

1. uaso luv.

722

Δ C

8/690

~~2261~~
f.w.

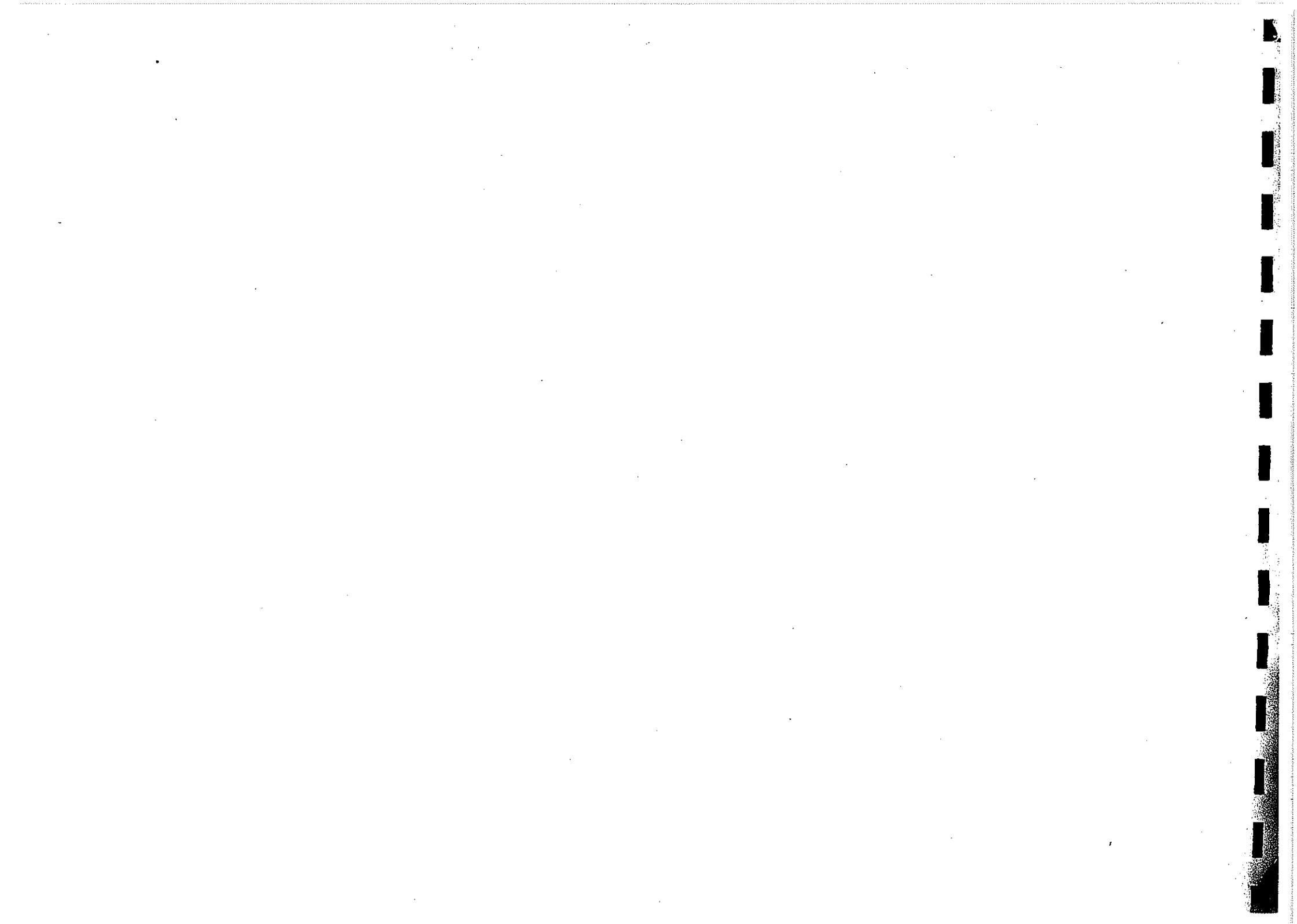
Biblioteca di Monografie Scientifiche

Profili veloci



ZANICHELLI BOLOGNA

L. 800



*Titolo originale Shape and Flow.
Copyright © 1961 Educational Service Incorporated*

L'edizione originale di questa opera fa parte della « Science Study Series » pubblicata dalla Anchor Books Doubleday & Company, Inc., Garden City, New York

*Traduzione di Laura Felici
Copyright © 1965 Nicola Zanichelli S.p.A., Bologna*

Prima ristampa 1968.

Le fotografie riprodotte in questo libro sono state pubblicate per gentile concessione di: Wide World Photo [figura 1(2), 1(3) e 1(7)]; U. S. Air Force, fotografia di Ficarrotta [figura 1(5)]; A. Devaney, Inc. [figura 1(6)]; George Daffin Cope, Esi [figura 13]; National Aeronautics and Space Administration [figura 37]; L. Prandtl, Göttingen [figura 79]; F.N.M. Brown, Università di Notre Dame [figura 81]. L'apparecchio della figura 28 è stato gentilmente messo a disposizione dalla Brookfield Engineering Co.

Le fotografie eseguite con una macchina fotografica polaroid da R. Paul Larkin sono tratte dal film di Abraham Morochnik della Educational Service Inc.

Ascher H. Shapiro

Profili veloci

La resistenza al moto nei fluidi



Zanichelli Bologna

- p. 9 **Prefazione**
- 11 **1 Introduzione**
I nostri scopi. Come si genera la resistenza del mezzo.
- 18 **2 Alcuni esperimenti paradossali**
La galleria del vento. Primo esperimento: come varia la resistenza di una sfera al variare della velocità. Secondo esperimento: confronto tra le resistenze di due sfere, l'una levigata e l'altra leggermente ruvida. Terzo esperimento: forme aerodinamiche in un fluido scarsamente viscoso. Quarto esperimento: forme aerodinamiche in un fluido molto viscoso. Riepilogo dei paradossi.
- 35 **3 Idee e principi fondamentali della dinamica dei fluidi**
Il modello di un fluido continuo. Forze che agiscono sulle particelle fluide. Forze di massa o di campo. Forze di superficie. Forze di superficie dovute a sollecitazioni normali, o pressioni. Sollecitazioni tangenziali dovute alla resistenza viscosa alla deformazione. Definizione della viscosità. La condizione di assenza di scorrimento. Effetto della pressione sull'attrito viscoso. La legge del moto di Newton. La similitudine dinamica e il Numero di Reynolds. Come si giunge al Numero di Reynolds. Un esperimento sulla similitudine dinamica. Altri significati del Numero di Reynolds. Forze che agiscono sugli oggetti.
- 70 **4 Correnti viscosi a basso Numero di Reynolds**
Esempi di materiali molto viscosi. Estensione del concetto di comportamento molto viscoso. Legge di Resistenza di Stokes per valori molto bassi del Numero di Reynolds. Effetti della densità del fluido.
- 85 **5 La Legge di Resistenza per alti Numeri di Reynolds**
Esperimenti sugli effetti della velocità sulla resistenza. La legge della similitudine dinamica che mette in rapporto il coefficiente di resistenza e il Numero di Reynolds. La similitudine dinamica base delle prove su modelli.

p. 93 **6 Lo strato limite viscoso**

Che importanza ha la viscosità ad alti Numeri di Reynolds? Lo strato limite. Effetto del Numero di Reynolds sullo sviluppo dello strato limite.

106 **7 Corrente laminare e corrente turbolenta**113 **8 Riduzione della resistenza per mezzo dell'affusolamento**

Esperimenti sull'affusolamento. Il principio di Bernoulli per il moto di un fluido non viscoso. Effetto della viscosità sulla distribuzione della pressione. Stallo dello strato limite dovuto a un gradiente di pressione avverso. Resistenza di forme aerodinamiche e non aerodinamiche. Lo strato limite: visualizzazione del fenomeno. Spiegazione degli esperimenti sull'affusolamento. Chi è più abile costruttore di forme aerodinamiche: la Natura o l'Uomo?

140 **9 Spiegazione dei paradossi**

Perché, quando il Numero di Reynolds è basso, l'affusolamento accresce la resistenza. Perché un aumento di velocità riduce talvolta la resistenza. Perché la rugosità talvolta riduce la resistenza.

153 **Indice analitico****Prefazione**

Questo libriccino è la rielaborazione di un film intitolato « *La Dinamica della Resistenza al Moto nei Fluidi* » (*The Fluid Dynamics of Drag*) diretto da Quentin Brown e prodotto dalla *Educational Service Incorporated, Watertown, Massachusetts*. Il film e il libro si ripromettono lo stesso scopo: esporre in modo chiaro alcune idee fondamentali sulla dinamica dei fluidi servendosi di un gran numero di curiosi esperimenti sulla resistenza al moto. Il libro conserva lo stile del film, basato sull'esecuzione di esperimenti, e contiene molte fotografie tratte da esso, ma, sebbene sia palesemente una trasposizione del film, la presentazione e gli esempi sono stati adattati agli interessi di quei lettori che non abbiano una specifica preparazione scientifica o tecnica. Ringrazio Quentin Brown per le lunghe e utili discussioni prima e durante la ripresa del film; la *Brookfield Engineering Company* per gli apparecchi messi a disposizione; la *National Aeronautics and Space Administration* per le fotografie. Molto debbo a Ludwig Prandtl per le sue ormai classiche sequenze cinematografiche di trenta anni fa e per l'ispirazione che ho tratto dal suo stile: ringrazio Paul Larkin per l'abilità e la sensibilità artistica con cui ha curato le illustrazioni, e John H. Durston per gli utili consigli e l'aiuto in campo editoriale.

ASCHER H. SHAPIRO

Arlington, Massachusetts
Dicembre 1960

1 Introduzione

Tutte le persone e gli oggetti che si vedono nelle otto fotografie della figura 1 — un nuotatore subacqueo, una nave, un paracadutista che sta scendendo, una barca a vela, un uragano, un razzo, uno sciatore acquatico, uno scoglio in mezzo a una corrente vorticosa — hanno una cosa in comune: alcuni oggetti, grandi o piccoli, stanno muovendosi attraverso un gas o un liquido, oppure è il fluido che si muove intorno agli oggetti. In ognuna di queste scene l'oggetto in movimento, nel suo moto attraverso il fluido, incontra una certa resistenza, che si chiama *resistenza del mezzo*. In ciascun caso deve essere applicata un'altra forza per vincere questa resistenza — come la tensione sulla fune a cui si aggrappa lo sciatore acquatico — altrimenti l'oggetto rallenta, perde velocità.

I *fluidi* comprendono sia i gas sia i liquidi. La *dinamica dei fluidi* si occupa dei fluidi in movimento. Quando i liquidi e i gas si muovono, quali forze applicano *agli* oggetti? E, viceversa, come si muovono i fluidi sotto l'azione delle forze applicate loro *dagli* oggetti? Poiché intorno a noi e nella nostra società industriale ritroviamo ovunque liquidi e gas, questi problemi fondamentali, che costituiscono l'argomento della dinamica dei fluidi, entrano in mille modi in ogni aspetto della vita e della tecnologia.

