso degli aerei si parla di almeno 20.000 giri al minuto) che, attraverso un sistema di anelli, ha tre gradi di liberta, ovvero è libero di ruotare intorno a tutti e tre gli assi ortogonali dello spazio. Essendo la massa in rotazione molto grande e le giunture a bassissimo attrito, avrà una sua inerzia particolarmente accentuata, ovvero tenderà a rimanere sempre nella stessa posizione a prescindere da come noi posizioniamo il giroscopio, in base al principio di conservazione del momento angolare $\bar{r} \times \overline{mv}$.

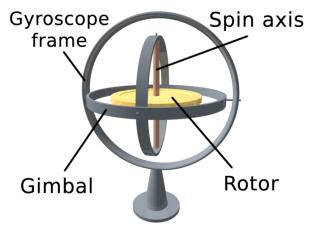


Fig. 56 – Il giroscopio



Fig. 57 – Il Navigation Display

Per potere usufruire delle informazioni forniteci dalle piattaforme inerziali, è necessario procedere al cosiddetto allineamento delle piattaforme inerziali prima dell'inizio di ogni volo, la cui durata varia a seconda della latitudine. Esso prevede la messa in moto delle masse dei giroscopi attraverso getti di aria od elettricamente. Questo doppio sistema deriva dall'assoluta necessità delle piattaforme inerziali ai fini del volo strumentale, poiché su di essi si basano gli indicatori di prua, di virata e di assetto. L'allineamento delle piattaforme inerziali prevede inoltre di indicare al computer di bordo la propria posizione di partenza sottoforma di coordinate geografiche ottenute tramite il GPS

oppure dalle cartine aeroportuali. Dopodiché ogni movimento dell'aereo lungo i tre assi verrà rilevato dai giroscopi e tradotto in una variazione di posizione che il pilota può visualizzare sul navigation display di bordo. Sul **navigation display** (Fig. 57), oltre alla propria posizione, è possibile visualizzare un'infinità di altri dati, tra cui intersezioni, VOR, NDB e aerovie nelle



Fig. 59 – La girobussola

vicinanze, la rotta impostata nel computer di bordo, valori riguardanti la velocità del vento e quella dell'aeromobile, le frequenze impostate sulle radio di navigazione, i dati rilevati dal radar meteorologico e molto altro.



Fig. 58 – L'orizzonte artificiale

I tre tipici strumenti di bordo che si basano su un giroscopio per fornire le informazioni necessarie al pilota sono l'orizzonte artificiale (Fig. 58), la girobussola (Fig. 59) e il vibrosbandometro.

La forza di Coriolis

Esiste tuttavia un fenomeno di cui le piattaforme inerziali, per la loro stessa natura, non possono tenere conto: la diversa velocità lineare con cui si muove la superficie terrestre alle diverse latitudini. Questo valore viene calcolato automaticamente dal computer di bordo, che corregge i dati forniti dai giroscopi prima di restituirli al pilota, oppure deve essere corretto manualmente dal pilota eseguendo frequenti controlli incrociati tra girobussola e bussola magnetica.

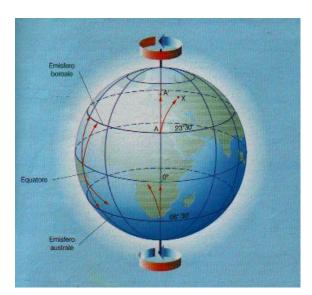
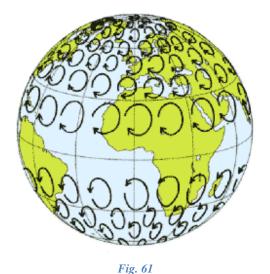


