

L'ESSENZA DEL VOLO: LA PORTANZA

[Memoria preparata per il Convegno Tecnico FIAM - Milano 27 Gennaio 2002]

SINOSI

Il corretto concetto della portanza, già presentato in una recente monografia ed in articoli comparsi in alcuni periodici, viene qui ulteriormente semplificato, allo scopo di renderlo più facilmente comprensibile..

Facendo riferimento a principi e nozioni verificate sin dagli albori dell'aviazione, la generazione della portanza viene qui illustrata senza ricorso ad *overdose* di formule, sempre poco gradite, facendo invece ricorso ad opportune illustrazioni.

Infatti a noi costruttori di modelli volanti, che siamo semplici utilizzatori di aerodinamica spicciola a livello amatoriale, interessa l'aspetto essenziale del fenomeno portanza, senza troppe elocubrazioni teoriche e senza elaborazioni di alta matematica.

Dopo un secolo di aviazione e di aeromodellismo, contrassegnati da un enorme progresso, affrontiamo il terzo millennio con idee evolute anche per quanto riguarda l'aspetto fondamentale del volo: la generazione della portanza.

In APPENDICE:

Come determinare la quantità d'aria deviata in basso

Come si spiega l'effetto suolo

Il principio di Bernoulli non è sufficiente

Illustrazioni

Ogni aeromodellista sa (o dovrebbe sapere) che qualsiasi aerodina (aeromodello o aeroplano che sia) può volare soltanto grazie alla *portanza* generata dall'ala.

Sappiamo che essa è dovuta all'azione dell'aria sull'ala; sappiamo pure che la creazione della portanza dipende dal movimento relativo tra la superficie profilata ed il flusso d'aria. E' il *principio della reciprocità degli effetti*: la portanza si produce su un'ala in movimento in aria stazionaria allo stesso modo come si produce quando l'ala è ferma in una corrente d'aria in movimento (come si verifica in una galleria del vento).

Se vogliamo attribuire all'aeromodellismo una sia pur minima valenza culturale, possiamo esaminare un po' più da vicino lo sviluppo della portanza, tanto per iniziare il terzo millennio con le idee chiare.

A proposito di questo argomento quasi tutti i testi in circolazione presentano una illustrazione come quella della FIG.1. Tutto chiaro, semplice, intuitivo? Niente affatto!! Proviamo a dare una risposta a questa domanda "Come si forma la portanza??"

Da decenni a questo proposito si cita il principio di *Daniel Bernoulli*, il fisico svizzero che aveva studiato il flusso dei fluidi in condotti chiusi (tubazioni), arrivando alla conclusione che "In ogni punto di un fluido in movimento la somma delle pressioni, statica e dinamica, cioè la *pressione totale*, rimane costante"(FIG.2).

Ciò è sintetizzato in una semplice relazione, che il matematico *Eulero*, amico di *Bernoulli*, ha espresso nel modo seguente:

$$p + q = \text{costante}$$

nella quale *p* indica la *pressione statica*, *q* indica quella *dinamica*.

Secondo *Bernoulli* quindi, se *q* cresce per l'aumento della velocità, *p* diminuisce in modo tale che la somma dei due valori rimanga costante. E' sacrosantamente vero!!

La *pressione statica* è quella indicata dal barometro domestico, la *pressione dinamica* è dovuta al movimento: sporgiamo la mano fuori dal finestrino di un'auto, tenendo una cartolina. Ad auto ferma non notiamo niente, perchè la *pressione statica* si esercita in tutte le direzioni: quando l'auto si muove, sulla cartolina si esercita la *pressione dinamica*, che possiamo variare cambiando l'angolazione rispetto alla direzione di moto.

Così facendo variamo l'*angolo d'attacco* rispetto alla direzione del flusso: l'*angolo d'attacco* è il più importante fattore nella generazione della portanza.

La *pressione dinamica* si esprime con la relazione

$$q = 0.5 \cdot \rho \cdot V^2$$

nella quale ρ (*rho*) indica la *densità* del fluido (aria nel nostro caso) e *V* indica la *velocità di traslazione*. Quindi, raddoppiando la velocità, la *pressione dinamica* diventa quattro volte più grande.

Parecchi decenni fa, qualcuno (non si sa bene chi) fece il seguente ragionamento:

In quasi tutti i profili, il contorno dorsale è più lungo di quello ventrale.

Conseguentemente, le molecole d'aria che corrono sul dorso, per raggiungere il bordo d'uscita, devono muoversi più velocemente delle loro sorelle che seguono il percorso ventrale.

Risultato: sul dorso la pressione dinamica aumenta, mentre quella statica, grazie al professor Bernoulli, diminuisce. La superficie profilata viene così "succhiata" verso l'alto.

Ricordiamo, incidentalmente, che l'ala "sente" la *pressione statica*: quella *dinamica*, come tale, non le interessa.

Tutto quanto sopra detto è noto come "*teoria della gobba*": semplice, facile, di immediata percezione, ma decisamente insufficiente.

Notiamo infatti che:

a) ci sono profili (ampiamente impiegati in aviazione, per esempio in taluni aviogetti quali gli Airbus), nei quali il contorno dorsale è più corto di quello ventrale. Non potrebbero quindi generare portanza.

b) nella maggior parte dei profili di uso corrente (alcuni sono elencati nella tabella in **Appendice**) la differenza di lunghezza tra contorno dorsale e contorno ventrale è esigua (raramente supera il 4%).

Ma qual'è l'entità della portanza necessaria? È esattamente uguale al peso del nostro modello o aeroplano che sia.

Se vogliamo esaminare il problema da un altro punto di vista, sotto l'ala dovremmo riscontrare una pressione unitaria esattamente uguale al carico alare. Per esempio, se il modello ha un carico alare di 60 grammi/dm², sul ventre dell'ala deve esercitarsi una identica pressione (diretta verso l'alto).

Ammettendo per un attimo, che la *teoria della gobba* sia valida, per un piccolo aeroplano da turismo oppure per un maximodello di peso rilevante, il contorno dorsale dovrebbe essere circa il 50% più lungo di quello ventrale.

c) inoltre la *teoria della gobba* presume che i flussi d'aria sul dorso e sul ventre del profilo giungano sul dorso esattamente allo stesso tempo, secondo il *principio dell'ugual tempo di transito*.

Se teoria della gobba e correlativo principio dell'ugual tempo di transito fossero validi, il volo invertito non dovrebbe essere possibile per aeromodelli ed aeroplani acrobatici muniti di profilo biconvesso simmetrico, calettato a 0°.

Lo stesso dovrebbe valere per i "balsetta", nei quali l'ala è quasi sempre costituita da una tavoletta piana di balsa.

E allora? Anzitutto non esiste alcun principio fisico, scientificamente corretto e verificato sperimentalmente, il quale sancisca - senza ombra di dubbio - che i flussi dorsale e ventrale (separatisi al bordo d'attacco) debbano tassativamente incontrarsi al bordo d'uscita nel medesimo istante (FIG.3).

È bensì vero che sopra il dorso (ma non a contatto di esso) il flusso risulta più veloce di quello ventrale, ma il differenziale di pressione che ne risulta è insufficiente per spiegare la generazione della portanza come una conseguenza del principio di *Bernoulli*.

Questo è validissimo per flussi entro condotti, ma insufficiente per spiegare la generazione della portanza. Bisogna cercare altrove.

Per spiegare in modo corretto e completo la generazione della portanza bisogna fare ricorso alla *terza legge della dinamica* (principio di *Newton*) nonché alla *circolazione* (o *circuitazione*) attorno al profilo alare. Il concetto di *circolazione* verrà esaminato più avanti, in quanto è stato per decenni completamente trascurato nella letteratura divulgativa.

Il principio di *Newton*, comunemente definito "di azione e reazione", stabilisce che "ad ogni azione corrisponde sempre una reazione contraria di uguale intensità e direzione, ma di verso contrario".

Un semplice esempio: un peso appoggiato su un tavolo, vi rimane fermo unicamente perché il materiale con cui il tavolo è fatto reagisce e produce una forza di reazione esattamente uguale al peso. Se il piano del tavolo fosse fatto di altro materiale più morbido e deformabile (per esempio burro), il peso lentamente lo attraverserebbe.

Il principio di *Newton* ci assicura che "le azioni scambievoli di due corpi (e quindi anche ala e massa d'aria) sono sempre uguali in intensità e direttamente opposte nella medesima linea retta".

Eventuali dubbi in proposito si eliminano consultando qualsiasi testo di fisica.

Quando avevamo i calzoni corti, un giochetto da ragazzini consisteva nel lanciare un

ciottolo lenticolare, liscio e piatto, su una superficie d'acqua tranquilla, dove rimbalzava diverse volte prima di affondare. A questo ciottolo (che i francesi chiamano *galeit*) veniva impresso un moto rotatorio; inoltre veniva lanciato in modo che toccasse l'acqua con una certa inclinazione (angolo d'attacco).

Allora non lo sapevamo, ma era un chiaro esempio del *principio di Newton*: il ciottolo batte sull'acqua (*azione*) e questa, leggermente scompostasi, reagisce spingendo nuovamente in aria il sasso (*reazione*).

Qualcosa di molto simile si sviluppa attorno all'ala, grazie all'*angolo di attacco* rispetto alla direzione del moto. Nel suo moto traslatorio l'ala spinge verso il basso una grande quantità d'aria, la quale reagisce con una spinta verso l'alto.

Idealmente, possiamo rappresentare questa reazione come quella di una molla (FIG.4), visto che l'aria è elastica.

Diciamo (e scriviamo) che un profilo spesso è molto più portante di uno sottile; menzioniamo altresì lo spessore relativo e la freccia della linea mediana.

In realtà, per la generazione della portanza, ciò che conta più di ogni altro fattore sono: la linea curva del dorso, che agevola la deviazione verso il basso, e l'angolo d'attacco.

Per atterrare i pesanti aviogetti dispiegano *flaps* multipli e *slats*, che conseguono tre effetti: allungano la linea curva del dorso, aumentano la superficie dell'ala, incrementano l'angolo d'attacco nonché la corda alare. In questa configurazione, detta "*sporca*", l'ala diventa un vero e proprio energico deflettore, ottenendo così la portanza necessaria a sostenere il velivolo a velocità ridotta, nella delicata fase dell'atterraggio (FIG.5).

Con un pizzico d'immaginazione, possiamo raffigurarci l'ala come una pala di una pompa d'aria (*ventilatore*): nel ventilatore, come nell'*elica* e nel *rotore dell'elicottero*, ogni pala ripassa sempre sul proprio cammino, mentre nell'ala il moto *rotatorio* è sostituito da quello *traslatorio*. Il principio non cambia: una grande massa d'aria viene spinta in senso ortogonale (o quasi) rispetto alla pala stessa.