Prima del famoso esperimento che si dice Galileo abbia fatto dalla Torre Pendente di Pisa, i dotti credevano che una piuma cadesse più lentamente di una sfera di metallo perché pesa meno; oggi sappiamo che le cose stanno diversamente: la piuma cade più lentamente perché, in confronto ai loro pesi rispettivi, la resistenza dell'aria che si oppone al moto della piuma è molto maggiore di quella che si oppone al moto della sfera di metallo. Possiamo dimostrarlo lasciando cadere simultaneamente una piuma e una sfera d'acciaio in un tubo verticale da cui l'aria sia stata eliminata quasi del tutto: se le lasciamo andare contemporaneamente, la piuma

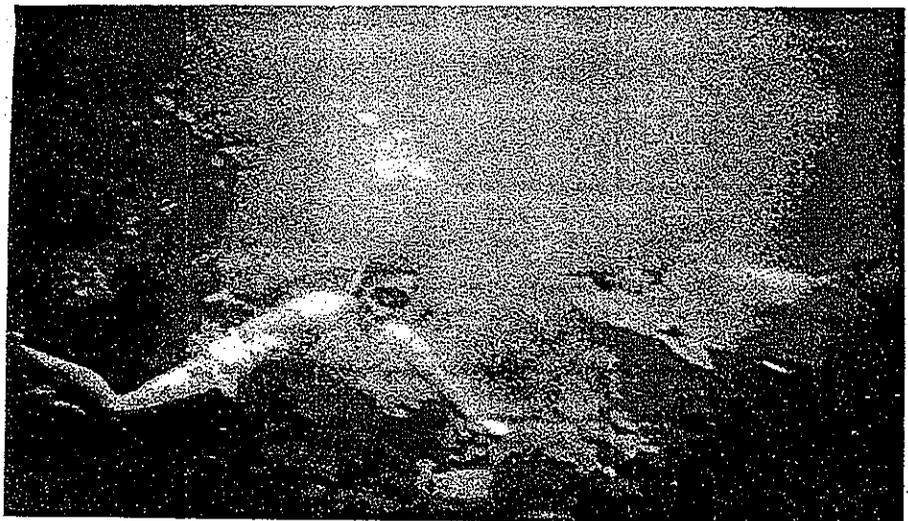
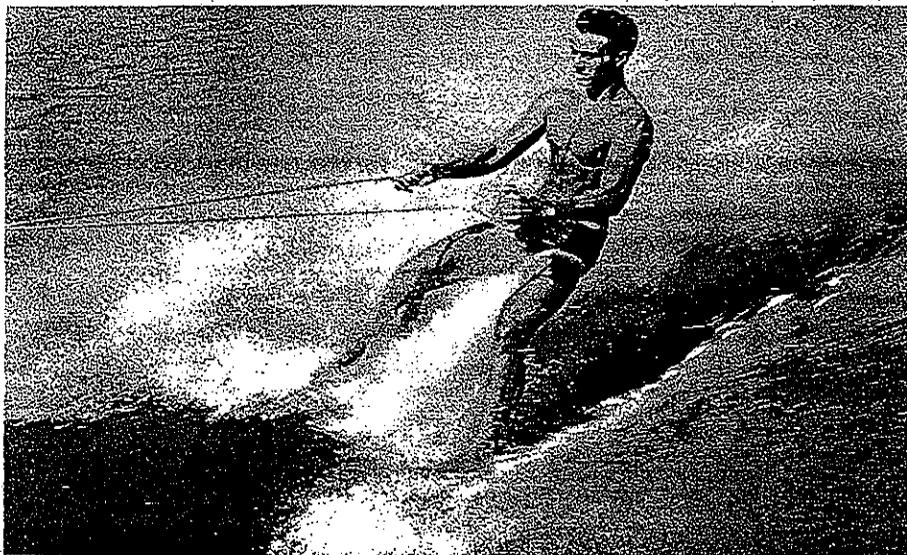
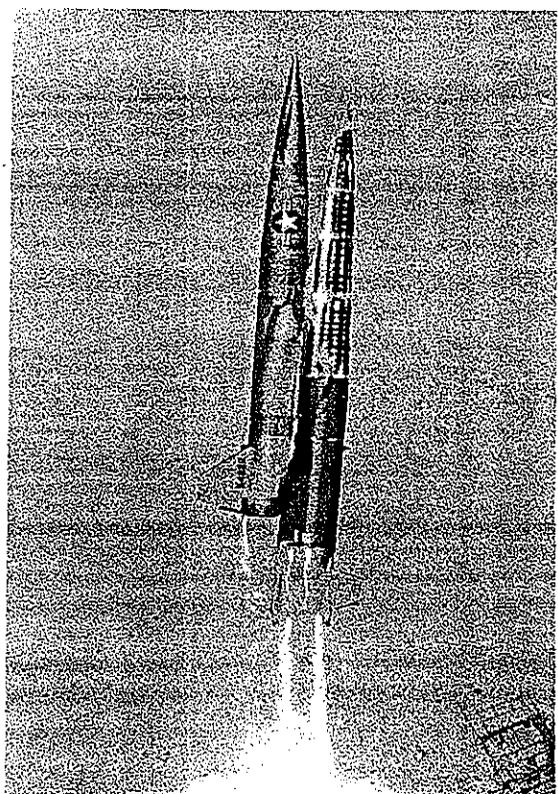
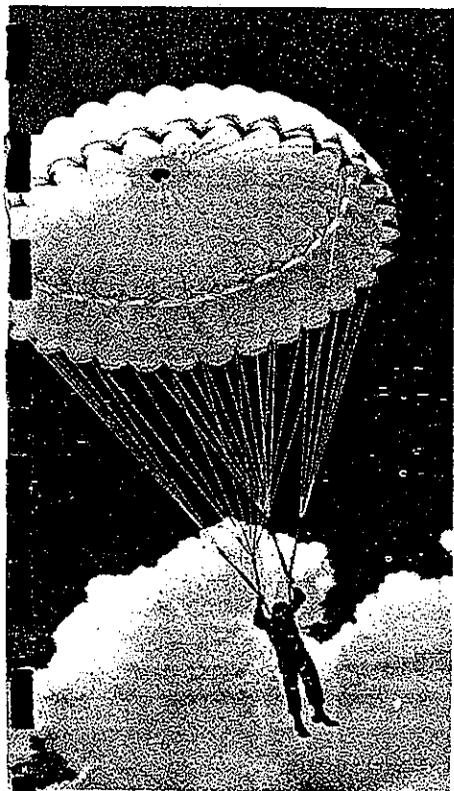
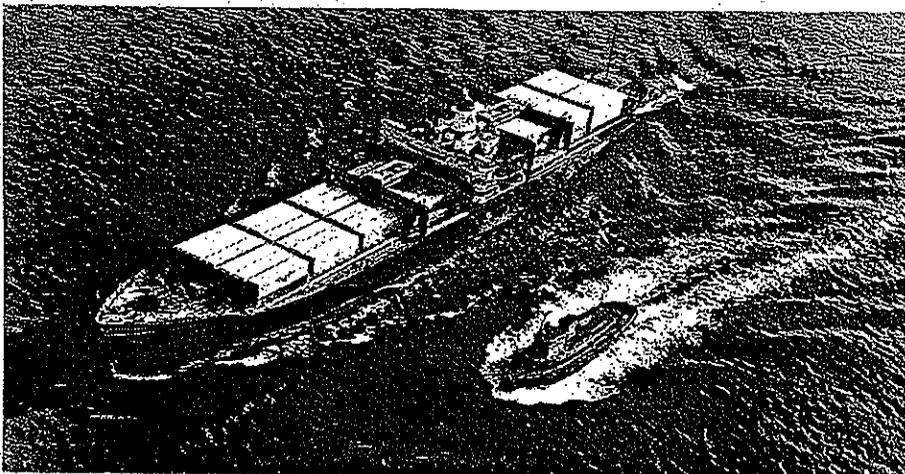
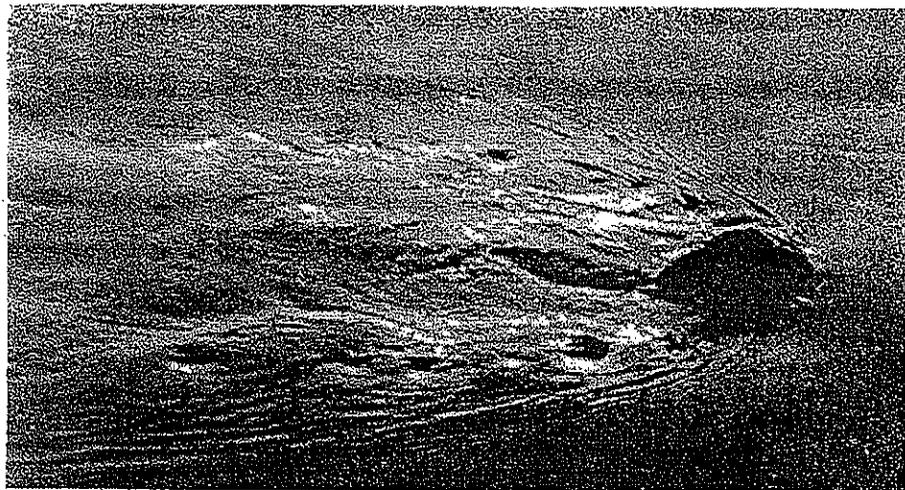


Fig. 1. La dinamica dei fluidi — cioè l'insieme delle relazioni esistenti tra forze e movimenti nei liquidi e nei gas — governa una quantità stupefacente di situazioni diverse.





raggiunge il fondo nello stesso momento della sfera d'acciaio.

È un fatto che la velocità di caduta nel vuoto è la stessa per tutti i corpi indipendentemente dalle dimensioni, dalla forma, dal materiale e dal peso: quando si elimina l'aria (e la sua resistenza), sia la piuma sia la sfera d'acciaio cadono liberamente con l'accelerazione di gravità. Peccato che gli antichi Greci non sapessero ottenere il vuoto per eseguire esperimenti come questo: avrebbero potuto scoprire i principi della meccanica 1500 anni prima di Newton. I Greci credevano che per mantenere un corpo in movimento con una velocità costante fosse necessario esercitare *continuamente* su di esso una forza per spingerlo. Ma il primo grande principio della dinamica proclamato da Isaac Newton ci insegna che quando un corpo si muove con una velocità costante non può esserci alcuna forza risultante che agisca su di esso. I Greci avevano dovuto accontentarsi di osservare come volavano pietre, frecce e altri oggetti simili; non si resero conto che l'aria, sebbene invisibile e impalpabile, esercita una forza di resistenza che rallenta il proiettile scagliato, a meno che gli sia fornita una forza esterna supplementare per controbilanciare la resistenza del mezzo e creare in tal modo una situazione in cui *la risultante* delle forze sia zero. Solamente trecento anni fa si sono cominciate ad avere delle nozioni, sia pure molto approssimative, sui fluidi in movimento. Nel secolo scorso, però, sono stati fatti progressi straordinari nella comprensione dei principi fondamentali della dinamica dei fluidi.

I nostri scopi.

Uno scopo di questo libro è dare alcune informazioni interessanti sulla resistenza al moto nei fluidi, servendoci soprattutto di esperimenti. Esamineremo corpi di molte forme diverse — forme aerodinamiche e non aerodinamiche, corpi con superfici ruvide e con superfici levigate, corpi a forma di fusoliera e a forma d'ala — e ci occuperemo di molti fluidi diversi: gas, liquidi, fluidi ad alta viscosità, fluidi a bassa viscosità, fluidi molto densi e fluidi molto rarefatti. In ogni ramo della tecnica è importante conoscere ed essere capaci di prevedere la resistenza dei fluidi al moto. Quale sforzo di

trazione è richiesto all'apparato motore che fa avanzare una nave o un aeroplano? Che dimensioni deve avere un paracadute per rendere sicura la discesa? Che forma devono avere le pale di un'elica o di un compressore di motore a reazione per incontrare la minima resistenza? Quale sarà la decelerazione di un satellite terrestre quando rientra nell'atmosfera? Con quale velocità filtrerà il petrolio nel sottosuolo attraverso un letto di sabbia? Quanto debbono essere grandi le tubazioni in una raffineria di petrolio? Quanta acqua può essere convogliata attraverso una condotta aperta proveniente da un bacino sulla montagna? È evidente che si tratta di problemi di grande interesse pratico e potete trovarne molti altri simili che hanno tutti a che fare con la resistenza dei fluidi.

Presi uno a uno gli esperimenti che faremo non sembrano inquadarsi in nessun tipo preciso di comportamento: anzi, alcune osservazioni sono paradossali e sembrano rivelare soltanto un comportamento caotico. Questo ci porta al nostro secondo e più importante obiettivo, mostrare cioè come si possa ricavare un ordine da un apparente caos attraverso la comprensione di un numero relativamente piccolo di concetti fondamentali e di principi fisici. In altre parole, ci serviremo degli esperimenti sulla resistenza del mezzo per esaminare le basi della dinamica dei fluidi.

Come si genera la resistenza del mezzo.

Tra i vari fattori che possono dare origine alla resistenza esamineremo in questo libro soltanto la viscosità. Questo limita la trattazione ai fluidi con densità costante, a circostanze in cui non vi sia una superficie libera su cui le onde possano propagarsi e a corpi su cui non agiscano forze che tendano a sollevarli in direzione perpendicolare alla corrente. È tuttavia importante sapere che una resistenza del mezzo può originarsi in altri modi:

1. Una nave muovendosi attraverso l'acqua trasporta con sé un sistema di onde di gravità che si estende continuamente e irradia energia cinetica e potenziale fino a grande distanza nel mare. Per fornire questa energia al mare la nave che si muove deve compiere un lavoro meccanico tramite l'azione di una forza applicata all'acqua. La forza uguale e

opposta applicata dall'acqua alla nave è la cosiddetta « resistenza d'onda ».

2. Un aeroplano che viaggi a velocità supersonica o a un'alta velocità subsonica trasporta un sistema di onde di pressione che, in modo del tutto analogo al sistema di onde di gravità della nave, irradia energia nell'oceano d'aria. Questa energia è fornita in continuazione dalla forza che l'aeroplano in movimento applica all'aria. La reazione uguale e contraria a questa forza è la « resistenza d'onda supersonica ».