Fig. 60 – La legge di Ferrel

Questo fenomeno, spiegato dalla **legge di Ferrel**, prevede che, essendo la velocità angolare di rotazione intorno al proprio asse uguale per tutta la Terra ed essendo la distanza della superficie terrestre dal centro del pianeta variabile, con l'aumentare della latitudine diminuisca anche la velocità lineare con cui si muovono i punti che si trovano sulla superficie terrestre. I problemi nascono quando abbiamo un oggetto in movimento; esso tenderà a conservare, per inerzia, la velocità con cui è partito. Quindi, supponendo che esso parta dall'equatore e sia diretto verso Nord, conserverà nel proprio moto la velocità che ha preso alla partenza dall'equatore; ma, poiché la Terra sotto di lui si muoverà sempre più lentamente, il nostro oggetto sarà "in anticipo"

rispetto alla superficie sottostante. Quindi, prendendo come sistema di riferimento la superficie terrestre, ovvero quello a cui noi ci riferiamo normalmente, l'oggetto seguirà una traiettoria



apparentemente curva. Questa deviazione è verso destra rispetto alla direzione del moto nell'emisfero boreale, verso sinistra nell'emisfero australe (Fig. 60).

I problemi nascono quindi dal fatto che noi, sulla Terra, prendiamo come sistema di riferimento la superficie terrestre, che però non costituisce un sistema di riferimento inerziale, in quanto essa è in movimento. Per quantificare questo fenomeno è stato quindi necessario introdurre una forza apparente, analogamente a quanto viene fatto con la forza centrifuga, la **forza di Coriolis**, che equivale a

$$\bar{F} = 2m(\bar{v} \times \bar{\omega}) \quad [30]$$

$$F = 2mv\omega|\sin\alpha|$$
 [31]

dove m è la massa del corpo in movimento, v la sua velocità, ω la velocità angolare della Terra misurata rispetto ad un sistema di riferimento inerziale, e α la latitudine, ovvero l'angolo che si forma tra l'asse di rotazione della Terra e la velocità del corpo in movimento.

La legge di Ferrel è importante anche per quanto riguarda la meteorologia, in quanto governa il comportamento delle masse d'aria che sono libere di muoversi per inerzia nell'atmosfera terrestre. Poiché, come detto sopra, la Terra non è un sistema di riferimento inerziale, esse non seguiranno una traiettoria rettilinea come previsto dal primo principio della



Fig. 62

dinamica, ma seguiranno traiettorie circolari determinate proprio dalla forza di Coriolis (Figg. 61 e 62).

Principi di funzionamento del GPS

Un altro metodo per determinare la propria posizione, sempre più diffuso al giorno d'oggi anche nei piccoli aerei da turismo per la sua economicità, è il **GPS** (*Global Positioning System*). Questo sistema, nato in America per scopi militari e poi reso disponibile anche ai civili, seppur con una risoluzione inferiore, si basa su 24 satelliti, di cui tre di riserva, in orbita intorno alla Terra ad una quota di 20169 km. Essi percorrono la propria orbita in poco meno di 12 ore e sono dotati di due pannelli solari da 400 watt. Sono disposti in modo tale che da qualsiasi punto della Terra siano sempre reperibili sei o più satelliti.

Il GPS, al contrario del DME, è un sistema definito passivo, poiché si basa sull'emissione continua di un segnale, quindi non su una richiesta da parte della stazione ricevente. Il GPS ci fornisce la posizione sottoforma di tre coordinate: latitudine, longitudine e quota sul livello medio del mare. Ai fini della determinazione della posizione è quindi necessario collegarsi con almeno tre satelliti. Il

calcolo della distanza si basa sulla misurazione del tempo trascorso tra la partenza del segnale dal satellite e la sua ricezione. Data l'elevata velocità delle radiazioni elettromagnetiche, è di fondamentale importanza avere degli orologi molto precisi per ridurre al minimo l'incertezza sulla misurazione della distanza; essi devono avere una precisione di $10^{-13} s/s$, ovvero non possono sbagliare di più di 0,003 secondi ogni mille anni. Per questo motivo ogni satellite è dotato di ben quattro orologi atomici di ultima generazione. Per ovvi motivi non è possibile avere un orologio atomico in ogni ricevente, che invece è dotata di un più impreciso orologio al quarzo; per rimediare all'incertezza che potrebbe nascere da ciò, è necessario collegarsi anche con un quarto satellite.