Provate: dietro un'elica sentite un forte soffio d'aria, ma di fianco ad essa nulla accade.

Anche il colibrì, simpatico uccellino, protagonista di tanti documentari sulla natura, batte le ali con incredibile frequenza (800 battiti/minuto) per realizzare il suo volo stazionario (tecnicamente dovremmo dire "*hovering stazionario fuori effetto suolo*"). Deve infatti spingere verso il basso una massa d'aria tale che, moltiplicata per la velocità media di deflessione, fornisca una spinta uguale al suo peso.

Consideriamo un aeroplano CESSNA 172, pesante circa 1045 Kg e viaggiante all'onesta velocità di 220 Km/h con un angolo d'attacco di 5°: la velocità verticale di deflessione risulta di circa 18 Km/h. L'ala - considerata come una pompa - deve spingere in basso 5 tonnellate d'aria al secondo!! Un aviogetto di linea, che riduce drasticamente la velocità all'atterraggio (tipicamente da 800 a 300 Km/h), la quantità d'aria da scaraventare in basso è enorme; diventa quindi indispensabile sfruttare al massimo l'*effetto Coanda* (che si vedrà più avanti), dispiegando i *flaps*, come si è già detto.

Possiamo crearci mentalmente una nuova immagine dell'ala: per esempio, possiamo raffigurarcela come un enorme condotto, simile a quelli per l'aria condizionata (FIG.6).

La massa d'aria che questo immaginario convogliatore scaraventa in basso, in ogni istante di volo, è proporzionale alla *velocità dell'ala*, all'*angolo d'attacco*, alla *densità dell'aria*.

Come suggerisce il *principio di Newton*, l'ala deve "*fare*" qualcosa all'aria, con grande dispendio di energia, per ricavarne la portanza. Nella FIG.6 questo immaginario condotto ha la sezione rettangolare, per semplicità di rappresentazione: in realtà la sua altezza sulla sezione trasversale è più correttamente assimilabile alla linea che delimita la

distribuzione della portanza lungo l'apertura alare.

In parole povere, è la reazione dell'aria a questo continuo "schiaffeggiamento" dell'ala che produce la portanza.

Entra qui in gioco il *principio di Galileo (seconda legge della dinamica)*, che si può sintetizzare così: *forza uguale massa per accelerazione*.

Come semplici costruttori di modelli volanti, non siamo tenuti ad avere dimestichezza con derivate, integrali et similia, il concetto può essere semplificato nel modo seguente: *"la portanza è uguale alla massa d'aria deviata verso il basso nell'unità di tempo (cioè in un secondo), moltiplicata per la velocità verticale di caduta"*.

In altre parole, facendo appello ai lontani ricordi ginnasiali, l'ala colpisce l'aria con un impulso pari alla massa d'aria, moltiplicata per la velocità ad essa impartita.

In appendice è riportato uno schema di calcolo semplificato, per determinare, sia pure grossolanamente, la quantità d'aria scaraventata verso il basso.

Se l'aerodina potesse sorvolare a bassa quota una ipotetica enorme bilancia, con piatto tanto grande da raccogliere tutta l'aria deviata in basso, la bilancia registrerebbe il peso del velivolo in volo (FIG.7).

Normalmente, studi e ricerche sull'origine della portanza limitano l'osservazione scientifica a quanto avviene nelle immediate vicinanze del profilo (poco sopra, poco sotto), con particolare enfasi sull'interazione tra lo strato limite ed il flusso ad esso immediatamente contiguo. Nella realtà, il campo aerodinamico è molto più complesso. Per approfondire l'argomento, in America è stato eseguito un interessante argomento: sul bordo d'attacco di un CESSNA 150 è stato installato un tubo verticale telescopico, con la possibilità di bloccare un tubo di Pitot ad altezze diverse (FIG.8). Leggendo i valori rilevati ad intervalli di 1 piede (poco più di 30 cm) sopra e sotto l'ala, si è costruito il grafico della FIG.9. Come si può vedere, la differenza di velocità tra flusso dorsale e flusso ventrale non è gran cosa; conseguentemente la differenza tra le due pressioni (dorsale e ventrale) come tale, non consente il sostentamento dell'ala per via della portanza.

Questo esperimento non è facilmente realizzabile su aeroplani di grandi dimensioni, ma può essere agevolmente duplicato su un'ala di modello, inserita in una piccola galleria del vento, di tipo amatoriale, opportunamente modificata.

In qualche testo di scarso pregio, il flusso dell'aria attorno al profilo viene rappresentato come indicato nella FIG.10-A: l'aria arriva al profilo in linea retta, gli gira attorno e si allontana nella direzione rettilinea di arrivo. Se così fosse, non si avrebbe alcuna portanza. Nella realtà (FIG.10-B), il flusso si inarca leggermente verso l'alto poco prima di raggiungere il bordo d'attacco (*inflessione*) ed abbandona il bordo d'uscita notevolmente deviato verso il basso (*deflessione*).

A livello aeromodellistico (quando lo si fa), si prende in considerazione solo la *deflessione*, per via della sua influenza sulla stabilità e sulla manovrabilità.

Ad esempio, con ala calettata a $+2^\circ$ e stabilizzatore a $+0^\circ$, diciamo che il *diedro longitudinale* è di 2° (valore geometrico); in pratica lo stabilizzatore opera sempre ad una incidenza negativa (di qualche grado), anche se il profilo è portante.

In linea di massima, alla galleria del vento l'angolo di deflessione non è molto diverso dall'angolo d'attacco (FIG.11). L'aveva scoperto anche *Newton*, che - per la verità - con il problema del volo ci aveva azzeccato poco. Lo potrebbe constatare anche un pilota a bordo di un aeroplano, se la cosa fosse tecnicamente possibile.

Per contro, se l'aria fosse visibile, un osservatore a terra vedrebbe l'aria discendere quasi

verticalmente dall'ala, esattamente come avviene sotto il rotore di un elicottero. *Inflessione e deflessione* fanno parte di un fenomeno reale più complesso, noto come *circolazione*. Per comprenderlo correttamente bisogna fare riferimento al *principio dell'attaccamento superficiale*, delineato chiaramente dall'ingegner *Herny Coanda* nella prima decade del secolo scorso. *Coanda*, rumeno naturalizzato francese, morì nel 1972. A causa della *viscosità*, l'aria tende a seguire la curvatura, *concava* o *convessa*, dell'oggetto da essa investito: al riguardo ci sono dozzine di dimostrazioni spicciole, qui omesse per ragioni di spazio. Da millenni gli uccelli traggono vantaggio dal *principio di Coanda* durante il volo ad ali battenti, onde spingere in basso il maggior quantitativo d'aria possibile. La superficie leggermente concava delle loro ali favorisce la leggera *accelerazione negativa* (cioè volta in avanti) del flusso ventrale: ciò aumenta l'*inflessione*, quindi la *deflessione*, in definitiva la *circolazione in toto*.

La *circolazione*, detta anche *vortice curvo* oppure *circuitazione*, è il vero generatore della portanza, e non il debole differenziale di pressione dovuto all'effetto *Bernoulli*. L'errata interpretazione del concetto di *circolazione* è alla base dell'idea di adottare ali e vele cilindriche rotanti: tutti gli esperimenti tentati, sia in aviazione, sia in marina, sono falliti miseramente (comprese le costose navi da carico realizzate dai giapponesi).

La FIG.12 mostra chiaramente che l'attività delle particelle d'aria è più rilevante sul dorso del profilo: questa vignetta va intesa come una ipotetica fotografia al milionesimo di secondo, scattata da un osservatore a terra. Ogni freccina indica, in intensità, direzione e verso il movimento di ognuna delle infinite particelle d'aria.

Il dorso è quindi la parte più critica per quanto riguarda la generazione della portanza: tradizionalmente gli aeroplani portano i carichi esterni (motori compresi) *sotto* le ali, cosicchè la loro azione di disturbo è meno influente sulla portanza. Raramente si sono visti carichi installati sopra le ali.

Il concetto di *circolazione* non è di immediata percezione, anche per gli addetti ai lavori, perchè di solito viene presentata con una illustrazione come quella della FIG.13, che provoca un certo disorientamento iniziale. Sembra infatti che ci sia una specie di flusso *circolare* che avvolge il profilo, contemporaneamente al normale flusso *traslatorio*, con *inflessione e deflessione*.

Serve una spiegazione: questa vignetta va intesa come una istantanea ripresa in un tempo brevissimo: nell'istante successivo tutta l'immagine si è già spostata, secondo la velocità di traslazione.

Un osservatore immobile vedrebbe il passaggio dell'ala con il flusso in lieve salita davanti al bordo d'entrata (*inflessione*): dopo essere passato sul dorso, il flusso devia verso il basso (*deflessione*). Se le molecole d'aria fossero visibili, un osservatore immobile vedrebbe la *circolazione* attorno all'ala in movimento, come nella FIG.12.

Se questo osservatore potesse muoversi parallelamente all'ala, vedrebbe il flusso traslatorio, con *inflessione e deflessione*.

La FIG.14 mostra la *circolazione* attorno all'ala, fotografata, mediante un geniale accorgimento dal *Gen. Bernasconi* (Genio Aeronautico), nei primi decenni del secolo scorso. Il concetto di *circolazione* è stato analiticamente descritto dal fisico tedesco *Ludwig Prandtl*, che ha corredato le sue pubblicazioni di eccellenti fotografie: nel 1934 aveva scritto: "la portanza si può intendere soltanto sovrapponendo un flusso circolatorio su un flusso traslatorio. Dieci anni più tardi (1944) lo scienziato tedesco *W.Langwiesche* aveva scritto, a proposito della teoria della gobba "scordatevi!! In primo luogo il teorema di Bernoulli non spiega nulla; in secondo luogo, la presunta spiegazione è più intrigante del quesito".

Inoltre: *“il fatto più importante nel volo del più-pesante-dell'aria è questo: l'ala tiene su l'aeroplano spingendo l'aria verso il basso”*.

Nel 1972 N.F.Smith, ricercatore aeronautico della NASA, aveva scritto *“per spiegare il sostentamento dinamico (portanza), risultato dell'incontro tra un fluido (aria) ed un dispositivo portante (ala) bisogna applicare la legge di Newton. Questa non solo è corretta dal punto di vista della fisica, ma facilita l'insegnamento e l'apprendimento dell'intera faccenda”*.

L'elenco di altre valide citazioni è troppo lungo per essere qui presentato.

La FIG.15 mostra come la rappresentazione della circolazione in un classico testo degli anni '30. Benchè parecchi testi citassero la circolazione come la vera origine della portanza, i divulgatori preferirono attenersi al principio di *Bernoulli*, che è di immediata percezione. Questo è avvenuto anche in aeromodellismo: l'unica eccezione, rimasta senza seguito, è costituita da un articolo comparso su *L'AQUILONE* n.28 1935-XIV°.