3. Un'ala portante, di apertura finita, emette dalle estremità dei « vortici di uscita », visibili talvolta sugli aeroplani in certe condizioni di umidità atmosferica. Questi vortici di uscita, che vanno sempre più allungandosi, contengono energia cinetica. Perché questa energia cinetica sia fornita con continuità all'aria attraverso cui l'ala passa occorre che le ali operino sull'aria applicando una forza. La reazione a questa forza è la « resistenza indotta dovuta alla portanza ».

È bene notare fin dall'inizio come per il moto relativo e la resistenza sia indifferente che un corpo si muova a velocità uniforme attraverso un mare di fluido stagnante o che una grande massa di fluido scorra intorno al corpo, come in una galleria del vento. Di conseguenza in alcuni nostri esperimenti il modello starà fermo in mezzo a una corrente in movimento, laddove in altri il modello si muoverà in un fluido immobile. Le due condizioni sono equivalenti e i risultati degli esperimenti possono essere interpretati senza tener conto di quale dei due metodi sperimentali sia stato usato.

Questo passaggio dell'osservatore da un punto di vista in cui fa riferimento al corpo a uno in cui fa riferimento al fluido si chiama « trasformazione di Galileo ». Di solito all'osservatore conviene muoversi in modo solidale con il corpo, perché allora la corrente che fluisce intorno al corpo è la stessa in ogni istante. Potete vedere quanto sia più semplice eseguire esperimenti su un modellino di aeroplano fisso in una galleria del vento anziché su un modello d'aeroplano che si muova attraverso un dispositivo di prova.

2 Alcuni esperimenti paradossali

Cominciamo con una serie di quattro esperimenti, scelti a posta per trarne una morale: che le osservazioni sperimentali sono inspiegabili finché non si interpretano in base ai principi fondamentali della dinamica dei fluidi.

La galleria del vento.

La figura 2 mostra la piccola galleria del vento usata in molti di questi esperimenti. Un getto d'aria sfugge verso l'alto attraverso l'ugello, dalla sottostante camera di raccolta, a velocità regolabili, che giungono fino a 230 miglia (circa 370 chilometri) all'ora. Un compressore a motore fornisce alla camera aria sotto pressione. Possiamo sospendere nel getto d'aria, a un'estremità della leva, dei modelli; come la sfera della figura 2. Cuscinetti a sfere funzionano da fulcro (fig. 3). La resistenza dell'aria, forza diretta verso l'alto che agisce sul modello quando si trova nel getto d'aria, viene trasmessa dal braccio della leva, come una forza di trazione verso il basso, alla molla della bilancia posta all'altra estremità. I contrappesi sul braccio sono messi in modo che, quando il modello è al suo posto e non v'è corrente d'aria, l'indice sul quadrante della bilancia segni zero.

La pressione nella camera di raccolta è superiore alla pressione atmosferica e questa differenza determina la velocità del getto. Un pezzo di tubo flessibile trasmette la pressione della camera di raccolta a un ramo di un manometro a U contenente acqua colorata (fig. 4); l'altro ramo è aperto all'atmosfera. La differenza di pressione squilibra le colonne d'acqua nei due rami, e il ramo aperto è graduato in modo che il livello dell'acqua indichi la velocità del vento direttamente in miglia all'ora.

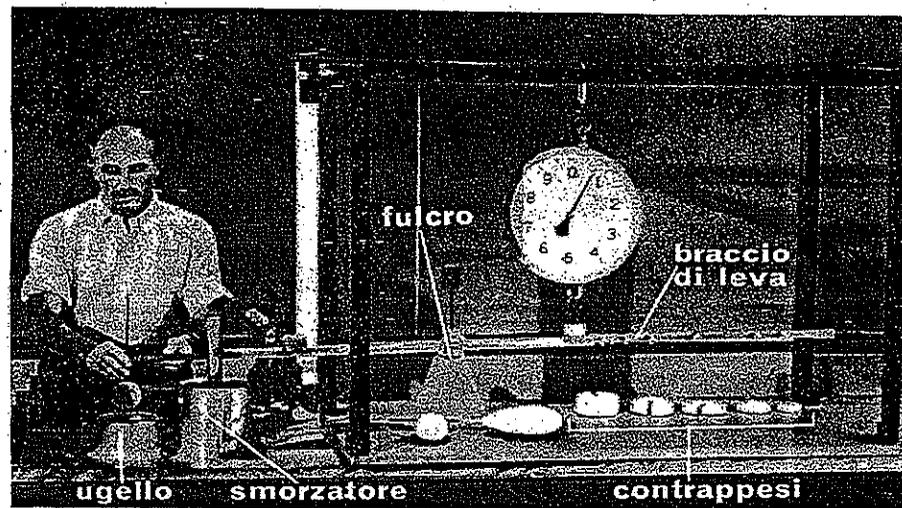


Fig. 2. L'impianto completo della galleria del vento. Vicino all'estremità del braccio di leva tengo con la mano un modello, una sfera. Sotto il modello, diretto verso l'alto, c'è l'ugello attraverso cui l'aria sfugge dalla camera di raccolta (posta sotto il tavolo) nell'atmosfera. Sotto la mia mano sinistra vi è lo smorzatore viscoso. Si vedono anche la leva, il fulcro, il quadrante su cui si leggono le forze, e i contrappesi.

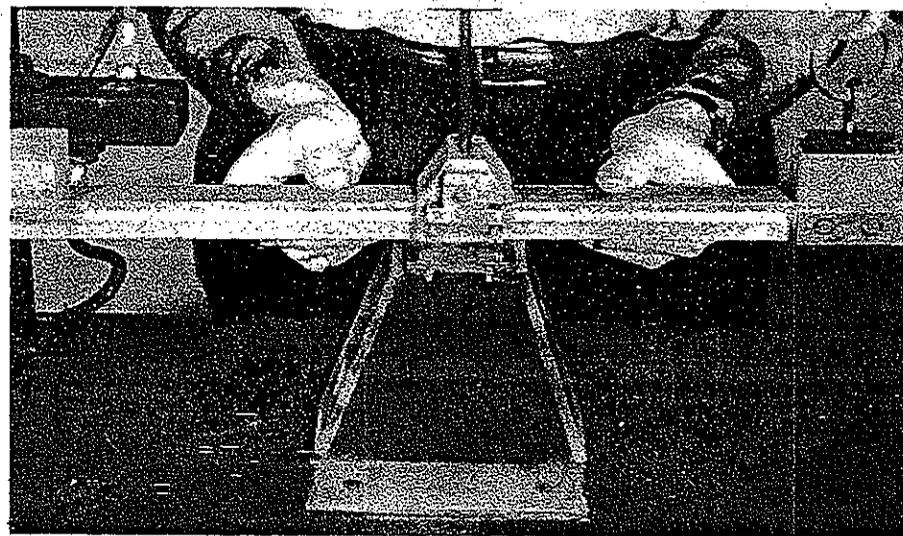


Fig. 3. Fulcro con cuscinetti a sfere.

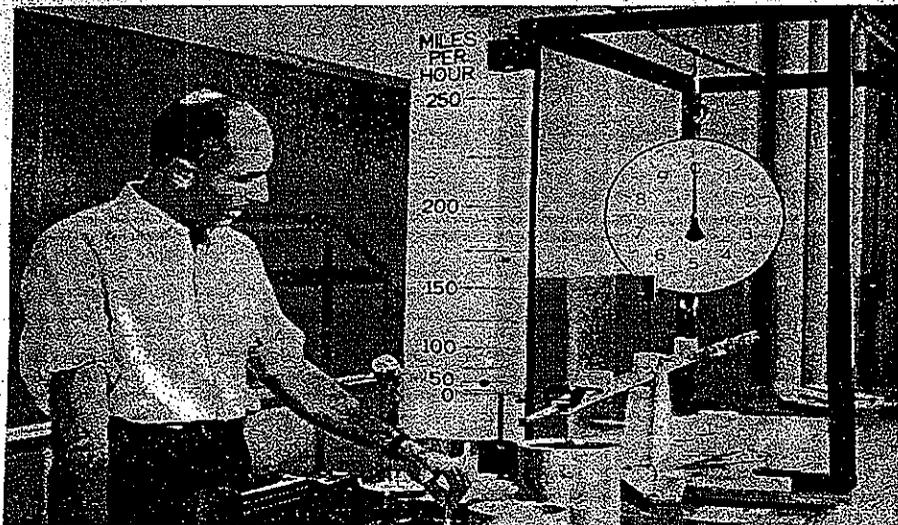


Fig. 4. La mia mano poggia sul tubo che porta la pressione dell'aria contenuta nella camera di raccolta a un ramo invisibile del manometro a U tarato che si trova dietro la scala delle velocità. Nell'altro ramo, visibile nella fotografia, il livello del liquido indica direttamente la velocità del vento.

Primo esperimento: come varia la resistenza di una sfera al variare della velocità.

Attacciamo al braccio della leva, proprio sopra il getto d'aria, una sfera con un diametro di 3 pollici (circa 7,5 centimetri) (fig. 5). Misuriamo poi la resistenza corrispondente a diversi valori crescenti della velocità dell'aria (fig. 6). A 80 miglia (circa 130 chilometri) all'ora la forza indicata sul quadrante è di circa 1,5 unità. A 100 miglia (circa 160 chilometri) all'ora la resistenza sale a circa 2,4 unità. Facciamo salire la velocità un po' oltre 115 miglia (185 chilometri circa) all'ora e la resistenza raggiunge 3,0 unità. Tutto questo è perfettamente regolare, ed è proprio quello che potevate aspettarvi. Ma, quando la velocità sale oltre 115 miglia, con nostro grande stupore la resistenza comincia a diminuire, e a 140 miglia (circa 225 chilometri) all'ora è solamente di 2,3 unità. Dopo di che ricomincia a salire e a

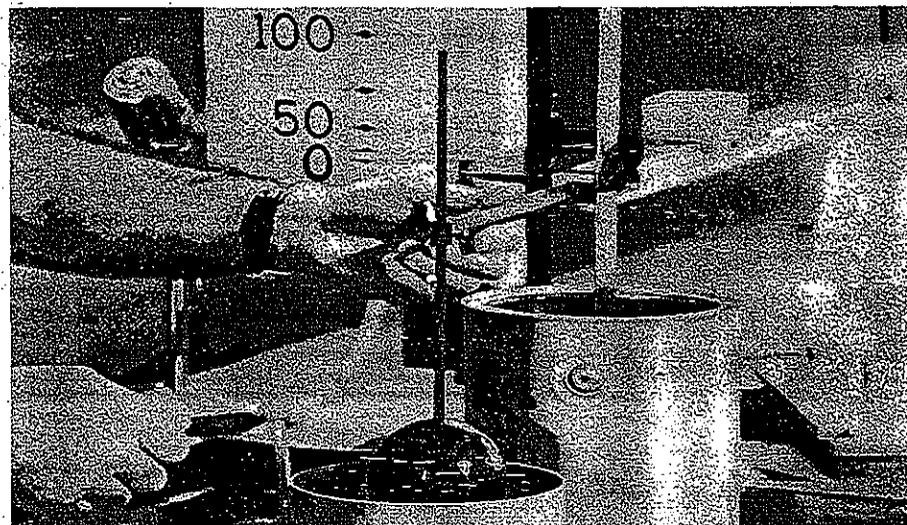


Fig. 5. La sfera montata nel getto d'aria.

155 miglia all'ora (250 chilometri circa) ha raggiunto di nuovo 3,1 unità. Poi la resistenza continua a salire al crescere della velocità, senza altre irregolarità.

Queste osservazioni sono riassunte nel grafico della figura 7, in cui sono riportate la resistenza sull'asse verticale e la velocità del vento su quello orizzontale. All'aumentare della velocità, partendo da zero, anche la resistenza cresce, proprio come accade quando sporgete una mano da un'automobile che accelera. Ma, dopo che la velocità ha raggiunto un certo valore critico, un ulteriore aumento di velocità fa diminuire la resistenza. A questo stadio, inoltre, l'indice sul quadrante che misura la resistenza oscilla violentemente, indicando una certa instabilità. Alla fine raggiungiamo una velocità a cui la resistenza aumenta di nuovo regolarmente con la velocità, seguendo però una curva diversa dal primo tratto di salita regolare.