AEROPITTURA E FUTURISMO

Le avanguardie del 900 ed il Futurismo

Il Futurismo è un'avanguardia storica di origini completamente italiane. Nacque ufficialmente nel 1909, quando Marinetti ne presentò, a Parigi, il manifesto, e ben presto si diffuse a livello europeo, coinvolgendo diversi ambiti artistici, in particolar modo la letteratura e la pittura.

Elemento chiave del Futurismo è l'elogio della **modernità** e dello sviluppo. I cambiamenti che si erano verificati nella società alla fine del XIX secolo, che portarono tra l'altro alla nascita della società di massa, avevano suscitato reazioni diverse negli ambienti culturali dell'epoca. Alcuni, i crepuscolari ad esempio, rifiutavano questo cambiamento così radicale ed improvviso, giudicavano corrotti i valori che tendevano ad affermarsi e si rifugiarono in un mondo ancora immune da queste novità, il mondo rurale. Altri invece, i futuristi, ne rimasero esaltati e non esitarono a celebrare il caos, il trambusto e la confusione delle città moderne. Crepuscolari e futuristi si collocano entrambi nel panorama dello **sperimentalismo** novecentesco, caratterizzato dalla percezione di un bisogno di distaccarsi definitivamente dalle regole dell'arte tradizionale delle epoche precedenti e di creare un'arte innovativa, al passo con i tempi.

Le intenzioni dei futuristi sono molto chiare in letteratura: nei manifesti proclamavano di voler utilizzare i verbi all'infinito, di volersi liberare da punteggiatura, aggettivi e avverbi, nonché di una metrica definita e regolare; questo per evitare di "imprigionare" la poesia in costrizioni temporali, metriche o di alcun tipo. Troviamo un tipo di analogia innovativo (ad esempio, uomo-torpediniera), ottenuto accostando due parole ed unendole mediante un trattino; in questo modo si potevano mettere a confronto parole di significato molto diverso, così da poter cogliere anche le sfaccettature meno comuni e più insolite della realtà. La libertà stilistica che i futuristi avevano conquistato

raggiunge il proprio apice con le cosiddette "parole in libertà" (o **paroliberismo**, di cui vediamo un esempio in Fig. 63): la poesia perde una coerenza logica interna e non è più strutturata in strofe e versi; le parole vengono invece disposte sul foglio in modo sparso, come più aggrada all'autore, che di parola in parola può cambiare tipo e dimensione del carattere tipografico.

I futuristi non esitavano ad imporsi in maniera violenta al lettore, disprezzavano le donne e ritenevano la guerra la "sola igiene del mondo". Essi infatti, nel contesto del cosiddetto "fronte interno" che si creò in Italia quando si rese necessario decidere se partecipare alla Prima guerra mondiale o meno, si schierarono senza esitazioni dalla parte degli interventisti. Non c'è da stupirsi che essi confluirono, con il passare del tempo, nel Fascismo, tanto da diventarne lo stile artistico ufficiale.



Fig. 63 - Govoni, "Il palombaro"

Anche nella pittura i futuristi introdussero grandi novità dal punto di vista stilistico. Essi riprendono il Cubismo, e più indirettamente il postimpressionista Cezanne, per quanto riguarda la scomposizione razionale della rappresentazione in più piani che si compenetrano generando forme geometriche semplici, ma non ne condividono la staticità. Mentre per i Cubisti l'opera d'arte doveva permettere di vedere l'oggetto da vari punti di vista per cogliere l'essenzialità, per i futuristi essa era espressione del movimento e della velocità, ragione per la quale prediligevano linee compositive curve (ellittiche, soprattutto) ed utilizzarono anche le cosiddette **linee di forza**, ovvero linee compositive che erano le direttrici del movimento all'interno della composizione. Le opere

risultano quindi caratterizzate da linee altamente geometrizzanti e volumi netti. Quindi, mentre i cubisti rappresentano gli più punti vista oggetti contemporaneamente, ma pur sempre in maniera statica, i futuristi provano ad esempio a raffigurare, all'interno di una medesima opera, l'oggetto in differenti momenti per illustrarne il movimento. Un esempio di quanto appena detto è rappresentato dall'opera "Velocità d'automobile" (Fig. 64), del pittore futurista Giacomo Balla. Esso rappresenta un'automobile in corsa vista in momenti