Si leggeva infatti: *“senza entrare nei particolari teorici del fenomeno, per averne una idea generale è sufficiente considerare che, per il moto di traslazione dell'ala, l'aria assume, intorno ad essa, un moto complesso, che si può rappresentare con due moti contemporanei distinti: una traslazione rispetto all'ala ed un moto di rotazione intorno al profilo. La rotazione è diretta, lungo il dorso, dal bordo d'attacco al bordo d'uscita, e viceversa lungo il ventre: Ne segue che, lungo il dorso la velocità dell'aria aumenta, mentre lungo il ventre diminuisce, essendo la rotazione, da questa parte diretta in senso contrario alla traslazione”*.

Per bene intenderne il concetto, sembra opportuno ricorrere ad una serie di vignette che l'ingegnere americano *W.H.Carnahan* (1976) ha tracciato, dopo lunghi esperimenti alla galleria del fumo, particolarmente modificata, anzichè ad una elaborazione matematica, con overdose di formule, sempre un po' ostiche.

Immaginiamo una lastra piana (una tavoletta di balsa, per esempio), leggermente inclinata, che si muove orizzontalmente in una massa di molecole d'aria (FIG.16-A). Per nostra comodità le rappresentiamo con dei puntini. Il fronte delle molecole viene così diviso in due parti: quella inferiore viene spinta in avanti e verso il basso; quella superiore viene accelerata all'indietro e verso il basso.

E' importante ricordare che tutte queste vignette rappresentano azioni che si svolgono contemporaneamente ed interagiscono tra di loro; si possono considerare come fotografie scattate in un tempo brevissimo (un milionesimo di secondo), con particolari accorgimenti, volti ad evidenziare la fase che ci interessa.

Come la lastra avanza, le particelle sotto ad essa vengono spinte in avanti e verso il basso, soprattutto nelle vicinanze del bordo d'attacco (FIG.16-B). In questo punto notiamo che le particelle (molecole d'aria) risultano *“addensate”* o *“costipate”* che dir si voglia.

Siccome l'aria non gradisce essere compressa, si verifica subito una rapida fuga da questa zona di alta pressione. Scappare, sì, ma dove? Va bene qualsiasi zona dove la pressione sia inferiore: questa zona è sul dorso della lastra piana, dove si è creato una specie di *“vuoto”* (in senso relativo). Le molecole, che si sentono pressate, si rifugiano lì.

Nel frattempo, tutta la massa d'aria circostante (anche molto distante dalla lastra piana), nel tentativo *“istintivo”* di livellare il campo delle pressioni, ha fatto muovere tutte le particelle d'aria, da una parte o dall'altra. Ognuna di esse si può evidenziare con un trattino, che ne indica direzione e velocità (FIG.16-C); ma non c'è nulla che *“tiri”* le molecole nella regione di bassa pressione sopra la lastra piana. In realtà esse sono *“spinte”* dall'alta pressione circostante: ciò è quanto il comune termine *“aspirazione”* realmente esprime. In ogni aspirapolvere viene ridotta la pressione all'imboccatura, cosicchè la pressione atmosferica spinge all'interno aria, polvere, particelle varie, ecc. La girante,

scaraventata a terra in fase di decollo, come si può vedere dall'esempio in **Appendice**.
L'effetto pratico equivale a quello del *wind shear* (FIG.19).

Un'altra perplessità riguarda i dati rilevati in gallerie del vento molto piccole: osserviamo nuovamente la FIG.9. Il campo delle velocità si estende indubbiamente al di sopra ed al di sotto dei livelli riportati nel grafico: che cosa succede se il pavimento ed il tetto della galleria sono molto vicini all'ala in prova? E' più che logico immaginare che la *circolazione* risulti alterata: è come se quell'ala operasse in *effetto suolo* (Vedasi in **Appendice**). E' facile ipotizzare che in tali condizioni i dati rilevati risultino alterati.

Interrompiamo qui l'elenco delle perplessità, per una doverosa precisazione.

Tutto quanto esposto in questa chiaccherata, non è una geniale scoperta dell'autore, bensì una rilettura attenta con conseguente concatenazione logica di nozioni e dati che risalgono al periodo pionieristico dell'aviazione. Quand'ero studente universitario avevo avuto qualche dubbio a proposito della spiegazione basata sul principio di *Bernoulli*, ma il contestare i sacri testi non rientrava nei miei compiti. Mi sono deciso a farlo quando mi sono accorto che diversi specialisti (alcuni citati più sopra), indubbiamente più qualificati di me, si erano messi su questa via.



Luglio 2001

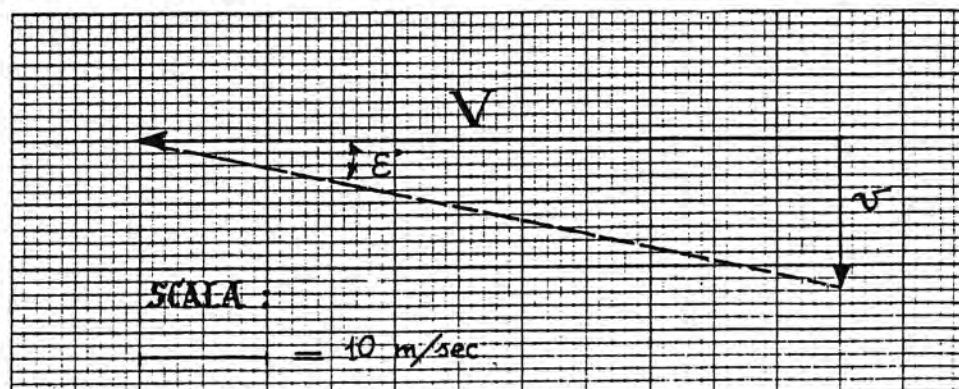
COME DETERMINARE LA QUANTITA' D'ARIA DEVIATA

- 1) Assumiamo che l'angolo di deflessione sia praticamente uguale all'angolo di attacco dell'ala, cioè $\alpha \cong \varepsilon$.
- 2) Accettiamo il principio che la massa d'aria deviata Q_{am} , moltiplicata per la velocità di deflessione v equivale al peso W dell'aerodina in volo a velocità V , quindi $Q_{am} \cdot v = W$ [Q_{am} = massa d'aria, Kg_m, v = velocità verticale, m/sec, W = peso, Kg].
- 3) Dal grafico sottoriportato notiamo che i vettori delle velocità V e v si trovano ad angolo retto; possiamo quindi determinare v mediante una semplice relazione trigonometrica, cioè $v = V \cdot \text{tang} \varepsilon$. Per comodità del lettore i valori di tangente per gli angoli d'interesse pratico sono riportati qui di seguito:

ε°	1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°	11°	12°	13°	14°	15°
Tang	0.0175	0.0349	0.0524	0.0699	0.0875	0.1051	0.1228	0.1405	0.1584	0.1763	0.1944	0.2125	0.2309	0.2493	0.2680

Tracciando il grafico (vedi sotto) su carta millimetrata ed assumendo una scala adeguata per le velocità, essendo noto il valore $\varepsilon = \alpha$, il valore v si ottiene immediatamente prolungando il segmento che, con V , determina l'angolo di deflessione ε .

- 4) La velocità v così determinata è quella che si riscontra immediatamente dietro l'ala: per operare correttamente dovremmo usare un valore medio, relativo a tutta la massa d'aria deviata. Prudentemente adottiamo, come *velocità di deflessione*, il valore $0.5 \cdot v$.
- 5) Riscriviamo la formula 2) nel modo seguente $Q_{am} = W / 0.5 \cdot v$, ottenendo così la massa d'aria deviata, espressa in *chilogrammi-massa*, Kg_m.
- 6) Moltiplichiamo il valore così trovato per 9.81 m/sec^2 (*accelerazione di gravità*), ottenendo il peso W' della massa d'aria deviata, espresso in *chilogrammi-peso*, Kg.
- 7) Dividendo il peso W' della massa d'aria deviata per il *peso specifico dell'aria* (kg/m^3) alla quota di volo, troviamo il volume d'aria V_w (m^3), che in ogni secondo di volo viene scaraventato verso il basso.



Determinazione grafica della velocità massima di deflessione v .

ε = angolo di deflessione, gradi
 v = velocità di deflessione, m/sec
 V = velocità di traslazione, m/sec

Q_{am} = massa d'aria deviata, Kg_m
 W = peso dell'aerodina, Kg
 W' = peso della quantità d'aria deviata, Kg
 V_w = volume del peso d'aria W'

Quando, da ragazzini, aggrappati alla rete di recinzione dell'aerodromo di Lonate Pozzuolo (piedi a terra e cuori in cielo), ci passava sulla testa, ad una trentina di metri di quota, il "gobbo maledetto" (Savoia Marchetti SM-79), sentivamo una lieve ventata, non un uragano come quello che si abbatte sulle case intorno a Malpensa 2000. La ragione? Quel velivolo pesava soltanto 9500 Kg !!.

Assumiamo che la sua velocità fosse $V=55$ m/sec (circa 200 Km/h), con un angolo d'attacco $\alpha=12^\circ$; la velocità di deflessione risulta $v=55 \cdot \tan 12^\circ = 55 \cdot 0.2126 = 11.7$ m/sec. Troviamo quindi $Q_{am} = 9500 \cdot 11.7 = 812$ Kg_m. Moltiplichiamo per 9.81 m/sec² (accelerazione di gravità), ottenendo il peso dell'aria deviata $W' = 812 \cdot 9.81 = 7965$ Kg.

Alla quota indicata, inferiore a 500 metri, il peso specifico dell'aria è di 1.225 Kg/m³, quindi il volume scaraventato a terra risulta di metri cubi $7965 / 1.225 = 6602$ circa.

Ben diversa è la situazione relativa ai pesanti aviogetti di linea del nostro tempo: consideriamo, per esempio, il McDonnell-Douglas MD-80, usando i parametri di volo prescritti dalla casa costruttrice (cortesemente forniti dal concittadino Antonio Seria, 1° Ufficiale Pilota dell'ALITALIA). Sono stati presi in considerazione i pesi al decollo di 46.000 Kg e di 66.000Kg, che sono i limiti minimo e massimo indicati nel manuale operativo della casa costruttrice. La velocità di traslazione V sugli strumenti di bordo è sempre indicata in KIAS (*knots indicated air speed*); è espressa in nodi

(1 nodo=1 miglio/ora) ed è sempre inferiore a quella reale rispetto all'aria ferma, TAS (*true air speed*). La differenza è di circa il 3% per ogni 1000 piedi di quota.