Sembrano dunque esserci due tipi distinti di scorrimento, con un brusco passaggio dall'uno all'altro che si manifesta in un certo campo di valori della velocità. La resistenza cade improvvisamente quando un aumento anche modesto di velocità fa passare lo scorrimento da un tipo all'altro. In che

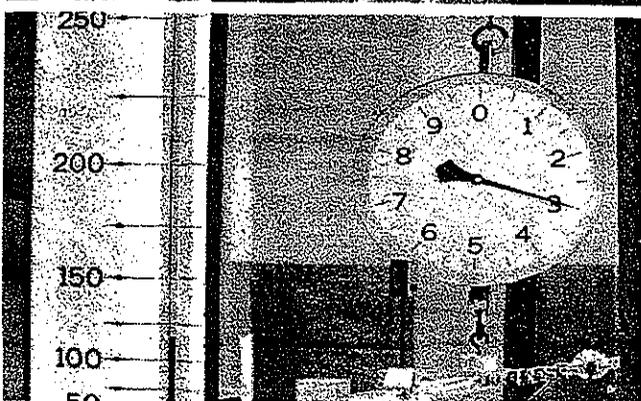
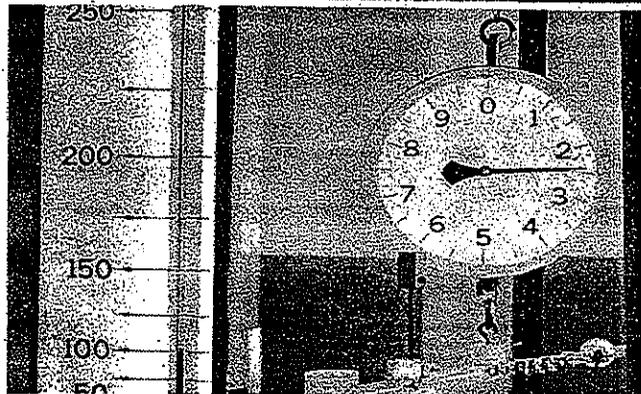
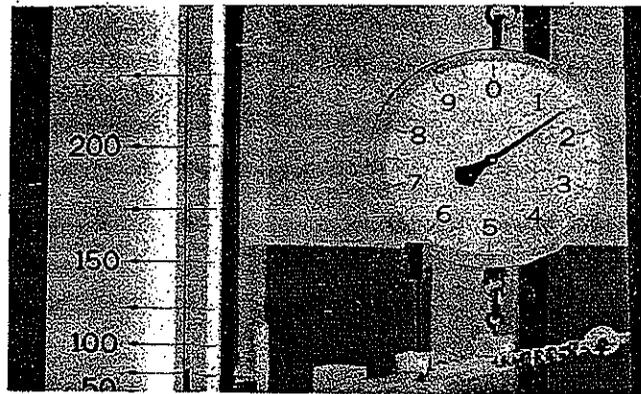


Fig. 6.

Figura	Velocità del vento	Resistenza
6 a	80	1,5
6 b	100	2,4
6 c	115	3,0

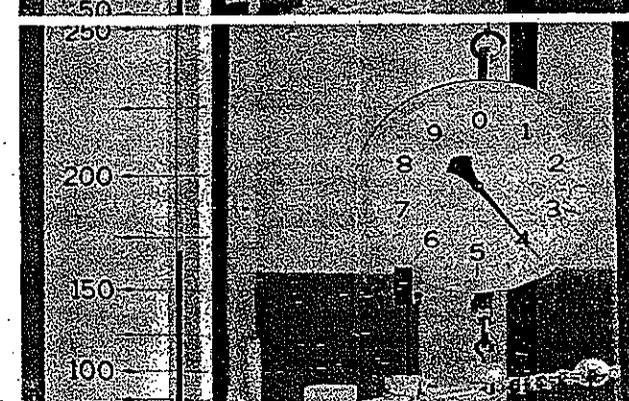
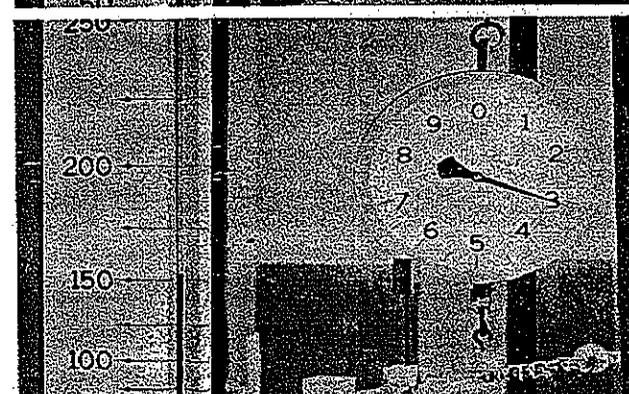
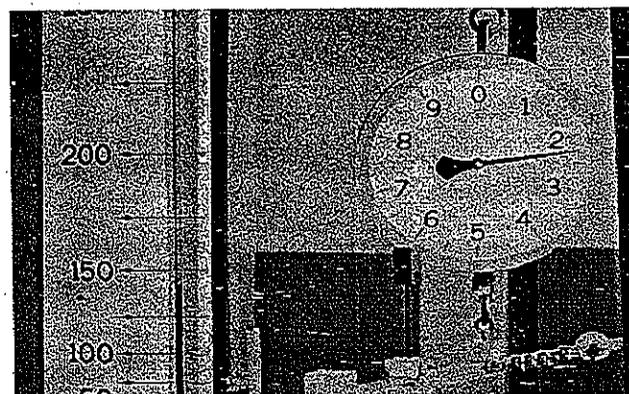


Figura	Velocità del vento	Resistenza
6 d	140	2,3
6 e	155	3,1
6 f	170	4,0

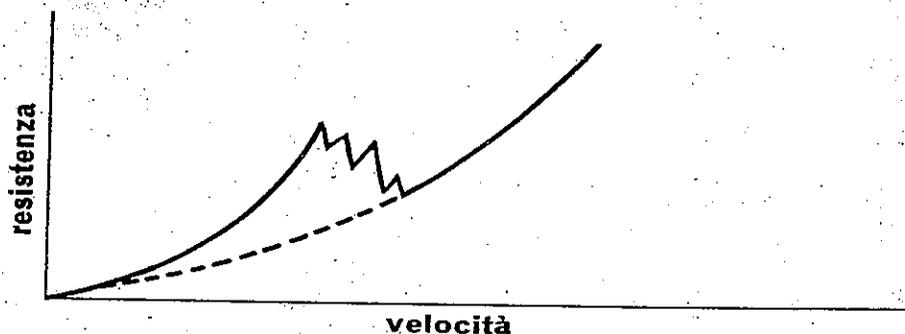


Fig. 7. Grafico riassuntivo degli esperimenti della fig. 6.

consistono questi due tipi? E si può davvero incontrare una resistenza minore a velocità più elevate che a velocità più basse?

Secondo esperimento: confronto tra le resistenze di due sfere, l'una levigata e l'altra leggermente ruvida.

La galleria del vento è stata ora preparata con due ugelli identici che scaricano l'aria dalla camera di raccolta nell'atmosfera (fig. 8): abbiamo così due getti d'aria che hanno esattamente lo stesso diametro e la stessa velocità. In questo esperimento il nostro scopo non è misurare quantitativamente la resistenza, ma semplicemente *confrontare* le resistenze incontrate da due oggetti per un'uguale velocità dell'aria. Gli oggetti sono perciò montati su una bilancia a bracci uguali con il fulcro di cuscinetti a sfere posto a metà strada fra loro. È facile allora vedere quale modello incontra la maggior resistenza semplicemente osservando se la bilancia si inclina da una parte o dall'altra.

I modelli sono due sfere aventi esattamente lo stesso diametro: da lontano sembrerebbero uguali, differiscono tuttavia per un particolare piccolo ma importantissimo: l'una è levigata come vetro, l'altra (fig. 9) ha sulla superficie dei solchi sottilissimi e una bassa striscia circolare di sottile nastro adesivo. Mai vi aspettereste che queste leggere rugosità su una superficie altrimenti liscia come il vetro potessero

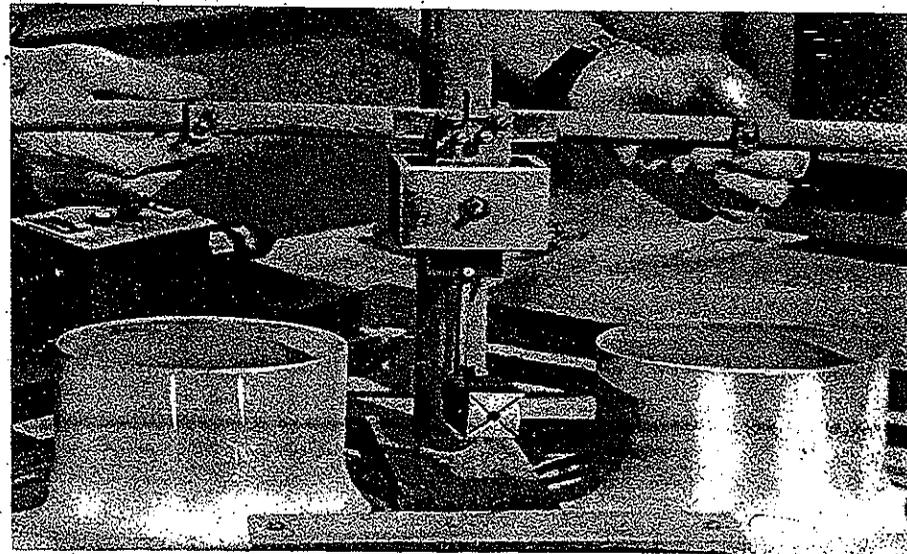


Fig. 8. Le mie mani toccano i sostegni per i due modelli posti sulla leva a uguali distanze dal fulcro e sistemati proprio sopra il centro di ogni getto.

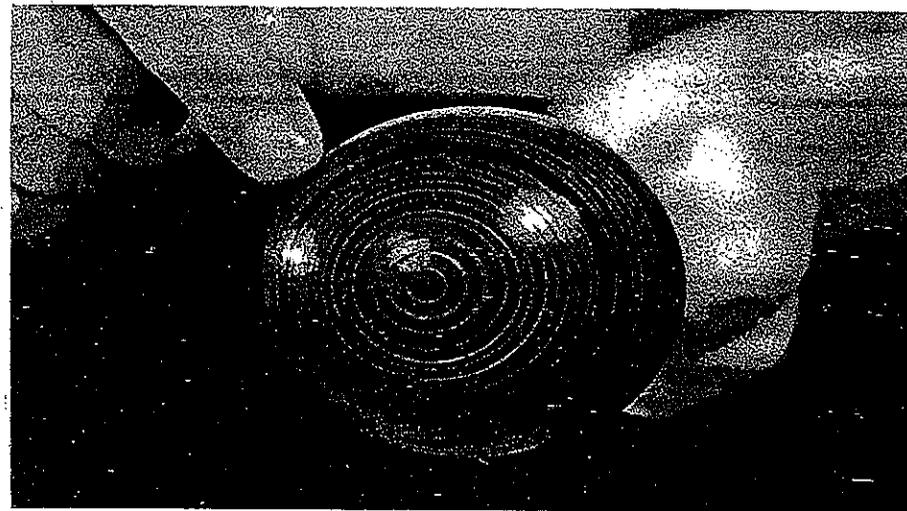


Fig. 9. La sfera leggermente ruvida: le scalfitture hanno uno spessore di 75 millesimi di millimetro soltanto e la striscia di plastica che indico con il dito ha uno spessore di soli 0,25 millimetri.

rappresentare un gran cambiamento per la corrente d'aria o la resistenza.

Dopo aver montato le sfere, e prima di far uscire la corrente d'aria, equilibriamo la bilancia in modo che il giogo sia orizzontale. Appena la corrente d'aria comincia a uscire, con una velocità ancora bassa, il giogo si inclina come nella figura 10a, indicando che la sfera levigata fa meno resistenza. All'aumentare della velocità il giogo si inclina sempre più in questa direzione, ma a una velocità di circa 125 miglia (pressappoco 200 chilometri) all'ora all'improvviso ruota decisamente nell'altra direzione (fig. 10b), indicando che è la sfera ruvida a offrire adesso meno resistenza. Al crescere della velocità oltre le 125 miglia all'ora la sfera ruvida continua a offrire meno resistenza di quella levigata almeno fino alla velocità massima da noi raggiunta, di 200 miglia (circa 320 chilometri) all'ora. Riducendo la velocità troviamo di nuovo un'inversione delle resistenze relative a circa 125 miglia all'ora.

Possiamo congetturare che a questa velocità critica ci sia stato un cambiamento radicale nella configurazione della corrente d'aria intorno a una delle sfere, e forse intorno a entrambe. Il nostro primo esperimento (fig. 6 e fig. 7) fa ritenere che in questo secondo esperimento ci sia stata un'improvvisa riduzione della resistenza della sfera ruvida, ma resta da spiegare perché questo sia accaduto e perché non sia accaduto anche alla sfera levigata.