Fig. 64 – Balla, "Velocità d'automobile", 1913

successivi, in modo da restituire al fruitore dell'opera – come il titolo stesso lascia intendere – la dinamicità della scena. Il realismo della scena è sacrificato ad una rappresentazione più schematica del movimento, e la composizione è caratterizzata da linee, ora parallele ora convergenti, sia rette che curve, che mettono in evidenza le dinamiche del moto; nella parte bassa dell'immagine troviamo inoltre vortici che riprendono il movimento delle ruote e conferiscono ulteriore vitalità al quadro. Da notare è l'uso di praticamente un'unica tonalità di colore, che sottolinea come l'intenzione non sia quella di restituire una rappresentazione realistica della scena. Dietro a questo quadro si cela quindi uno **studio razionale del movimento**, che viene rappresentato nelle sue varie fasi come se si trattasse di diversi fotogrammi sovrapporti. Questo tipo di approccio venne favorito dallo sviluppo tecnologico che si verificò parallelamente alla diffusione dell'arte futurista, più nello specifico lo sviluppo della cinematografia.

Non a caso l'opera raffigura un'automobile: sia per quanto riguarda la letteratura che la pittura, uno dei soggetti più cari ai futuristi, che sintetizzava i loro ideali di velocità e modernità, erano i **mezzi di trasporto**, in particolar modo l'automobile. Marinetti, in "All'automobile da corsa" ne esalta le caratteristiche fin quasi a rasentare l'esagerazione, come quando afferma che il Sole che tramonta la insegue, lasciandoci intuire che non riuscirà a raggiungerla.

Con la diffusione conosciuta dagli aerei dopo la Prima guerra mondiale, però, anche questo nuovo mezzo di trasporto iniziò ad essere preso in considerazione dai futuristi, e ben presto assunse un'importanza rilevante soprattutto per quanto riguarda la pittura.

L'aeropittura

L'aeropittura è una declinazione pittorica del futurismo. Essa fa parte del cosiddetto Secondo futurismo, che si differenzia dal primo poiché è caratterizzato da una maggior apertura, sia per quanto riguarda il maggior numero di tematiche prese in considerazione, sia per l'applicazione dell'arte futurista agli ambiti più insoliti, dai giocattoli al cinema. Si verifica inoltre una generale tendenza verso l'**astrattismo**, che si era ormai imposto nell'immaginario collettivo. Analogamente al fascino che i mezzi di trasporto, l'automobile in particolare, avevano già esercitato sui futuristi,



Fig. 65 – Dottori, "A 300 km sulla città", 1934

gli artisti vedono ora negli **aerei** la possibilità di scorgere il mondo da prospettive nuove e mutevoli, di godere di "visioni rotanti" e di "frammenti panoramici".

Nel contesto dell'aeropittura si possono individuare due correnti principali. La prima, alla quale appartengono pittori quali Munari e Belli, caratterizzata dalla volontà di dipingere il mondo sfruttando le possibilità in termini di paesaggi, prospettive e dinamismo offerte dall'aereo. L'aereo è rappresentato poco realisticamente oppure è

difficilmente individuabile, e talvolta non viene nemmeno rappresentato; esso si trasforma spesso e volentieri in una sensazione di velocità, in un gioco di linee, punti di fuga e accelerazioni. Un esempio di questo tipo di aeropittura è "A 300 km sulla città", di Gerardo Dottori (Fig. 65), del 1934: in esso l'aereo è solamente un pretesto per raffigurare il paesaggio sottostante. Il secondo gruppo di aeropittori è caratterizzato invece dall'amore nei confronti dell'aeromobile in sé, che diventa quindi soggetto e parte integrante del dipinto. Fanno parte di quest'ultima categoria pittori come Tato, Crali e Ambrosi, che raffigurano gli aerei con colori verosimili e forme ben definite. Un esempio dell'attenzione che questi artisti dedicano all'aereo in sé si può vedere in Fig. 66 (Acrobazie in cielo, Crali, 1930). Esiste inoltre una terza categoria, caratterizzata dall'utilizzo delle potenzialità espressive offerte dall'aeropittura per rappresentare meglio e più efficacemente una realtà che con altri mezzi sarebbe difficilmente rappresentabile.