La TAS è stata qui ignorata. Si è invece assunto che l'angolo di deflessione ϵ corrispondesse all'angolo d'attacco α , indicato dalla strumentazione di bordo. Con l'ala in configurazione *sporca* (cioè con flaps e slats estesi), l'angolo d'attacco (e quindi anche quello di deflessione) risulta da 3 a 5 volte superiore a quello che ha in configurazione *pulita* (flaps e slats retratti); l'effetto *Coanda* risulta così enormemente esaltato. Eseguiti i calcoli come sopra indicato, sono stati tracciati i grafici delle FIG.20 (decollo) e FIG.21 (crociera-atterraggio).

La prima sintetizza la situazione al decollo: con un maggior peso (Kg 66.000) l'ala deve scaraventare a terra un volume d'aria ben superiore a quella necessaria con peso minimo al decollo di Kg 46.000.

Come è logico aspettarsi, esattamente il contrario avviene durante il volo di crociera (FIG.21); durante la discesa vera e propria, la strumentazione di bordo indica un angolo d'attacco leggermente negativo (da -1° a -3.3° , secondo il peso W). In tali condizioni, la portanza viene assicurata quasi totalmente dal profilo *sporco*, con grandissima curvatura.

Nella fase di salita, il volume d'aria scaraventata in basso per ogni secondo di volo, aumenta notevolmente col crescere del peso al decollo W .

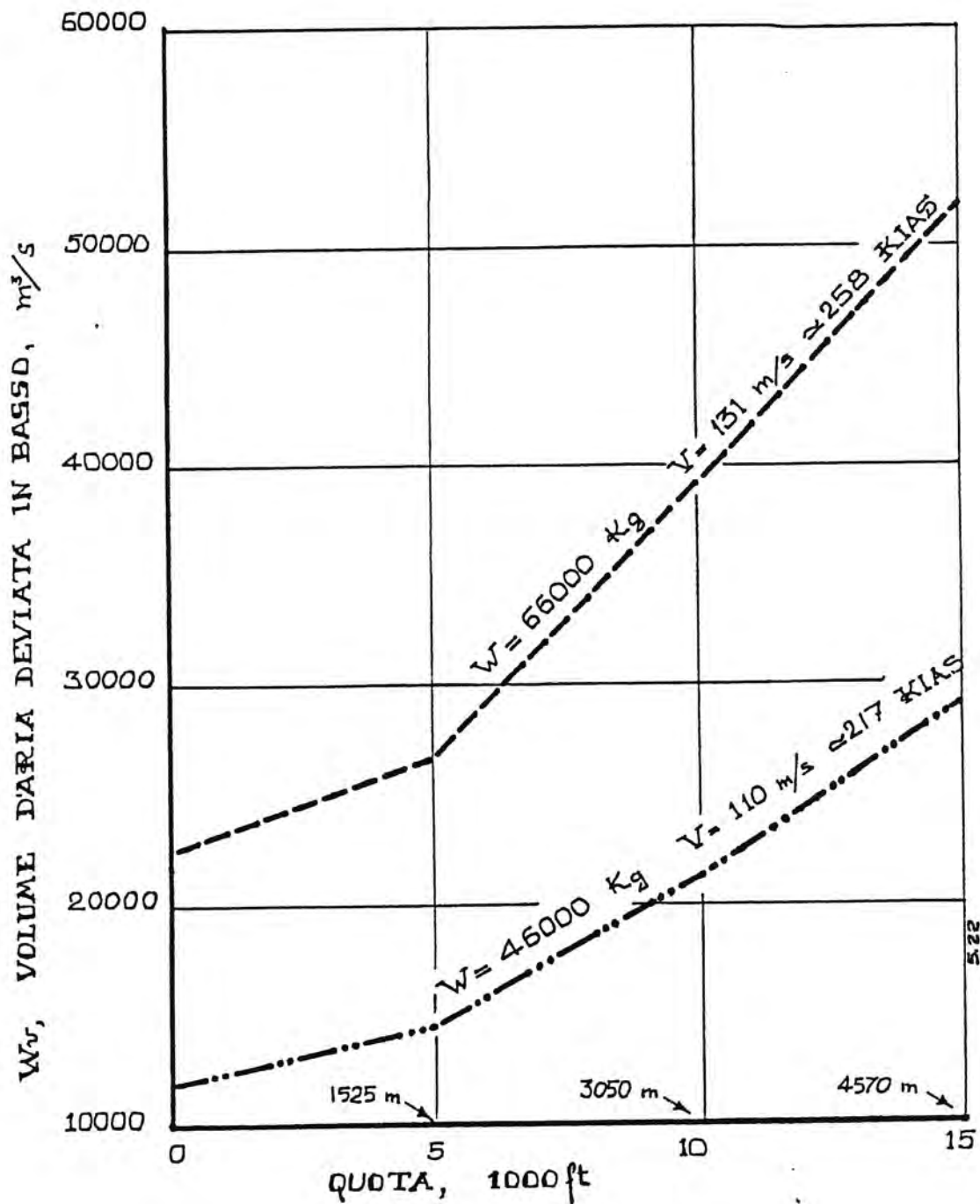


FIG.20

Durante il volo di crociera è necessaria una più energica deflessione per peso al decollo W più basso, per via dei ridotti angoli d'attacco α .

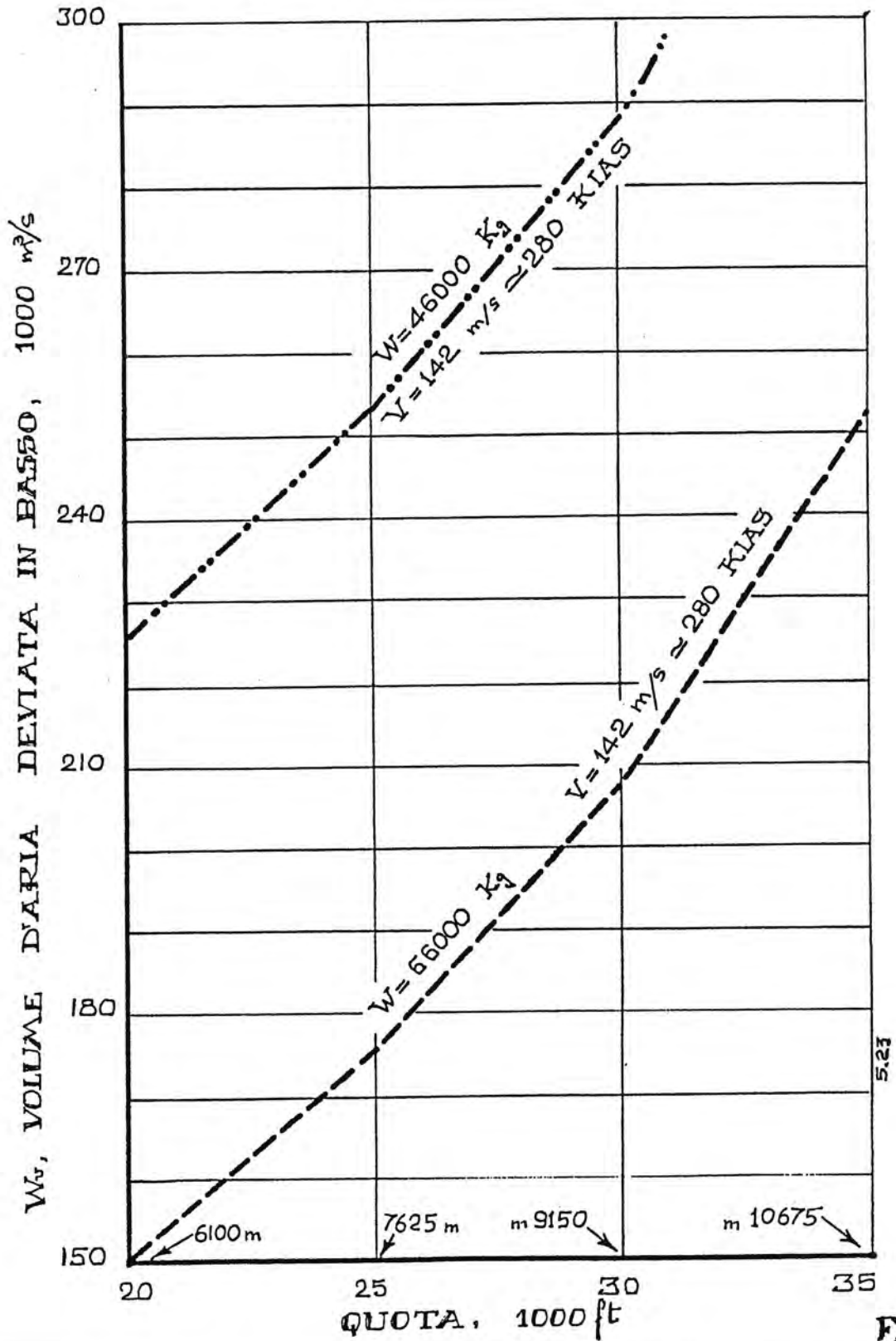


FIG. 21

IL PRINCIPIO DI BERNOULLI NON E' SUFFICIENTE

Proviamo a verificare l'applicabilità del principio di *Bernoulli*, assumendo - per assurdo - che siano validi il *principio dell'ugual tempo di transito* e la *teoria della gobba*.

Ricordiamo brevemente il principio di Bernoulli, sintetizzato dalla relazione

$$P = p + q$$

dove P =pressione totale, p =pressione statica, q =pressione dinamica.

Consideriamo - per esempio - un maximodello che, nell'aria ferma, avanza a 20 m/sec (72 Km/h) alla quota di 500 metri.

A questa altitudine la *pressione atmosferica* è $P = 9.421 \text{ Kg/m}^2$ e la *densità dell'aria* è $\rho = 0,1191 \text{ (Kg*sec}^2/\text{m}^4)$. Vedere Tabella Aria Tipo Internazionale.

L'ala del modello è munita di profilo CLARK Z, nel quale il contorno dorsale è più lungo del 5,56% rispetto a quello ventrale. Vedere tabella allegata.

La corda alare è di m.0,35, quindi il contorno dorsale risulta pari a $0,35 * 1,0556 = 0,36946$ metri. Assumiamo altresì che il *carico alare* sia di 80 g/dm^2 (cioè 8 Kg/m^2): affinché il modello possa volare, è indispensabile che sotto l'ala agisca una pressione di uguale intensità, diretta verso l'alto.

Sul *ventre* del profilo il tempo di transito risulta $t = 0,35(\text{m}) : 20(\text{m/sec}) = 0,0175 \text{ sec}$.

La *pressione dinamica* risulta pari a $q = 0,5 * 0,1191 * 20^2 = 0,05955 * 400 = 23,82 \text{ Kg/m}^2$.