Se è sorprendente che la scabrosità della superficie talvolta faccia diminuire la resistenza è ancor più sorprendente scoprire, attraverso le misure quantitative sul quadrante della bilancia, che a certe velocità la resistenza della sfera ruvida è soltanto un quinto circa della resistenza di quella levigata! Abbiamo la tendenza a pensare che nel dominio dei fenomeni naturali a piccoli cambiamenti di circostanze corrispondano altrettanto piccoli cambiamenti di comportamento. Come può allora una causa tanto piccola, come una scabrosità a mala pena percettibile al tatto, produrre conseguenze così grandi come ridurre di cinque volte la resistenza?

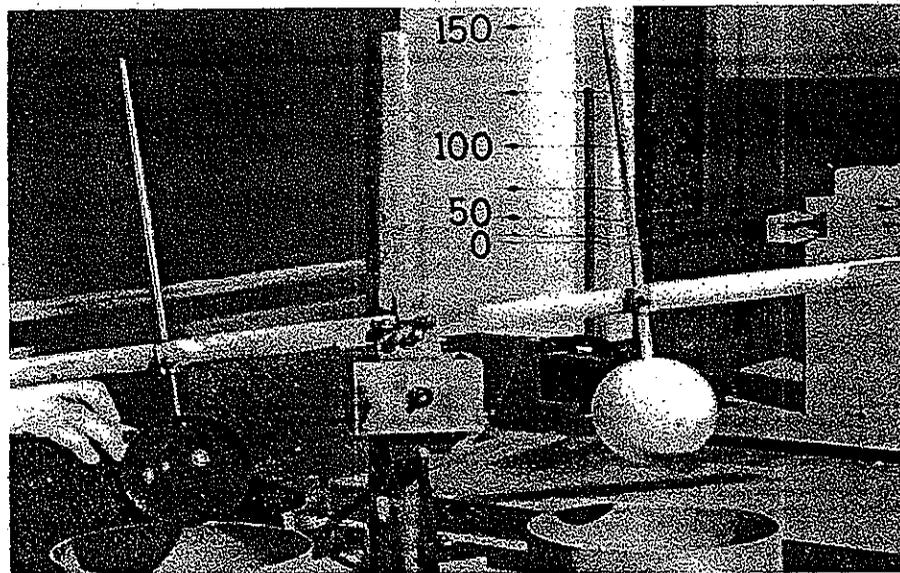
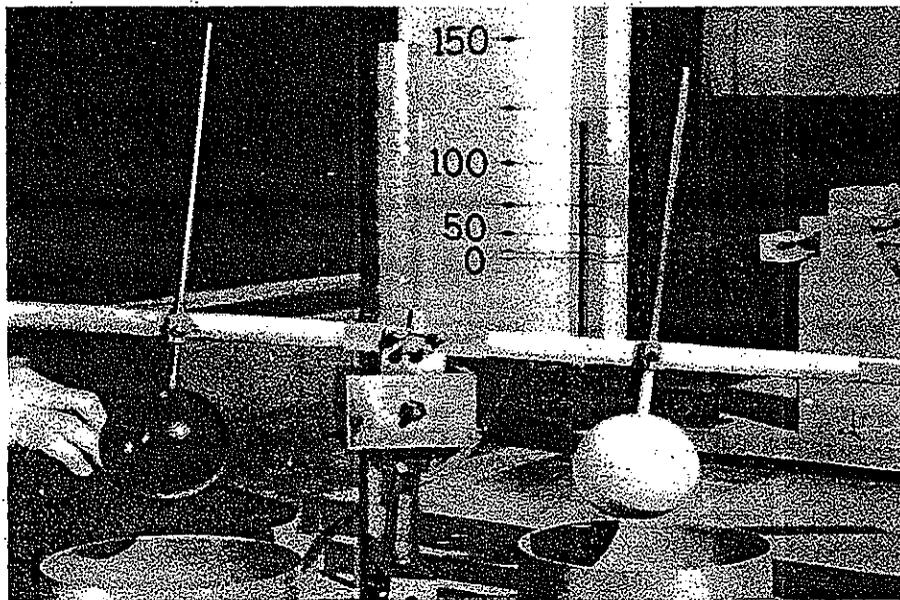


Fig. 10. (a) A velocità basse, in questo caso 120 miglia (190 chilometri circa) all'ora, la sfera di destra, levigata, incontra meno resistenza della sfera di sinistra, leggermente ruvida. (b) Oltre una certa velocità critica, in questo caso 125 miglia (200 chilometri circa) all'ora, la resistenza della sfera rugosa diventa bruscamente inferiore a quella della sfera levigata.

Terzo esperimento: forme aerodinamiche in un fluido scarsamente viscoso.

Descriveremo ora due esperimenti correlati: l'uno nell'aria e l'altro nella glicerina. Aria e glicerina differiscono enormemente per la « viscosità », cioè per la resistenza di attrito interna che oppongono a essere penetrate e a mutar forma: la glicerina, come il miele, quando è versata da un barattolo

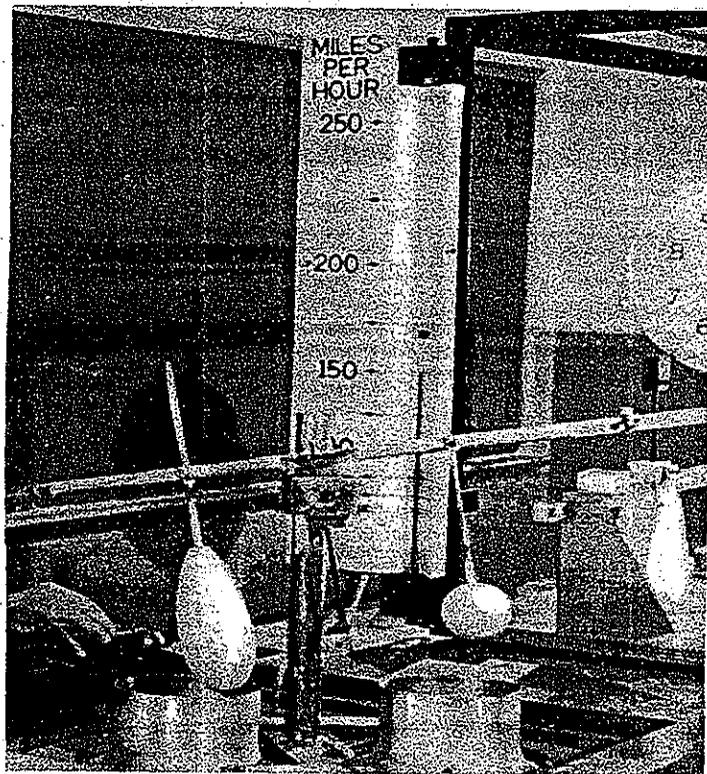


Fig. 11. In questo esperimento eseguito alla galleria del vento l'affusolamento fa diminuire la resistenza. Il modello levigato a sinistra ha esattamente lo stesso diametro massimo del modello levigato sferico che si vede a destra, ma la sua forma è simile a quella che i caricaturisti immaginano abbia una lacrima (in realtà le goccioline quando cadono hanno una forma molto diversa).

scorre fuori pigramente, laddove i gas circolano molto liberamente da un posto all'altro.

Per l'esperimento con l'aria si prepara di nuovo la galleria del vento con la coppia di ugelli e la bilancia a bracci uguali. Metteremo a confronto la sfera levigata con diametro di 3 pollici, già descritta, con un corpo di forma « aerodinamica » (fig. 11). Vedremo in seguito cosa intendiamo precisamente quando diciamo « aerodinamico » (o affusolato); per il momento quel che importa notare è che il diametro massimo del corpo di forma aerodinamica è esattamente uguale al diametro della sfera, sebbene i due corpi siano diversi in quanto il primo ha più o meno la forma di una lacrima.

I due modelli sono sistemati sopra i due ugelli, e il giogo è di nuovo equilibrato in modo da essere orizzontale quando non c'è corrente d'aria. Portando gradualmente la velocità dell'aria a 200 miglia all'ora vediamo che il giogo rimane inclinato come nella figura 11, indicando che il corpo aerodinamico oppone meno resistenza della sfera. Questo non ci sorprende: non mettiamo in dubbio che la forma affusolata sia quel che ci vuole, riduca cioè la resistenza, sebbene ci si possa domandare perché la parte ottusa di un corpo aerodinamico stia davanti e la parte affilata dietro, e non sia piuttosto il contrario. Ma questa è solo una parte della storia: andiamo avanti.

Quarto esperimento: forme aerodinamiche in un fluido molto viscoso.

Nel secondo di questi due esperimenti correlati usiamo due cilindri verticali che contengono lo stesso liquido viscoso, la glicerina. Lascерemo cadere simultaneamente due modelli, uno in ciascun cilindro, per vedere quale cade più in fretta. Questi modelli (fig. 12) sono copie in piccolo di quelli che abbiamo appena usato nell'esperimento con la galleria del vento. Uno è una sfera levigata e l'altro un corpo affusolato con il diametro massimo uguale a quello della sfera.

Nell'esperimento con la galleria del vento i modelli erano sistemati su una bilancia a bracci uguali equilibrata in modo che nell'aria (il fluido in cui venivano messe a confronto le loro resistenze) i pesi netti fossero uguali. Anche i due modelli più piccoli hanno lo stesso peso netto, non nell'aria ma

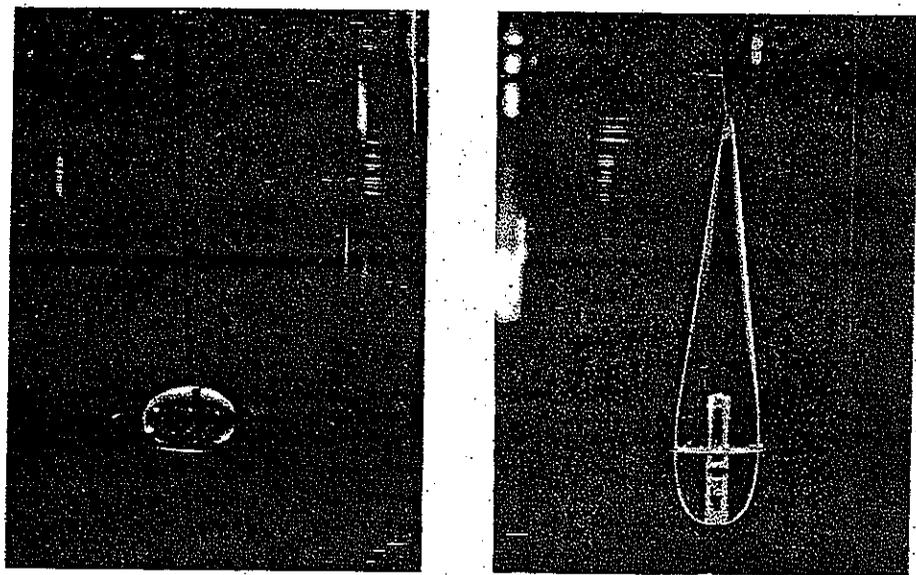


Fig. 12. I modelli utilizzati nel quarto esperimento.

nella glicerina, il fluido in cui debbono cadere. Negli esperimenti con la galleria del vento confrontavamo le resistenze dei due corpi mantenendo costante la velocità; nell'esperimento con la glicerina è più semplice mettere a confronto le velocità che i corpi debbono raggiungere per produrre esattamente la stessa resistenza.

Ma come possiamo assicurarci che presentino veramente la stessa resistenza? Un corpo lasciato cadere in una colonna verticale di liquido dapprima accelera, ma via via che si muove più in fretta la resistenza esercitata su di esso aumenta finché, dopo un certo tempo, il corpo cade praticamente a velocità costante. Questo, per esempio, è quello che succede alle gocce di pioggia, ai fiocchi di neve o a un paracadutista. La velocità ultima si chiama *velocità terminale*. La figura 13 mostra una fotografia stroboscopica di una sfera d'acciaio che cade nella glicerina. L'intervallo di tempo tra le istantanee è costante, perciò la distanza tra le successive posizioni è una misura della velocità negli istanti successivi. Potete vedere che c'è una zona di accelerazione che poco alla volta cede il posto alla regione dove la velocità è costante.