Fig. 66 - Crali, "Acrobazie in cielo", 1930

Il Manifesto dell'aeropittura futurista

Dopo qualche anno di sviluppo iniziale, nel 1929 Marinetti presentò a Parigi il *Manifesto dell'aeropittura futurista*, riportato integralmente nella pagina seguente. In esso viene innanzitutto ribadita la mutevolezza delle prospettive e l'assenza di punti fermi a cui fare riferimento. L'"aeropittore", secondo il Manifesto, non può osservare e dipingere se non "partecipando alla loro stessa velocità". Viene inoltre sottolineata la differenza tra la "velocità terrestre", quella dei mezzi

di trasporto tradizionali come l'automobile ed il tram, a cui i futuristi erano già abituati, e la "velocità aerea". La prima, seppur basata su un movimento più o meno marcato a seconda della distanza dal mezzo di trasporto, consente comunque all'occhio di mantenere il piano dell'orizzonte come punto di riferimento. L'aeropittura è invece caratterizzata dalla totale assenza di certezze e di riferimenti, "un ideale osservatorio ipersensibile appeso dovunque nell'infinito, dinamizzato inoltre dalla coscienza stessa del moto che muta il valore e il ritmo dei minuti e dei secondi". Si verifica quindi anche una perdita di tutti i riferimenti temporali, oltre che spaziali e prospettici.

NOI FUTURISTI DICHIARIAMO CHE:

- 1. Le prospettive mutevoli del volo costituiscono una realtà assolutamente nuova e che nulla ha di comune con la realtà tradizionalmente costituita dalle prospettive terrestri;
- 2. Gli elementi di questa nuova realtà non hanno nessun punto fermo e sono costruiti dalla stessa mobilità perenne;
- 3. Il pittore non può osservare e dipingere che partecipando allo loro stessa velocità;
- 4. Dipingere dall'alto questa nuova realtà impone un disprezzo profondo per il dettaglio e una necessità di sintetizzare e trasfigurare tutto;

tutte le parti del paesaggio appaiono al pittore in volo:

- a) schiacciate
- b) artificiali
- c) provvisorie
- d) appena cadute dal cielo
- 6. Tutte le parti del paesaggio accentuano agli occhi del pittore in volo i loro caratteri di: folto

sparso

elegante

grandioso

- 7. Ogni aeropittura contiene simultaneamente il doppio movimento dell'aeroplano e della mano del pittore che muove matita, pennello o diffusore;
- 8. Il quadro o complesso plastico di aeropittura deve essere policentrico;
- 9. Si giungerà presto a una nuova spiritualità plastica extraterrestre.

Nelle velocità terrestri (cavallo, automobile, treno) le piante, le case ecc., avventando contro di noi, girando rapidissime le vicine, meno rapide le lontane, formano una ruota dinamica nella cornice dell'orizzonte di montagne mare colline laghi, che si spostano anch'essa, ma così lentamente da sembrare ferma. Oltre questa cornice immobile esiste per l'occhio nostro anche la continuità orizzontale del piano su cui si corre.

Nelle velocità aeree invece mancano questa continuità e quella cornice panoramica. L'aeroplano, che plana si tuffa s'impenna ecc., crea un'ideale osservatorio ipersensibile appeso dovunque nell'infinito, dinamizzato inoltre dalla coscienza stessa del moto che muta il valore e il ritmo dei minuti e dei secondi di visione-sensazione. Il tempo e lo spazio vengono polverizzati dalla fulminea constatazione che la terra corre velocissima sotto l'aeroplano immobile.

Luca Degasper La física del volo

Primavera umbra (Gerardo Dottori)

Realizzato da Dottori nel 1923 e conservato oggi presso una galleria d'arte privata, questo dipinto raffigura un paesaggio dell'Umbria dove campagne e abitazioni, caratterizzati da una rappresentazione basata su una forte geometrizzazione dei volumi, vengono visti dall'alto. E' inoltre presente un lago, anch'esso geometrizzato; è di forma ellittica, e probabilmente si tratta del Trasimeno, molto caro all'autore. Sulla sua superficie si riflette il cielo con qualche sua nuvola. In questo modo l'autore crea una sorta di identità tra cielo e terra, corrispondenza che sintetizza al meglio i principi dell'aeropittura futurista.