Deducendo questo valore dalla *pressione atmosferica* $P = 9421 \text{ Kg/m}^2$ si ottiene la *pressione statica* esistente sotto l'ala, cioè $p = 9421 - 23,82 = 9397,18 \text{ Kg/m}^2$.

Sul *dorso* del profilo, che l'aria dovrebbe percorrere nello stesso tempo $t = 0,0175$ secondi, la velocità risulta $v = 0,36946 (\text{m}) : 0,0175(\text{sec}) = 21,112 \text{ m/sec}$.

La corrispondente *pressione dinamica* risulta $q = 0,5 * 0,1191 * [21,12]^2 = 0,05955 * 445,71654 = 26,5424 \text{ Kg/m}^2$.

Deducendo questo valore dalla *pressione atmosferica* $P = 9421 \text{ Kg/m}^2$, si ottiene la *pressione statica* sopra l'ala, cioè $p = 9421 - 26,5424 = 9394,45 \text{ Kg/m}^2$.

In definitiva, la *pressione statica differenziale* tra *dorso* e *ventre* del profilo risulta pari a $9397,18 - 9394,45 = 2,73 \text{ Kg/m}^2$, decisamente insufficiente a sostenere il nostro modello che ha un carico alare di 8 Kg/m^2 . Q.V.D.

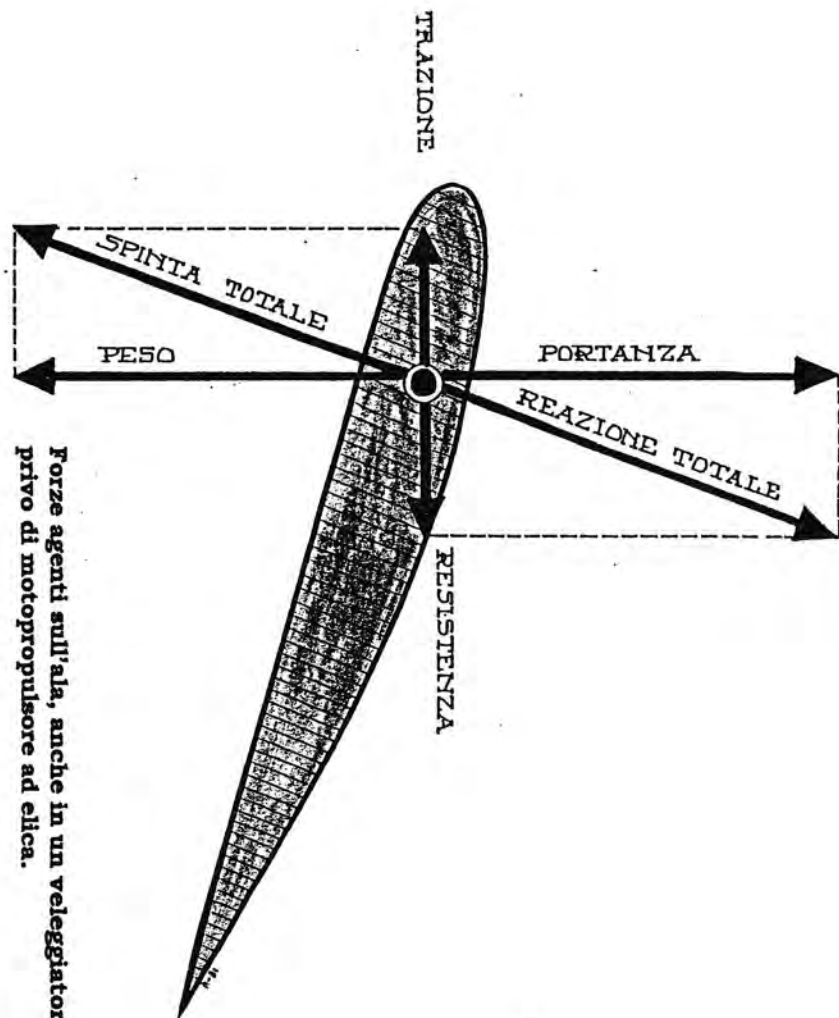
ARIA TIPO INTERNAZIONALE

QUOTA <i>Z</i> (m)	TEMPERATURA <i>t</i> [°] (C°)	PRESSIONE <i>P</i> (Kg/m ²)	PESO SPECIFICO <i>γ</i> (K/m ³)	DENSITA' <i>ρ=γ/g</i> (*) (Kg*sec ² /m ⁴)
0	15	10.000	1,2250	0,1249
500	11,75	9.421	1,1673	0,1191
1000	8,50	8.870	1,1117	0,1134
1500	5,25	8.345	1,0581	0,1079
2000	2,00	7.846	1,0066	0,1027
2500	-1,24	7.371	0,9570	0,0997
3000	-4,50	6.920	0,9092	0,0928
3500	-7,74	6.492	0,8634	0,0881
4000	10,98	6.086	0,8194	0,0837

g=accelerazione di gravità=9.81 m/sec²

Notiamo che la differenza di lunghezza tra i contorni (superiore **d** ed inferiore **v**) del profilo è veramente molto piccola, (raramente supera il 4%) come si vede dalla seguente tabella, relativa a noti profili, impiegati da decenni, in aviazione ed in aeromodellismo, per la realizzazione di centinaia di migliaia di aerodine.

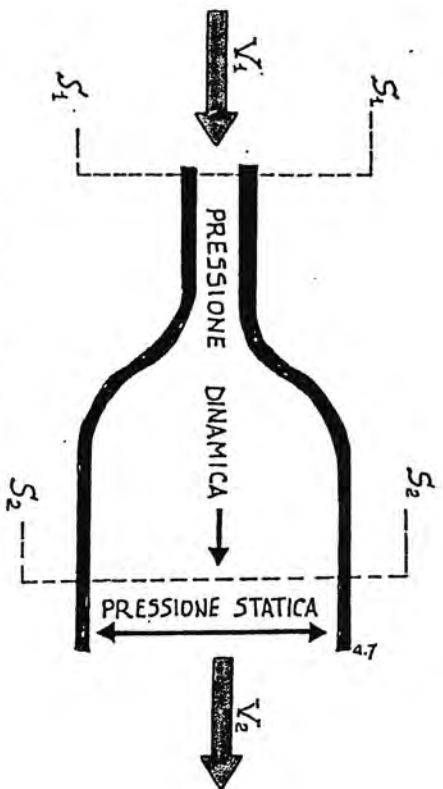
PROFILO	RAPPORTO d/v
ABRIAL 17	1.0179
ANTARES	1.0139
BENEDEK 1053 B	1.0198
BENEDEK 12355 B	1.0417
BOEING 103	1.0276
BROGGINI 55509	1.0196
CAVINI 15	1.0196
CJ-4	1.0157
CLARK K	1.0118
CLARK V	1.0058
CLARK YH	1.0058
CLARK YM-15	1.0136
CLARK X	1.0117
CLARK Y	1.0216
CLARK W	1.0254
CLARK Z	1.0556
COANDA 2	1.0000
CURTISS C.62	1.0019
CURTISS C.72	1.0098
DAYTON-WRIGHT T-1	1.0412
DVFLR RA-2	1.0097



Forze agenti sull'ala, anche in un veleggiatore
 privo di motopropulsore ad elica.

1

2



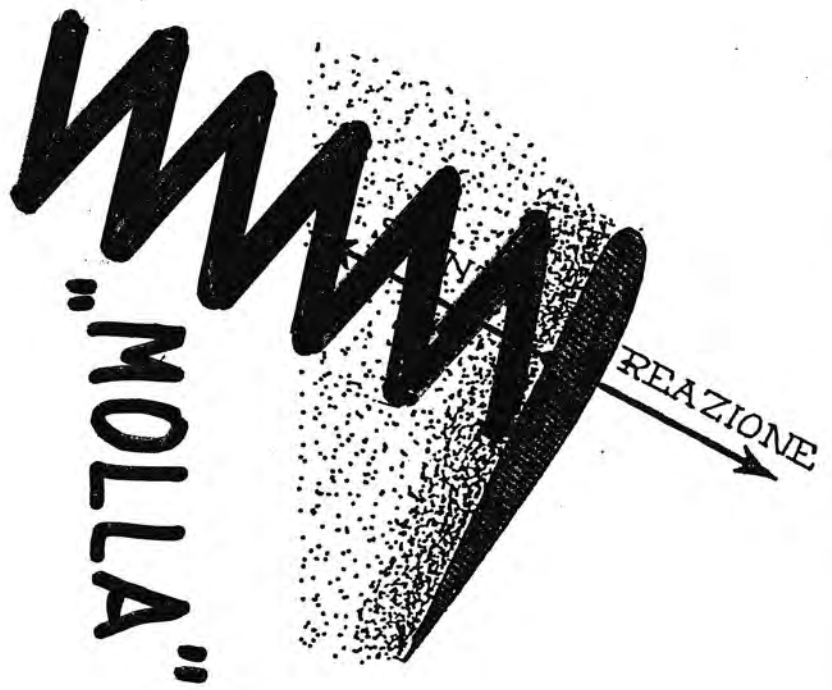
$$Q = V_1 \cdot S_1 = V_2 \cdot S_2$$

$$S_1 < S_2 \quad V_1 > V_2$$

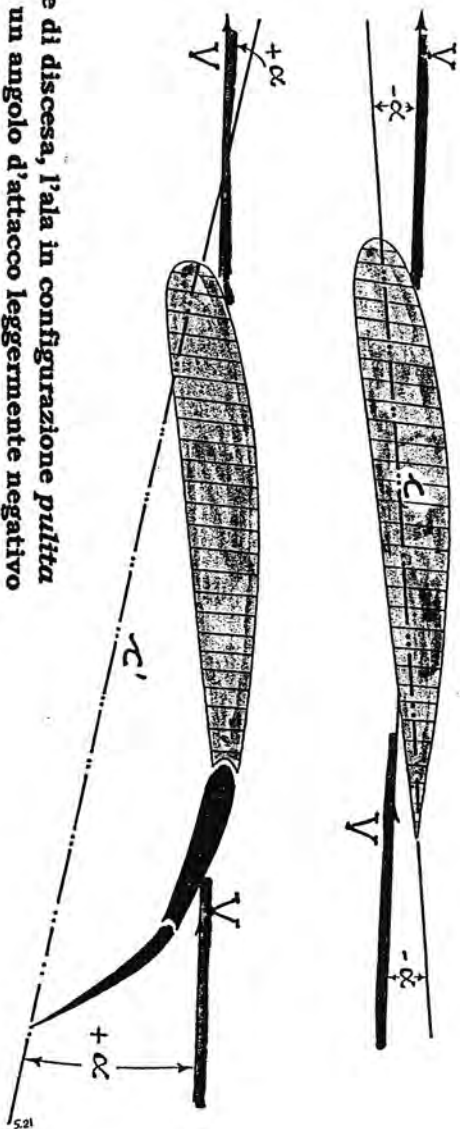
In un condotto a due sezioni diverse, in un punto qualsiasi la somma delle pressioni statica e dinamica rimane costante. La pressione statica si esercita sulle pareti, quella dinamica nel senso del flusso.