Dobbiamo ora ricordare la prima legge del moto di Newton:

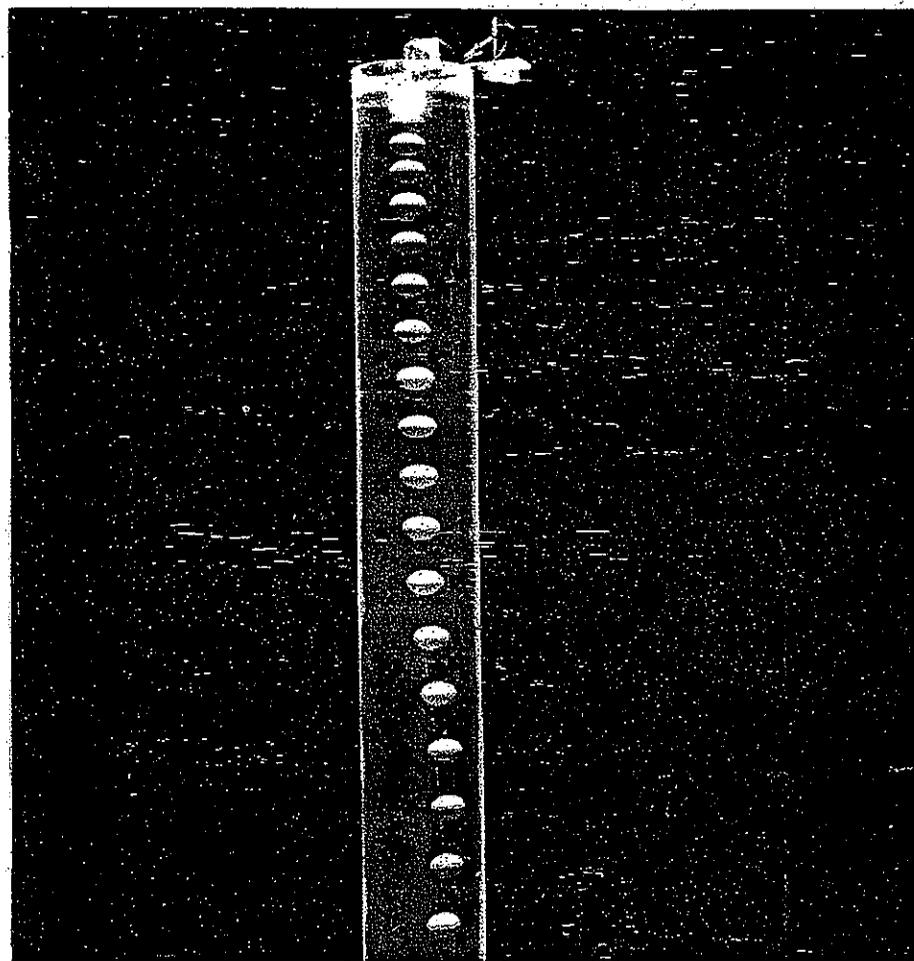


Fig. 13.

quando un oggetto si muove a velocità costante lungo una linea retta la somma algebrica di tutte le forze che agiscono su di esso deve essere esattamente zero. Se la resistenza dell'aria e la gravità fossero entrambe del tutto assenti, un pallone da baseball, per esempio, una volta lanciato continuerebbe a volare per sempre lungo una linea perfettamente dritta, senza il minimo aumento o la minima riduzione di velocità, perché nessuna forza di alcun tipo agirebbe su di esso. Ma se sono presenti due forze, come nell'esperimento sulla velocità terminale (peso e resistenza del mezzo), e se

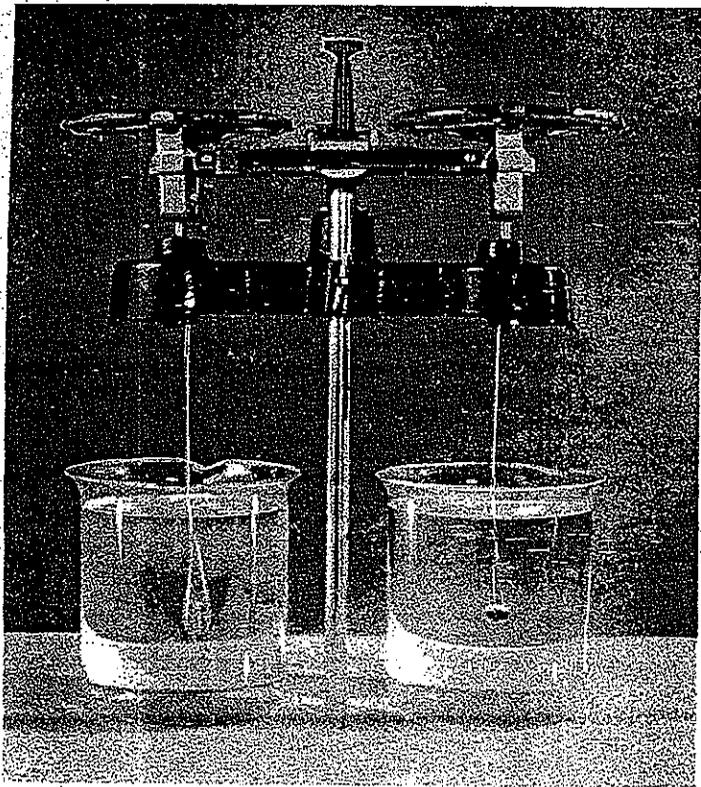


Fig. 14.

sono esattamente uguali e opposte si ha proprio la stessa situazione. La risultante delle forze è zero e sia la velocità sia la direzione del moto restano inalterate. Perciò alla velocità terminale la resistenza che agisce in modo da ritardare l'oggetto equilibra esattamente il peso netto che spinge l'oggetto in basso ed è perfettamente uguale ad esso.

La figura 14 mostra come i due modelli vengono sospesi nella glicerina per mezzo di fili collegati alle estremità di una bilancia a bracci uguali. I modelli sono appesantiti fino a quando il giogo della bilancia si dispone orizzontalmente: a questo punto i due modelli hanno esattamente lo stesso peso netto nella glicerina. Da quanto abbiamo detto si deduce, quindi, che incontreranno esattamente la stessa resistenza quando si muoveranno ciascuno alla propria velocità terminale in una colonna di glicerina. Se la velocità terminale dell'uno è superiore a quella dell'altro, vuol dire che

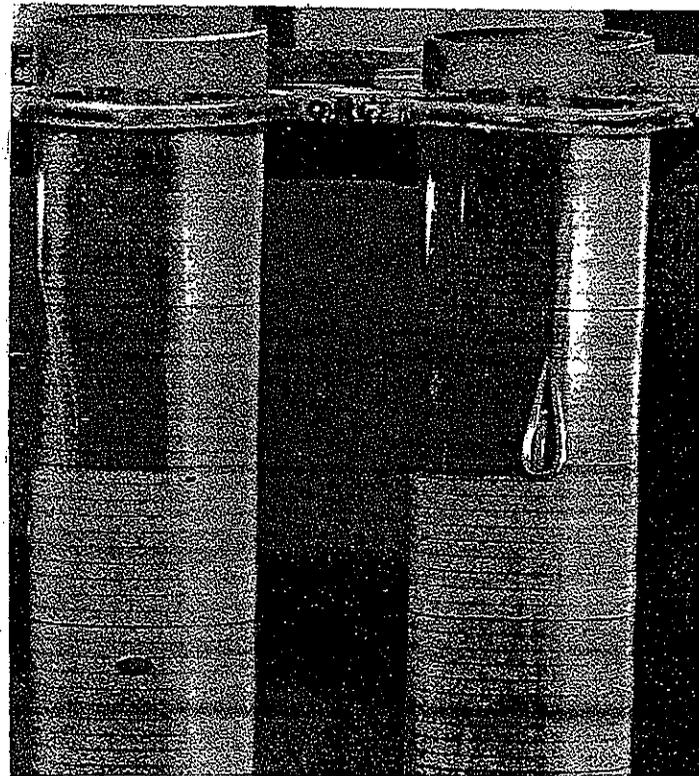


Fig. 15. Il corpo di forma aerodinamica cade più lentamente della sfera.

esso, a parità di velocità, offre minore resistenza alla corrente.

Ricordiamo che nell'esperienza con la galleria del vento il corpo di forma aerodinamica offriva una minor resistenza alla corrente d'aria, alla stessa velocità. Ci domandiamo ora: offrirà una resistenza minore anche alla viscosa glicerina? A parità di resistenza avrà velocità maggiore? Per rispondere a questa domanda lasciamo cadere contemporaneamente i due modelli dall'alto nelle due colonne di glicerina: raggiungono quasi immediatamente la velocità terminale. Come si vede nella figura 15, la velocità terminale del corpo aerodinamico risulta nettamente inferiore a quella della sfera. Così la risposta alla nostra domanda è « no »: a parità di resistenza il corpo affusolato ha adesso una velocità inferiore.

Viceversa, se eseguiamo misure dirette sulla resistenza nella glicerina troveremo che, a parità di velocità, la forma aerodinamica offre maggiore resistenza.

Questo risultato è esattamente opposto a quello raggiunto nell'esperimento con la corrente d'aria. È dovuto forse a qualche differenza tra l'aria e la glicerina, o tra i gas e i liquidi in generale? Oppure c'è nelle leggi che regolano il moto un'altra spiegazione più profonda che non rende necessario attribuire differenze qualitative ai diversi fluidi?

Riepilogo dei paradossi.

Riesaminiamo in breve i diversi esperimenti. Nel primo abbiamo trovato che talvolta un aumento di velocità provoca in realtà una diminuzione della resistenza. Nel secondo esperimento abbiamo trovato che in un certo campo di valori della velocità offre minor resistenza una sfera levigata, laddove per altri valori della velocità offre minor resistenza una sfera con una scabrosità appena percettibile. Nel terzo e nel quarto esperimento abbiamo trovato che, in certe condizioni, la forma aerodinamica riduce la resistenza, mentre in altri casi l'accresce.

Questi risultati sono per noi paradossali o contrari a quello che ci sembrava di intuire; eppure, sebbene a questo stadio le cose sembrino abbastanza complicate, questi esperimenti possono di fatto essere spiegati in modo coerente e logico. C'è però un solo modo per rendere coerente e logico il quadro ed è ricorrere ai concetti e ai principi fondamentali della dinamica dei fluidi. Per i tecnici è essenziale trovare questa coerenza e questa logica perché altrimenti non potrebbero affrontare i problemi connessi con la progettazione e la costruzione di aeroplani, navi, reattori, raffinerie di petrolio, centrali elettriche, razzi o di qualunque altro congegno o dispositivo in cui il moto dei fluidi abbia una parte di rilievo.

3 Idee e principi fondamentali della dinamica dei fluidi

Il modello di un fluido continuo.

Sappiamo che la materia — tutta la materia, solida, liquida e gassosa — è in realtà composta di miliardi e miliardi di molecole, separate da spazi vuoti. Ma se si prendono in considerazione dimensioni molto grandi in confronto alle distanze molecolari la materia sembra continua e priva di struttura interna. Anziché pensare a tutte le singole molecole che formano il fluido reale, conviene perciò sostituire, al fluido reale quello che noi chiamiamo un modello fisico. Questo modello non ha né molecole né struttura: è *continuo* e gli assegniamo certe caratteristiche medie che rappresentano il comportamento statistico delle innumerevoli particelle del fluido reale.

Una di queste proprietà del modello continuo è la *densità* del fluido. Immaginiamo una quantità piccolissima, un briciolino di fluido, addirittura molte volte più piccolo di una gocciolina che penda all'estremità di un ago, gocciolina che contiene nondimeno trilioni di molecole. La densità media di un briciolino di fluido è definita come rapporto tra la massa complessiva di tutte le molecole che lo compongono e il volume complessivo di tutte le molecole più lo spazio che sta tra l'una e l'altra. In altre parole, la densità è la massa divisa per il volume.

Da un punto di vista dinamico la densità è una proprietà importante perché è una misura di ciò che possiamo chiamare « resistenza inerziale », resistenza che il fluido oppone quando si cerca di accelerarlo. Un lanciatore di peso, per accelerare una palla di ferro di 7 chili circa da velocità zero alla velocità a cui lascia la sua mano, deve applicare alla palla una forza enorme col braccio e col corpo. Lo sforzo che compie il lanciatore di peso dà un esempio dell'« inerzia » di cui sono dotati tutti i corpi materiali, e il fatto che dobbiamo applicare delle forze per superare quest'inerzia e mutare la velocità di un corpo ci ha fatto adottare l'efficace

espressione « resistenza inerziale all'accelerazione ». Quanto maggiore è la densità del fluido, tanto maggiore è la forza richiesta per produrre una determinata accelerazione in un volume dato di fluido, tanto maggiore, cioè, è la resistenza inerziale del fluido all'accelerazione.