Fig. 67 - Dottori, "Primavera Umbra", 1923

Non è possibile vedere il cielo direttamente, essendo la linea dell'orizzonte esclusa dal piano del quadro inclinato verso il basso. Il paesaggio si estende indefinitamente in lontananza, dove i colori virano verso il blu e le colline sembrano venire circondate dalla foschia.

Come già scritto in precedenza, Dottori appartiene al gruppo di aeropittori che vedono l'aereo non come oggetto degno di essere rappresentato in sé, ma come mezzo che consente all'artista di godere di nuove prospettive e di provare sensazioni nuove legate alla velocità. Benché in quest'opera siano chiaramente individuabili i linguaggi dell'aeropittura futurista, si tratta di uno stile ancora acerbo e che necessita ancora di tempo per raggiungere la piena maturità. Il fruitore si trova scaraventato

sopra la regione umbra; il punto di vista è collocato molto in alto rispetto al paesaggio, creando una prospettiva insolita che esclude la linea dell'orizzonte dal piano del quadro. Novità compositive riguardanti l'**impostazione prospettica** erano state già introdotte in precedenza dagli Impressionisti (cfr. "La tinozza", Edgar Degas), grazie anche alla diffusione della fotografia e quindi di prospettive di impostazione fotografica. Le volumetrie del paesaggio sono articolate secondo forme geometriche semplici che si dispongono seguendo linee direttrici di forma ellittica o spiraleggiante chiamate linee di forza, che sono uno dei cardini su cui è impostata tutta la pittura futurista e che hanno il compito di "dirigere" ed impartire il movimento all'interno dell'opera.

Il Futurismo è in aperta opposizione al **Cubismo** per quanto riguarda la dinamicità della rappresentazione. Mentre i futuristi hanno il dichiarato obiettivo di rappresentare la realtà nella sua dinamicità e continua evoluzione, i cubisti si limitano a raffigurarla da più punti di vista, creando una molteplicità di prospettive in



Fig. 68 – Picasso, "Ritratto di Ambroise Vollard", 1910

un'unica opera. Per raggiungere questi scopi entrambi i movimenti artistici sfruttano la scomposizione della realtà in più piani che si compenetrano creando forme geometriche elementari, caratteristica ereditata dal postimpressionista Cezanne. Soprattutto in relazione alle opere del **Cubismo analitico**, di cui il *Ritratto di Ambroise Vollard* del 1910 di Picasso raffigurato in Fig. 68 è un ottimo esempio, che nonostante la rielaborazione dell'artista continua a mantenere uno stretto contatto con la realtà, si notano le differenze con lo stile futurista, che molto spesso tende a rendere irriconoscibile l'oggetto rappresentato se non per alcuni dettagli, caratteristica che lo avvicina invece al cosiddetto **Cubismo sintetico**. Sia futuristi che cubisti si differenziano dagli impressionisti citati in precedenza per non limitarsi ad una rappresentazione della realtà esteriore, seppur elaborata secondo le emozioni che l'artista prova al momento della percezione, ma per cercare qualcosa in più che si cela dietro alla mera apparenza, ovvero il dinamismo per i futuristi e la vera essenza della realtà per i cubisti.

Experimentation in England: Finnegans Wake (James Joyce)

At the beginning of the 20th century there was a sense of uncertainty spread among English population as in Europe. Theories like Einstein's relativity, Freud's studies about the unconscious, Bergson's ideas about the subjective time and Nietzsche's concept of the superman made people feel unsure about their present condition and about their future. As a consequence of this situation, a big experimentation found place in all artistic fields. Artists wanted to find new ways of sharing their ideas through innovative and more direct techniques.