Sul dorso del profilo le molecole d'aria corrono più velocemente; però non basta.....

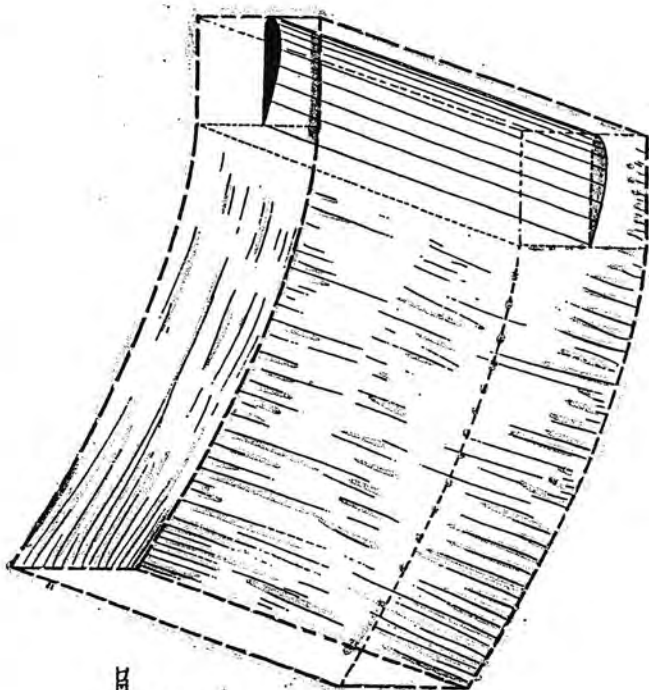


4



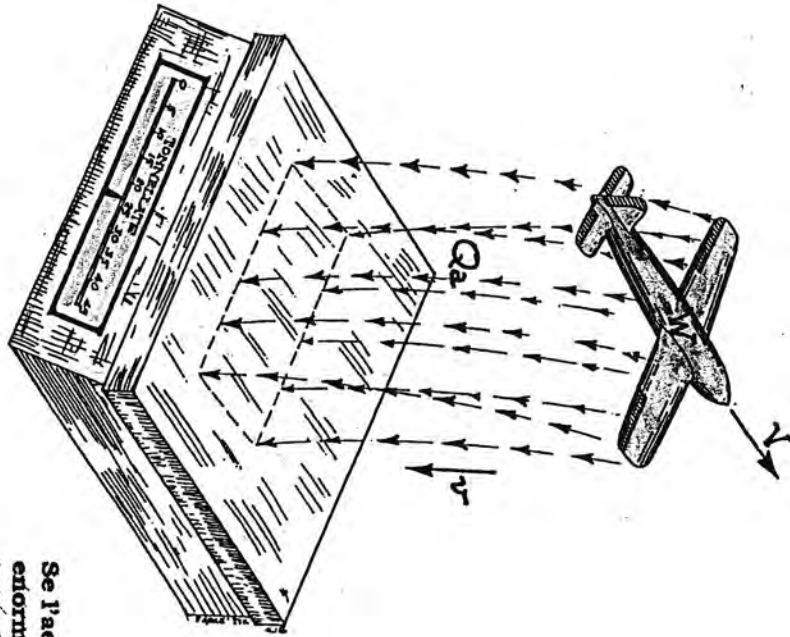
Nella fase di discesa, l'ala in configurazione *pullta* presenta un angolo d'attacco leggermente negativo ($-\alpha$) rispetto alla direzione di traslazione V .
In configurazione *sporca* la corda c' , migliorata rispetto a c , presenta un angolo d'attacco ($+\alpha$) decisamente più elevato (tipicamente da 15° a 20°).

6



DEFLESSIONE

Si può mentalmente immaginare l'ala come un grande condotto, che convoglia verso il basso grandi quantità d'aria, proporzionali al peso dell'aerodina in volo.

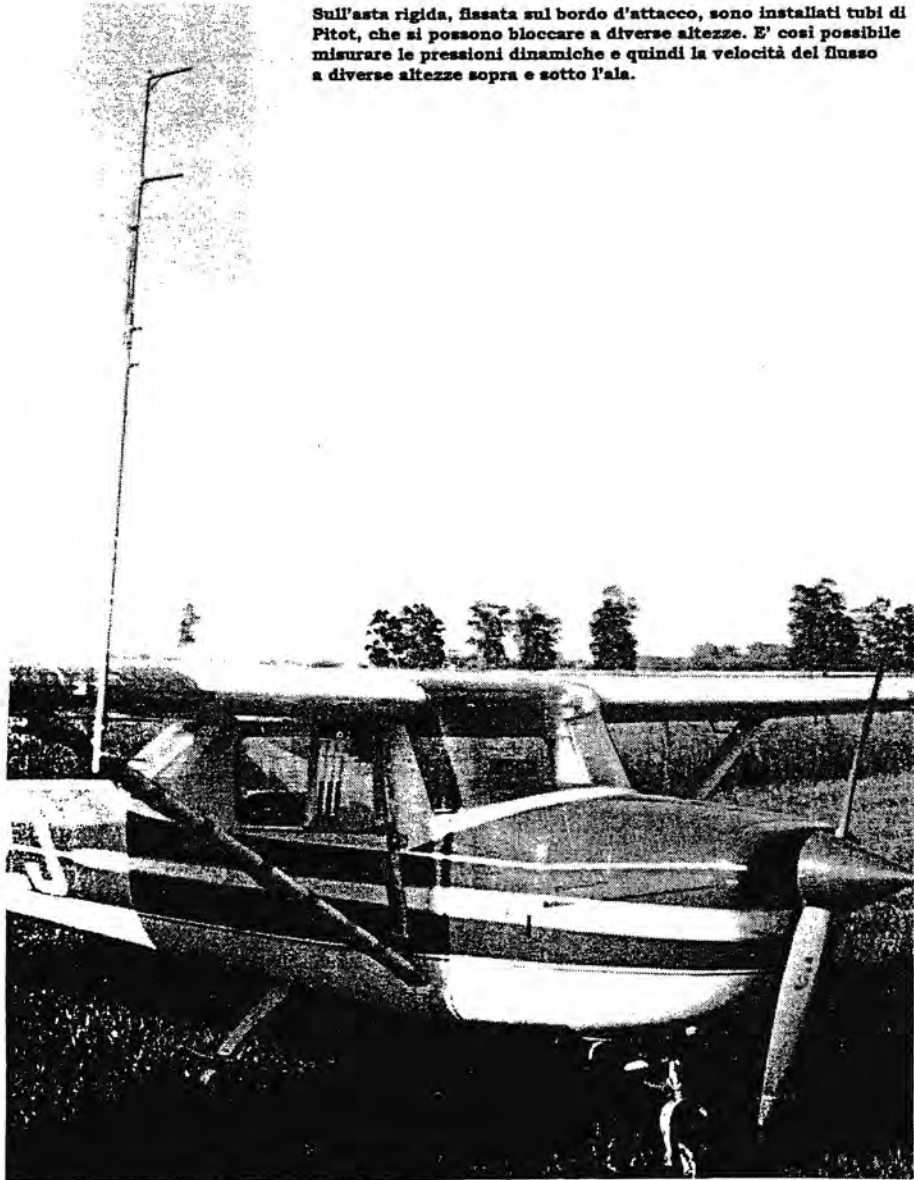


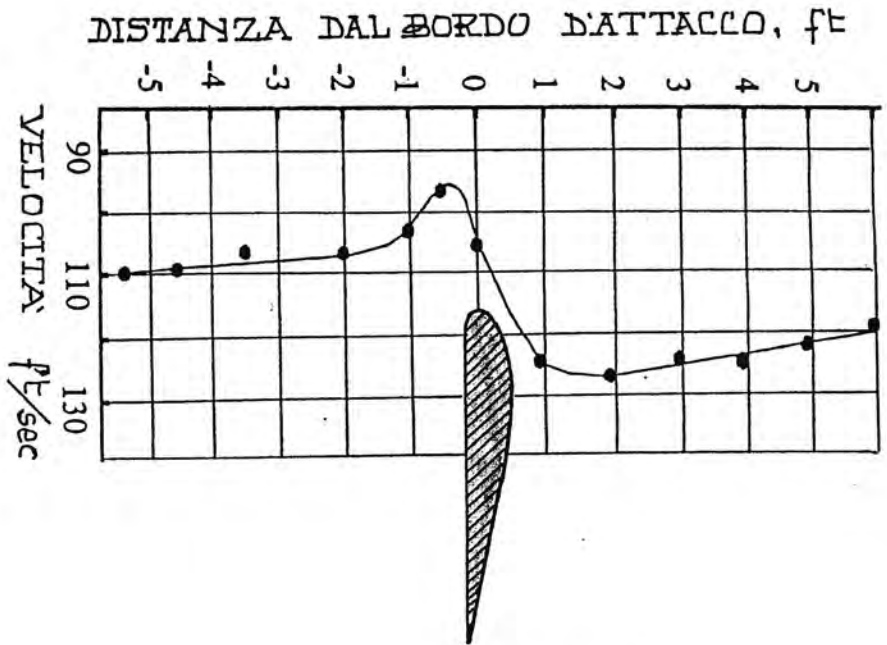
Se l'aerodina potesse sorvolare a bassa quota una ipotetica enorme bilancia, con un piatto tanto grande da raccogliere tutta l'aria deviata in basso, la bilancia registrerebbe il peso dell'aerodina in volo.