Un'altra caratteristica variabile con continuità, connessa con l'idea di fluido continuo, è la *velocità* del fluido in un punto. Poiché le singole molecole vanno e vengono o oscillano in modi complicati, le numerose molecole di una piccola quantità di fluido hanno velocità molto diverse a ogni dato istante. Ognuna ha dunque una quantità di moto diversa, cioè un diverso prodotto di massa e velocità. Definiamo la velocità del fluido in un punto come il rapporto fra la quantità di moto complessiva di tutte le molecole che compongono un briciolino di fluido e la massa complessiva di tutte queste molecole: questa risulta essere la velocità media, grandezza che si presta a essere adoperata nella dinamica newtoniana. Quando questa velocità media viene moltiplicata per la massa complessiva di un briciolino di fluido il prodotto dà direttamente la quantità di moto complessiva, e quest'ultima è l'importante proprietà del moto di cui si occupa la legge del moto di Newton.

Parleremo in seguito di altre proprietà dei fluidi che hanno a che fare con il fluido continuo. Tuttavia è bene chiarire fin d'ora un punto: ogni briciolo o particella di fluido può avere, nella massa complessiva del fluido, proprietà diverse. Per esempio, non tutte le particelle hanno lo stesso movimento, come potete constatare osservando il fumo che esce dai camini, l'acqua che scorre entro un lavandino, il pulviscolo che fluttua nelle correnti di convezione di una stanza assolata, l'acqua che scorre impetuosamente intorno ai piloni di un ponte o le onde che si infrangono sulla riva. Per facilitare — in realtà per rendere possibile — la comprensione di questi moti complicatissimi è necessario immaginare l'intera massa di fluido suddivisa in tanti piccoli briciolini, ognuno con la sua traiettoria, le sue caratteristiche e la sua storia. Questo briciolino di fluido con una sua precisa identità costante si chiama *particella fluida*.

Forze che agiscono sulle particelle fluide.

Ognuna di queste particelle fluide obbedisce alla legge del moto di Newton: possiamo quindi apprendere un bel po' di cose sullo scorrimento nel suo insieme se cominciamo a ragionare sulla dinamica di una particella fluida *tipica*. Supponiamo di tingere di rosso una particella del getto d'acqua che esce da un rubinetto, in modo da poterla seguire facilmente. Immaginiamo di isolare questa particella fluida dall'acqua circostante, ed esaminiamo poi le forze che agiscono su di essa e come queste forze influiscano sul suo moto quando scorre dal rubinetto, fa mulinello nel lavandino e se ne va nel tubo di scarico.

Per rendere meno astratto il ragionamento, immaginiamo che un cubo di legno, che possiamo tenere in mano, rappresenti, in scala enormemente più grande, la nostra particella fluida. Sebbene molte forze di tipo diverso possano agire sul blocchetto di legno (cioè sulla particella fluida), possiamo raggrupparle in due categorie, *forze di massa* (o *di campo*) e *forze di superficie*, come indicato nella tabella seguente:

Tipi di forze che agiscono sulle particelle fluide

1. *Forze di massa o di campo* (agiscono a distanza)
 - a) gravitazionali
 - b) elettriche
 - c) elettromagnetiche
2. *Forze di superficie* (agiscono per contatto diretto)
 - a) sollecitazioni normali (pressione)
 - b) sollecitazioni di taglio o tangenziali (attrito del mezzo, in un fluido viscoso)

Forze di massa o di campo.

Le forze di massa agiscono a distanza: sono le forze gravitazionali, le forze elettriche e così via. Sono dovute a « campi ». Agiscono sulla materia nel suo insieme, e perciò le abbiamo chiamate anche « di massa ». Se il cubo che stiamo esaminando fosse una particella d'acqua in un serbatoio in quiete (fig. 16) verrebbe spinto verso il basso dalla forza di

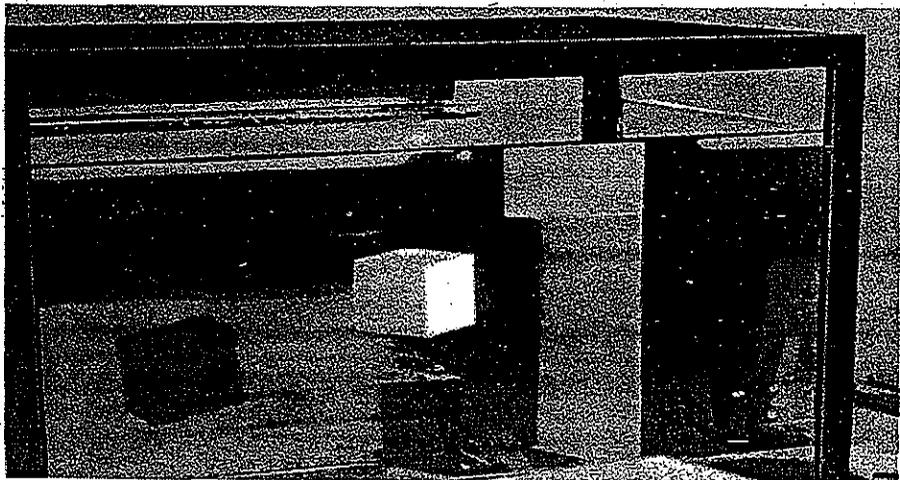


Fig. 16. Il cubo di legno rappresenta una particella fluida in un serbatoio. Poiché il cubo non sta accelerando debbono essere presenti altre forze che fanno equilibrio all'attrazione verso il basso dovuta alla gravità.

gravità. Ma ogni particella d'acqua contenuta nel serbatoio è in realtà immobile: devono quindi essere presenti altre forze per controbilanciare il suo peso e impedirle di accelerare verso il basso.

Forze di superficie.

Queste altre forze sono le forze di superficie. Laddove le forze di massa agiscono a distanza le forze di superficie agiscono per contatto diretto tra la particella e il fluido circostante. Inoltre, come dice il nome, le forze di superficie sono esercitate direttamente sopra la superficie delle sei facce del cubo dal fluido circostante, che è effettivamente a contatto con esso. Le forze *normali* agiscono perpendicolarmente alla superficie, come la spinta verso l'alto che il piano di un tavolo esercita sulla faccia inferiore di un cubo di metallo pesante, immobile, appoggiato su di esso. Le forze di *taglio* agiscono tangenzialmente rispetto alla superficie: cioè la loro direzione è parallela alla faccia su cui agiscono,

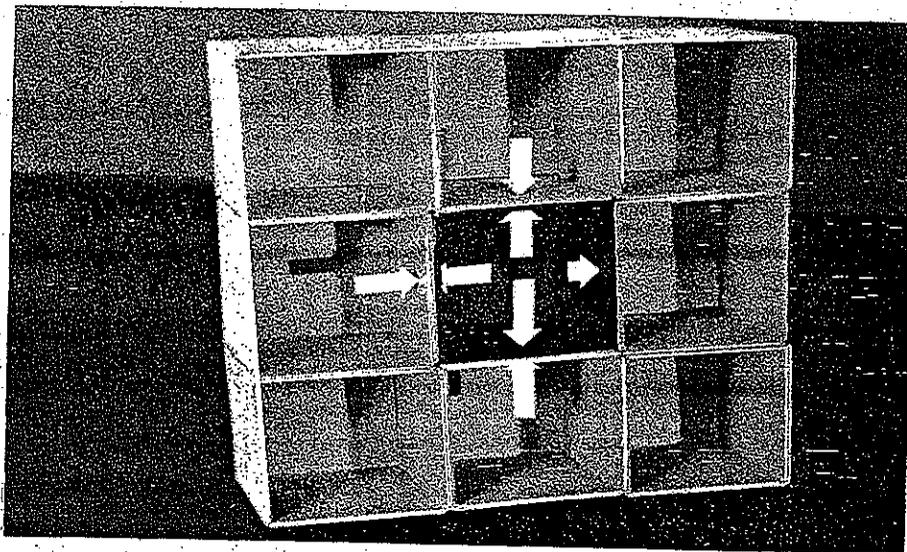


Fig. 17. Ai confini della particella scura vengono esercitate reciprocamente, tra la particella scura e le particelle chiare adiacenti, forze di superficie perpendicolari alle superfici stesse, uguali e opposte.

come la forza di attrito esercitata dal piano del tavolo sulla faccia inferiore dello stesso cubo di metallo pesante, che lo fa rallentare quando questo abbia ricevuto una spinta diretta lungo il piano del tavolo.

Il fluido all'interno del cubo e quello che si trova all'esterno esercitano reciprocamente su ogni faccia del cubo forze uguali e opposte, come indicato nella figura 17 per le forze normali.

Forze di superficie dovute a sollecitazioni normali, o pressioni.

Esaminiamo una delle facce del cubo che rappresenta la nostra tipica particella fluida. Per il momento prenderemo in considerazione la forza di superficie che agisce perpendicolarmente a questa faccia. Quanto più grande è l'area della superficie tanto maggiore è la forza di superficie che agisce su di essa: conviene perciò riferirsi alla forza per unità di

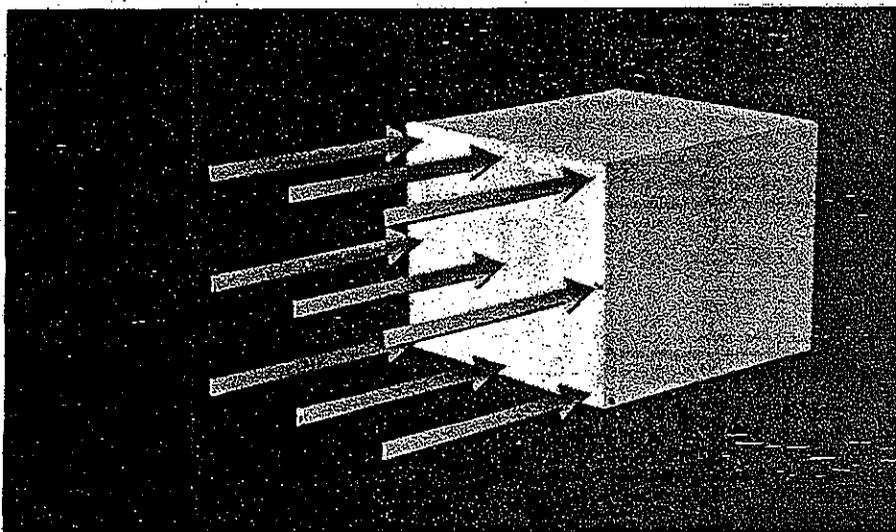


Fig. 18. Le frecce indicano la sollecitazione normale o pressione che agisce su una faccia del cubo rappresentante una tipica particella fluida.

superficie. Questo rapporto tra forza normale e area è chiamato *sollecitazione normale* o *pressione*. Per esempio, se premiamo con una forza di 20 chili una faccia avente un'area di 10 centimetri quadrati la sollecitazione o pressione media è di 2 chili per centimetro quadrato. Questa distribuzione della sollecitazione su tutta la superficie è indicata nella figura 18 dalle numerose frecce dirette verso la superficie. Supponiamo ora di premere anche sulla faccia opposta del cubo con una forza di 20 chili (fig. 19a): le due forze si faranno equilibrio. In altre parole, non c'è una forza risultante che acceleri la particella: da qui l'importante conclusione che il valore della pressione che agisce su una faccia qualsiasi è di per sé irrilevante ai fini della dinamica della particella. Ma supponiamo adesso di premere sulla seconda faccia con una forza di 30 chili (fig. 19b): c'è allora una forza risultante non equilibrata di 10 chili disponibile per accelerare la particella. Dunque, per quanto riguarda il moto dei fluidi contano le *differenze* di pressione, non la pressione stessa. La pressione risultante per unità di volume di un

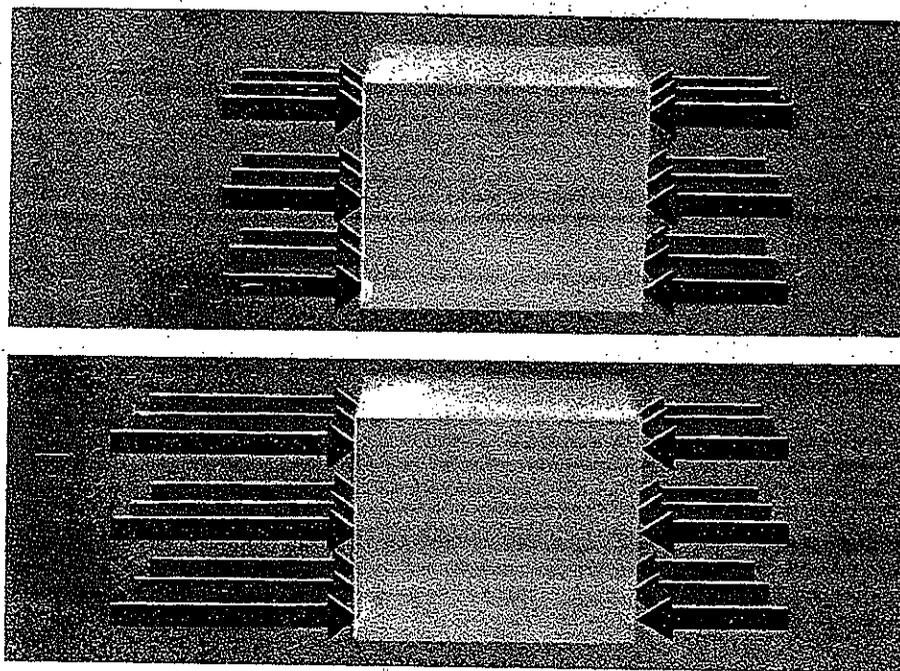


Fig. 19. (a) Quando le pressioni su facce opposte sono uguali non vi è una forza risultante tendente ad accelerare la particella, comunque grandi siano le singole pressioni. (b) Una differenza di pressione su facce opposte genera una forza risultante che accelera la particella.

fluido è direttamente proporzionale alla differenza di pressione tra facce opposte, e inversamente proporzionale alla distanza tra le facce. La variazione della pressione al variare della distanza — che chiamiamo *gradiente di pressione* — è ciò che determina l'effetto risultante del campo di pressione sul moto del fluido.