James Joyce was born in Dublin in 1882 and graduated in modern languages in 1903. Throughout his life, he considered himself more European than Irish. In his works he shows most of the techniques which characterise the modern novel, such as the **interior monologue**, that is a literary translation of the psychological phenomenon of the **stream of consciousness**. Joyce, as well as the English writer Virgina Woolf, has a subjective, psychological conception of time. He believes in the impersonality of the author, like Baudelaire and the Italian "*veristi*": the world is described through the characters' perception of it, and is not directly from the author's mind.

Finnegans Wake, the last of Joyce's novels, published in London in 1939, is the description of a night, a dream. He was able to describe the whole human history in a night time, while in the *Ulysses* he described the human history in a day time. It seems that *Ulysses* focuses on human unconscious during the day, instead *Finnegans Wake* describes how the unconscious works at night.

Finnegans Wake begins at evening and ends at dawn, and in a certain sense it completes *Ulysses*. Joyce describes a series of comic events that happen to the members of a family consisting in father, mother and three children. The father's name is Humphrey Chimpden Earwicker, but he is known mainly by his initials H. C. E., which are recurrent inside the text. His wife's name is Anna Livia and she is mother to Isabel and a couple of twins, Kevin and Jerry, known as Shaun and Shem. The story begins when Earwicker scolds the twins because they were fighting for the girls of the neighbourhood. Then he goes to bed after drinking too much and he is tormented by hundreds of dreams throughout the night.

The first thing we have to focus our attention on is the title of this extract: Finnegan's Wake with the apostrophe. It is the title of an old Irish ballad, which speaks about a bricklayer who falls on the ground after having drunk too much. He seems dead, but when the word "whiskey" in pronounced, which etymologically means "water of life", he comes back to life. The parallelism with Joyce's works is thus easily understandable. Furthermore, Finnegan is a pun: it can be divided into "fin", which comes from the French and means "end", and "again"; in this sense it also means "a new beginning". From the title we can already see the **circular conception of history** that Joyce has. He was influenced by the Italian philosopher Giambattista Vico, for whom history was divided into three phases, theocracy, aristocracy and democracy, and a period of dissolution, followed by a new beginning of the same cycle. Joyce was strongly influenced by Vico, and Finnegans Wake is in fact divided into three books, followed by a short book in which the characters collapse. As consequence, human beings can not get better or worse during their life, no change is possible. We can find this circular structure in other works by Joyce, for example in **Molly's monologue**, which starts with the word "yes" and ends with the same word.

The text is written following the logic of a **dream**: characters are often exchanged, and single ideas can take different shapes. There is no apparent logic connection between clauses and no clear narrative. Instead, Joyce uses a lot of puns and word-plays, he transforms words and distorts them, taking inspiration from other languages, mainly German, French and Latin, and using his knowledge of history, legends, myths and music. There are extraordinarily long sentences with scarce punctuation, which makes the reader lose their meaning before he reaches the end. In this text the technique of the **stream of consciousness** in brought to its extreme. Joyce didn't use an ordinary style because he didn't want to describe the ordinary world, but the night and the world of dreams. He describes different states of mind, from the conscious to the unconscious through the semi-conscious.

<u>riverrun</u>, past <u>Eve and Adam's</u>, from swerve of shore to bend of bay, brings us by a <u>commodius vicus</u> of <u>recirculation</u> back to Howth Castle and Environs.

Sir Tristram, <u>violer d'amores</u>, fr'over the short sea, had passencore <u>rearrived</u> from North Armorica on this side the scraggy isthmus of Europe Minor to wielderfight his penisolate war: nor had topsawyer's rocks by the stream Oconee exaggerated themselse to Laurens County's gorgios while they went doublin their mumper all the time: nor avoice from afire bellowsed mishe mishe to <u>tauftauf</u> thuartpeatrick: not yet, though venissoon after, had a kidscad buttended a bland old isaac: not yet, though all's fair in vanessy, were sosie sesthers wroth with twone nathandjoe. Rot a peck of pa's malt had Jhem or Shen brewed by arclight and rory end to the regginbrow was to be seen ringsome on the aquaface.

The fall

(<u>bababadalgharaghtakamminarronnkonnbronntonnerronntuonnthunntrovarrhounawns kawntoohoohoordenenthurnuk!</u>) of a once wallstrait oldparr is <u>retaled</u> early in bed and later on life down through all christian minstrelsy.