8

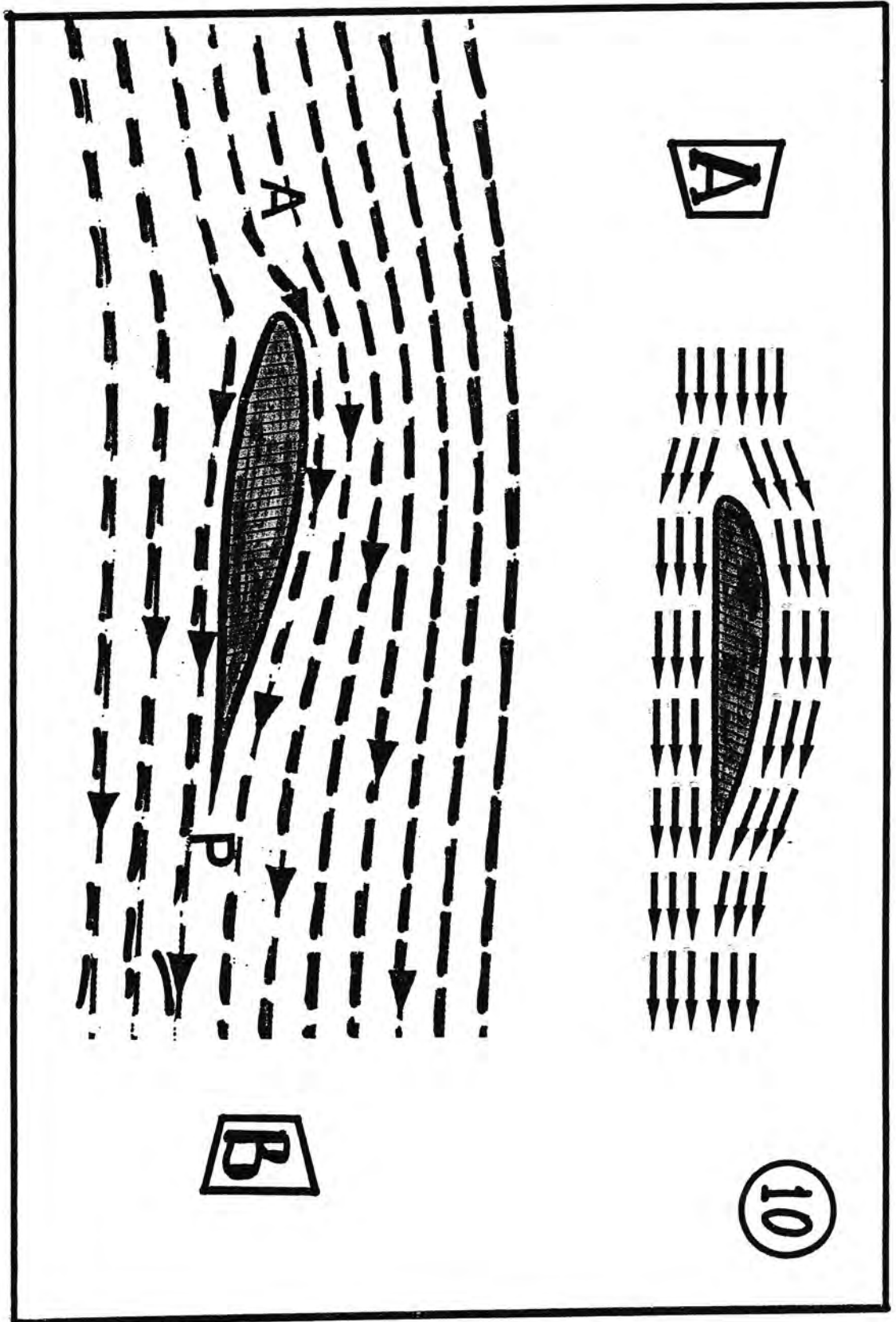
Sull'asta rigida, fissata sul bordo d'attacco, sono installati tubi di Pitot, che si possono bloccare a diverse altezze. E' così possibile misurare le pressioni dinamiche e quindi la velocità del flusso a diverse altezze sopra e sotto l'ala.

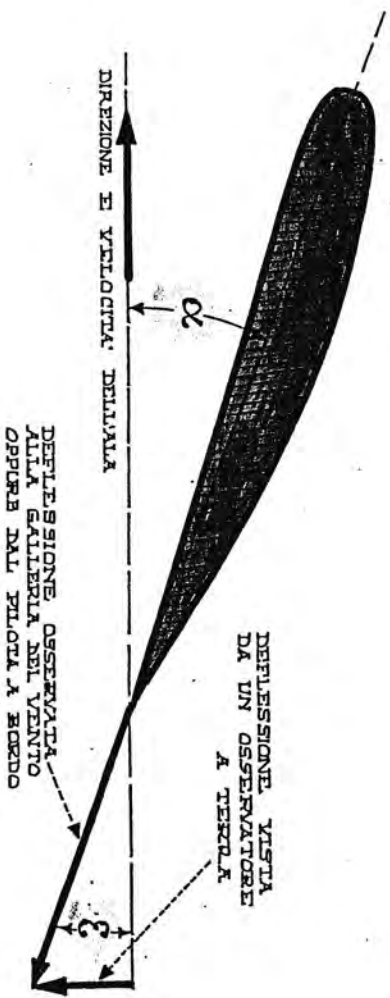




Le velocità sopra e sotto l'ala del CESSNA 150, a diverse distanze verticali dal bordo d'attacco. Ad 1 piede di distanza (circa 30 centimetri) si ha: sopra, 125 ft/sec; sotto, 105 ft/sec. Questa differenza di velocità non è sufficiente per produrre la portanza necessaria.

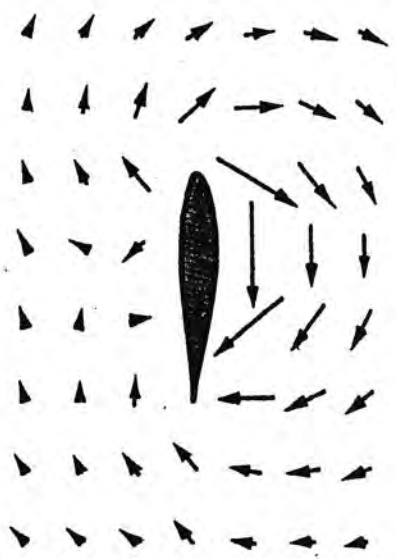
9

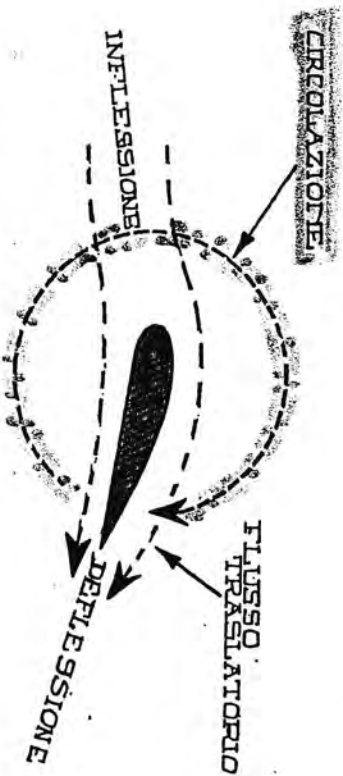




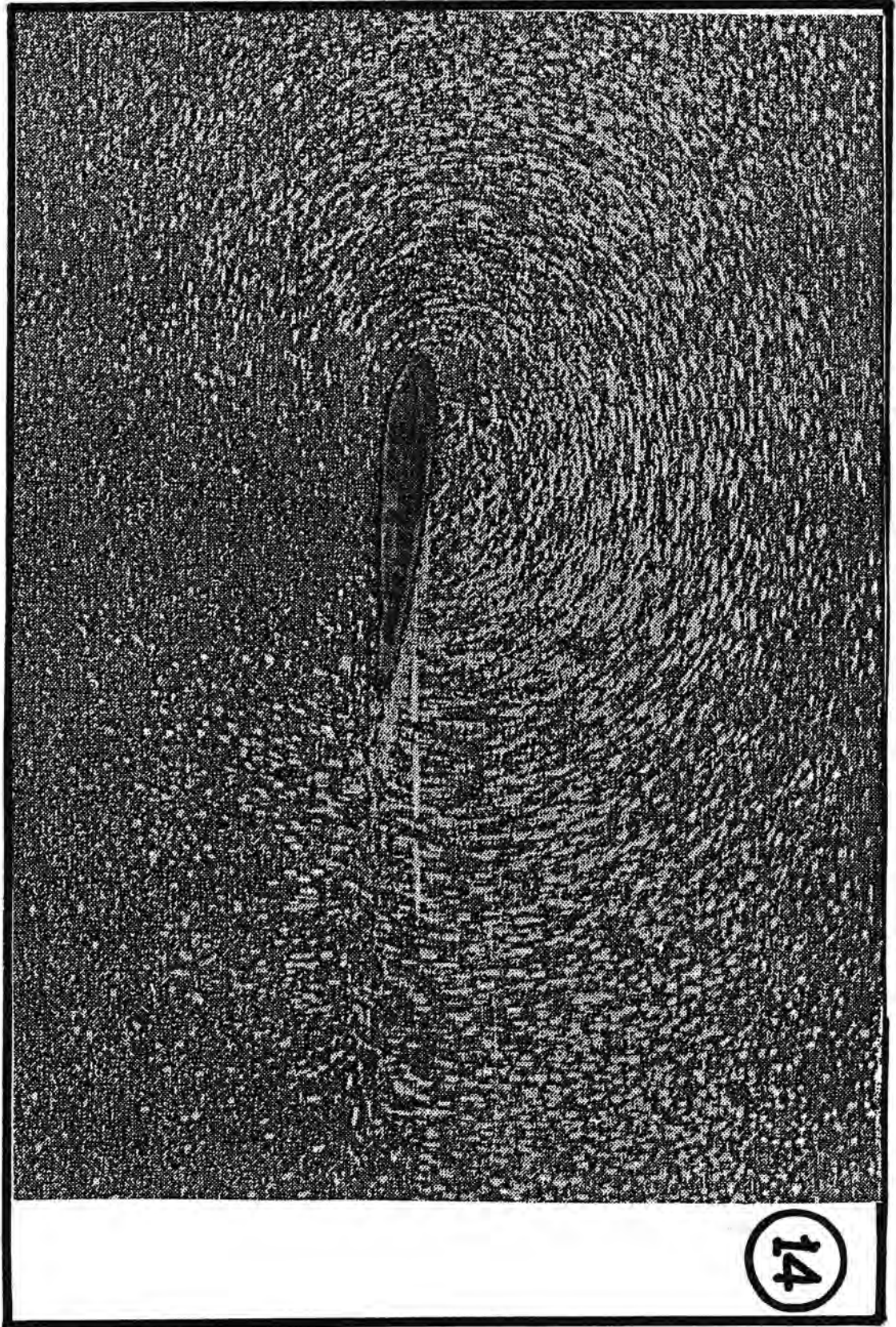
La deflessione (intensità e direzione) come appare nella galleria del vento e ad un osservatore a terra: in linea generale ϵ (epsilon) \approx α (alpha).

Se si rendessero visibili le molecole d'aria,
ecco una possibile istantanea scattata da
un osservatore a terra; sopra l'ala, come si ve
c'è molto più movimento che non sotto.