These are the first three paragraphs of the novel. They focus on Earwicker falling asleep, and passing from a state of consciousness to one of unconsciousness. As we can see, the text begins with an incomplete sentence, which is actually the end of the final sentence of the work. Finnegans Wake has thus a circular structure, further underlined by words such as "recirculation", "rearrived", "retaled". In this extract we can also find words which are directly taken from other languages, for example "commodious vicus" comes from the Latin and means "comfortable way", and "tauftauf" comes from the German word "taufen", which means "baptise".

The word "riverrun" refers to a river which is a recurrent theme throughout the novel; the river is called *Liffey* and it symbolizes time and life. It flows past the church of Adam and Eve, whose names are inverted to imply temptation, fall and **renewal**, following a circular pattern again. The river then flows into Dublin's bay and towards Howth Castle and Environs. In this passage, H. C. Earwicker, who is falling but not yet fallen asleep, identifies himself with the river, the hills and the castle (they have the same initials).

In the second paragraph Joyce speaks about Tristan. He can be either the Tristan who came from Armorica (Brittany) to bring Isolde back to Minor Europe (Ireland), or the man who came to Dublin (the "scraggy isthmus") to found Howth Castle. "Violer d'amores", another expression taken from a

foreign language, represents either Mark's violated love or a musical instrument. Then there is a reference to St. Patrick, who came to Ireland to Christianise the country, and Ireland itself says "Mishe, mishe!", which means "Here I am!". Then there is a reference to Iacob fooling Esau and Isaac with false hair, a kid and venison, but Joyce wants in fact to highlight Irish political problems, in particular inside the Home Rule Party. Finally, Joyce mentions the brewing of beer in Dublin and the drinking habits of Irish people.

In the last paragraph, Adam's fall into sin and the end of one cycle of history are expressed through a word which is one hundred letters long and represents the first of ten thunders spread throughout the novel. This paragraph is thus a remark about humanity, whose condition is characterized by sin and cannot evolve into something better.

This inability to change represents Joyce's idea of **paralysis**, which is a theme that pervades most of Joyce's works. The circular conception of history that Joyce has and the fact that everything will happen in the same way again and again lead to the conclusion that people's condition can not change. This condition is described not only through the contents and structure of the novel, but also through the linguistic choices Joyce made, for example the use of the **prefix re-** in many words.

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

Carollo Sabrina, Futurismo, Giunti, 2003

Carollo Sabrina, I futuristi, Giunti, 2004

Cassinelli Paola, Futurismo, Giunti, 2001

Cricco Giorgio, Di Teodoro Francesco Paolo, Itinerario nell'arte vol. 3, Zanichelli, 2005

D. Anderson, S. Eberhardt, *Una descrizione fisica del volo*, "La Fisica nella Scuola", a. XXXIX, n. 2, 2006, pp. 60-72

Fera Giuseppe, Sulla portanza delle ali, "La Fisica nella Scuola", a. XXXIX, n. 2, 2006, pp. 73-76

Lupia Palmieri Elvidio, Parotto Maurizio, Il globo terrestre e la sua evoluzione, Zanichelli, 2008

Singer Charles (a cura di), Storia della tecnologia, Boringhieri, 1984

Smith Patrick, Chiedilo al pilota, Fusi orari, 2005

Spiazzi Marina, Tavella Marina, Only Connect - The modern age, Zanichelli, 2000

Taddei Mario, Zanon Edoardo (a cura di), Le macchine di Leonardo. Segreti e invenzioni nei Codici da Vinci, Giunti, 2005

Trebbi Rizzardo, Teoria del volo, Aviabooks, 2005

```
<a href="http://ishtar.df.unibo.it/mflu/html/bernoulli.html">http://ishtar.df.unibo.it/mflu/html/bernoulli.html</a>
```

http://it.wikipedia.org/

http://web.tiscali.it/aerotecnicagenerale/

http://www.av8n.com/how/htm/airfoils.html

http://www.b737.org.uk/

http://www.grc.nasa.gov/>

http://www.vateud-td.org/">

http://www.vatita.net/