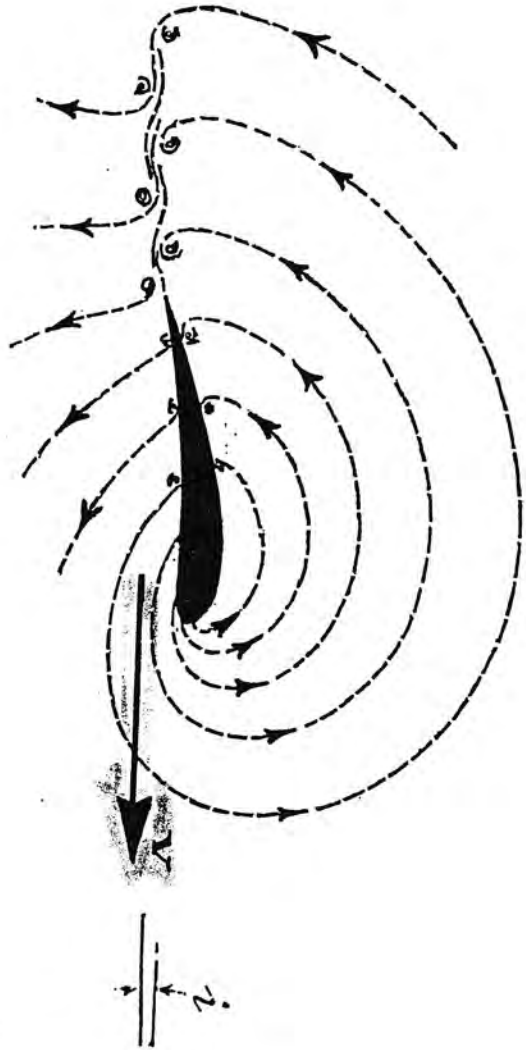




Se le molecole d'aria fossero visibili, un osservatore immobile vedrebbe la *circolazione* attorno all'ala in movimento (come nella FIG. 5. 8j); se si muovesse assieme all'ala, vedrebbe il flusso traslatorio con *infiessione* e *depressione*.

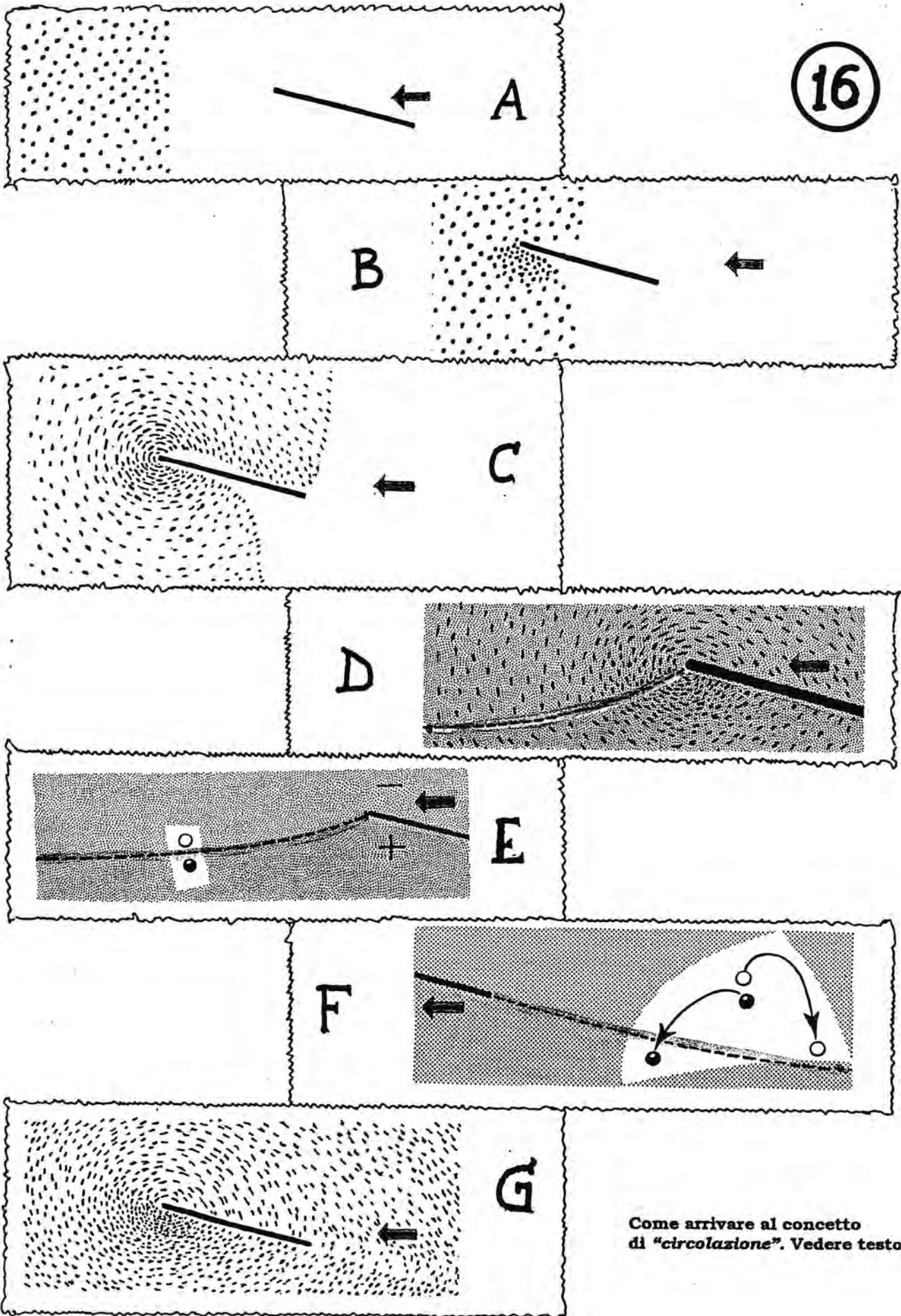


14



Rappresentazione della circolazione in un classico testo degli anni 30

16



Come arrivare al concetto di "circolazione". Vedere testo.

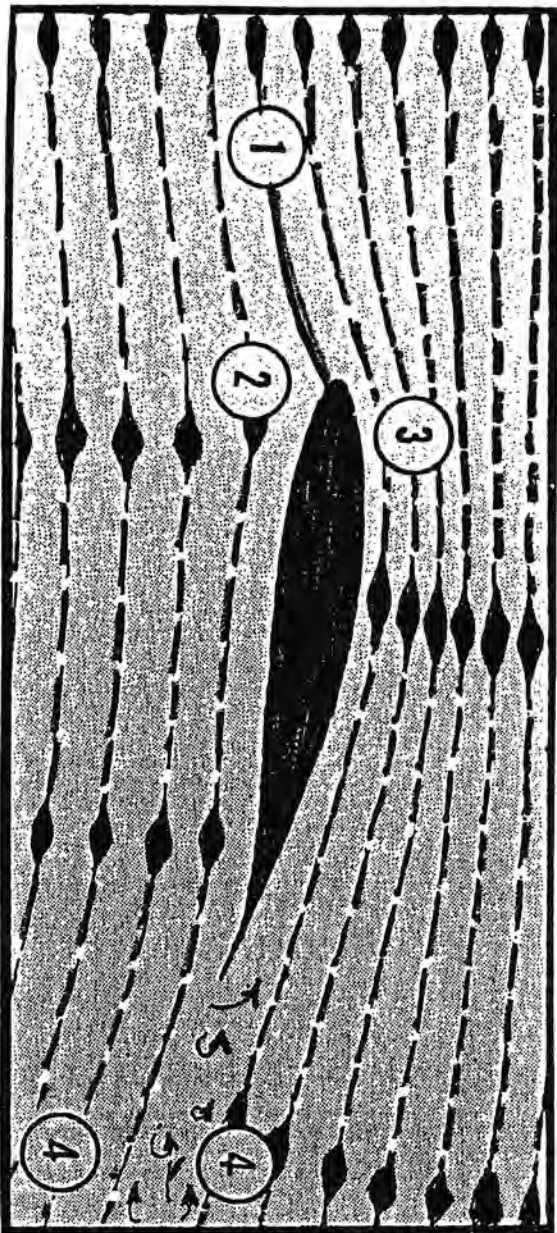
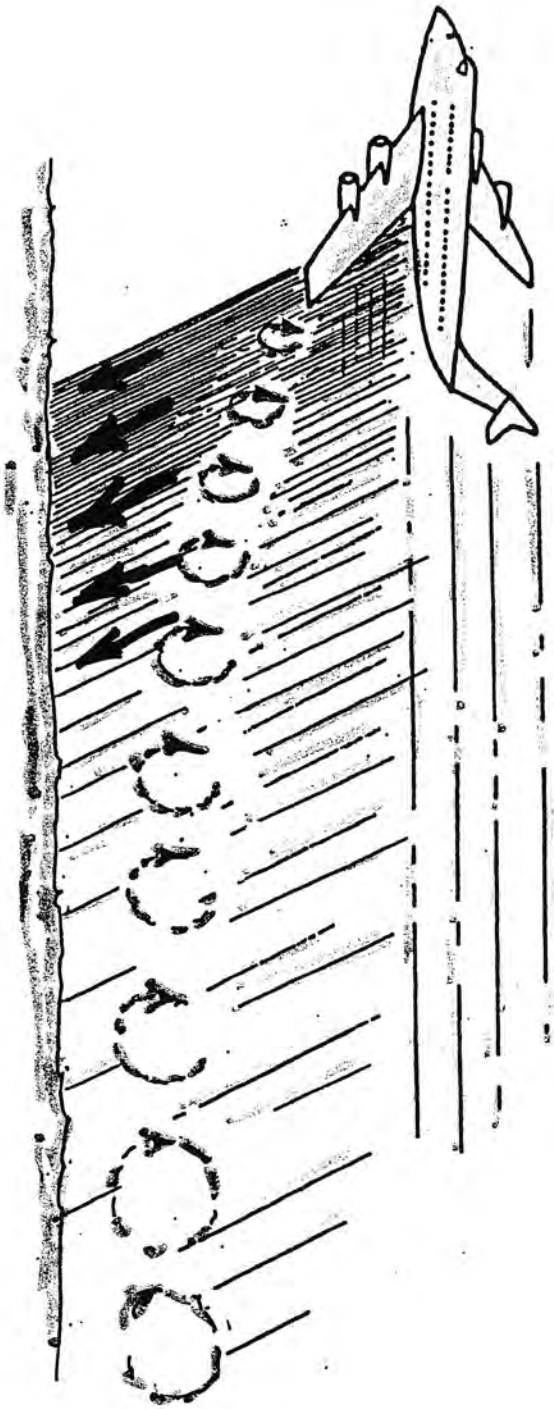


FIG.5.5
Le nuvolette di fumo sotto al profilo rallentano cospicuamente.

18





Oltre ai vortici d'estremità, che si esauriscono allontanandosi dall'ala, l'ala scaraventa continuamente in basso una grande quantità d'aria. L'effetto pratico equivale a quello del "wind shear".