Ritorniamo ora alla nostra immagine del cubo che rappresenta una particella in un serbatoio in quiete (fig. 20). Il peso del cubo, cioè la forza di massa esercitata dal campo gravitazionale della terra, può essere equilibrato se la pressione esercitata sulla faccia inferiore è maggiore di quella esercitata sulla faccia superiore. In altre parole, per l'equilibrio statico deve esserci un *gradiente di pressione* tale che

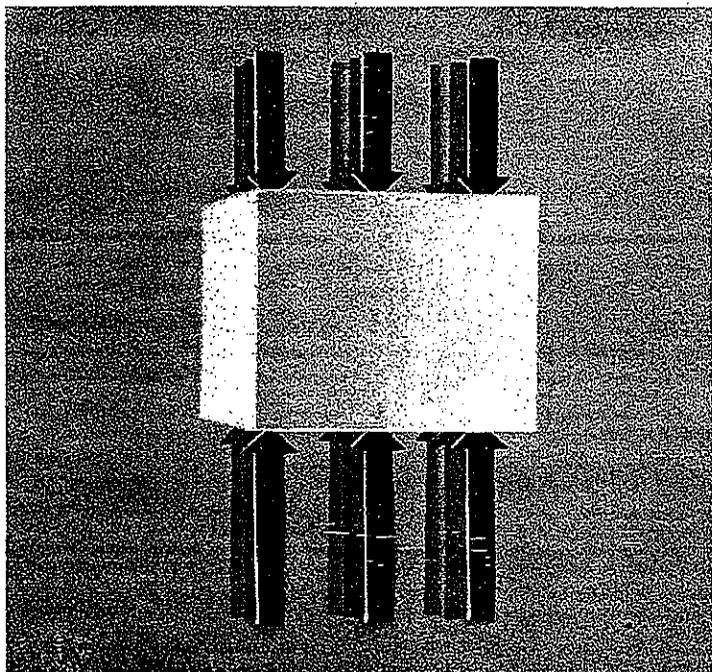


Fig. 20. Il peso di una particella in un fluido immobile è equilibrato da un eccesso di pressione sulla faccia inferiore rispetto alla pressione sulla faccia superiore.

la pressione aumenti con la profondità. Il fatto che la pressione diretta verso l'alto esercitata sulle parti inferiori di un corpo sia maggiore di quella diretta verso il basso esercitata sulle parti superiori spiega quella che chiamiamo « spinta di Archimede », che agisce spingendo verso l'alto i corpi immersi in un fluido. Perciò quello che viene comunemente chiamato Principio di Archimede è in realtà conseguenza logica di una legge molto più fondamentale. Noi stessi conosciamo per esperienza fisica diretta l'aumento di pressione con la profondità che percepiamo attraverso i timpani (eccellenti trasduttori di pressione) quando ci tuffiamo in profondità nell'acqua. Sappiamo che questo aumento della pressione al crescere della profondità può avere conseguenze disastrose, e far slittare una diga o abatterla, o essere molto utile, mantenendo ad esempio le navi a galla sul mare.

Un altro esempio di equilibrio statico tra forze di massa e

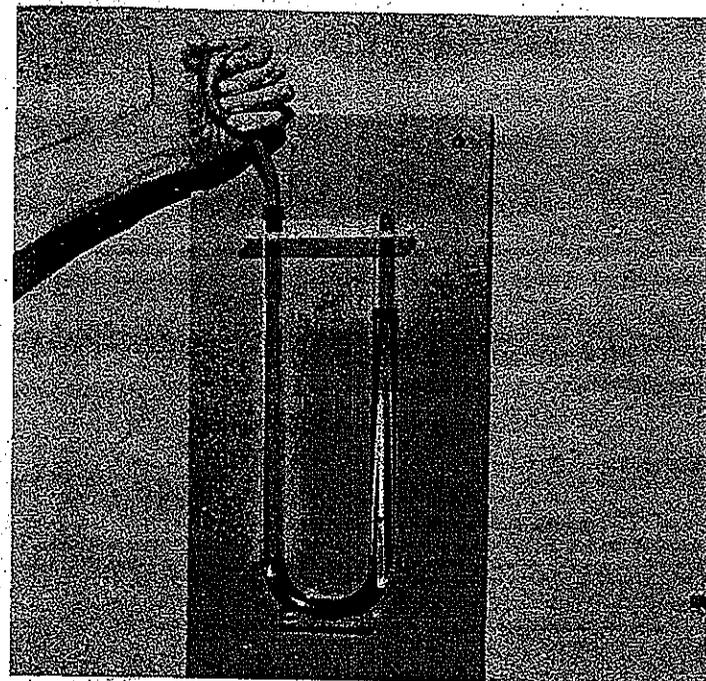


Fig. 21. Il manometro a U misura differenze di pressione attraverso il peso della colonna di liquido sbilanciata: questa equilibra esattamente la differenza di pressione agente sulla superficie trasversale della colonna.

forze di superficie è il manometro a U, che abbiamo usato nel nostro primo esperimento e che serve a misurare le pressioni o, più precisamente, le differenze di pressione. Nella figura 21 la parte destra del tubo a U è aperta all'atmosfera; quando si applica alla parte sinistra una pressione maggiore si determina una differenza di livello tra le colonne di liquido contenute nei due rami del tubo a U. Quando si raggiunge una condizione di equilibrio statico il peso della colonna di liquido di destra, non bilanciata da un'uguale colonna a sinistra, è sostenuto dalla differenza tra la maggior pressione alla base della parte sbilanciata della colonna e la pressione atmosferica alla sua sommità.

Torniamo al nostro cubo che rappresenta una particella fluida tipica, e supponiamo che la differenza di pressione sia applicata in direzione orizzontale, essendo la pressione bassa su una faccia e alta su quella opposta (fig. 22). La gravità agisce

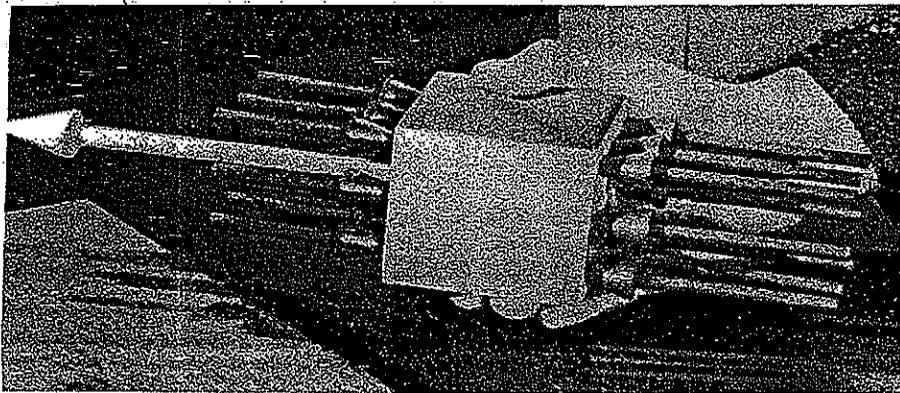


Fig. 22. La freccia bianca rappresenta l'accelerazione prodotta dalla differenza tra le pressioni esercitate sulle facce opposte.

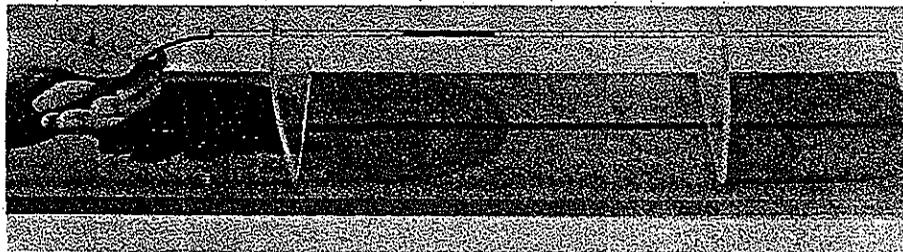


Fig. 23. Semplice esperimento che serve a mostrare l'accelerazione prodotta da un gradiente di pressione non equilibrato.

solo verso il basso e quindi non contribuisce a equilibrare forze orizzontali. La risultante delle pressioni — cioè la differenza tra le due pressioni opposte — produrrà un'accelerazione orizzontale conformemente all'equazione del moto di Newton. Nella figura 22 la freccia bianca grande rappresenta l'intensità di questa accelerazione.

La figura 23 mostra un esperimento illustrativo. Il tubicino orizzontale di vetro contiene un cilindretto di liquido colorato con l'estremità destra esposta alla pressione atmosferica e quella sinistra collegata a una pompetta di gomma. Quando si fa aumentare la pressione sulla sinistra schiacciando la pompetta con la mano, il cilindretto di liquido può facilmente essere accelerato verso destra con un movimento così rapido che non si riesce a vederlo.

Sollecitazioni tangenziali dovute alla resistenza viscosa alla deformazione.

Finora abbiamo esaminato soltanto sollecitazioni di superficie che agivano perpendicolarmente alle facce della particella fluida. Abbiamo inoltre immaginato che la particella fosse rigida, come un cubo di legno, in modo da poter essere spostata e fatta girare ma non deformata. In realtà le particelle fluide possono subire e subiscono notevoli cambiamenti di forma, anche più facilmente, per esempio, della gomma-piuma (fig. 24). Tuttavia, come la gomma-piuma, le particelle fluide resistono alla deformazione. Però, mentre la resistenza di un solido dipende dalla quantità di distorsione, la resistenza di un fluido alla deformazione dipende dalla velocità con cui la distorsione avviene. La proprietà del fluido che rappresenta la grandezza di questa resistenza alla deformazione si chiama viscosità. Alcuni fluidi, come l'acqua, hanno viscosità relativamente piccola, laddove altri, come gli sciroppi o le melasse, hanno viscosità relativamente grande.

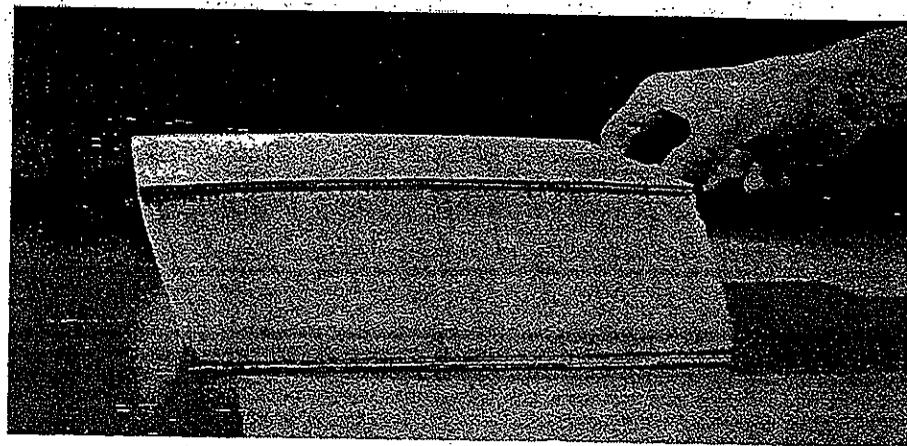


Fig. 24. Un blocco di gomma-piuma può subire grandi deformazioni tangenziali se ad esso vengono applicate sufficienti forze tangenziali, cioè sollecitazioni di taglio.

Definizione della viscosità.

Dobbiamo ora precisare meglio, e in forma quantitativa, il significato della parola viscosità. Supponiamo che una porzione di fluido inizialmente quadrata (fig. 25) sia sottoposta a una certa deformazione tangenziale misurata dall'angolo α

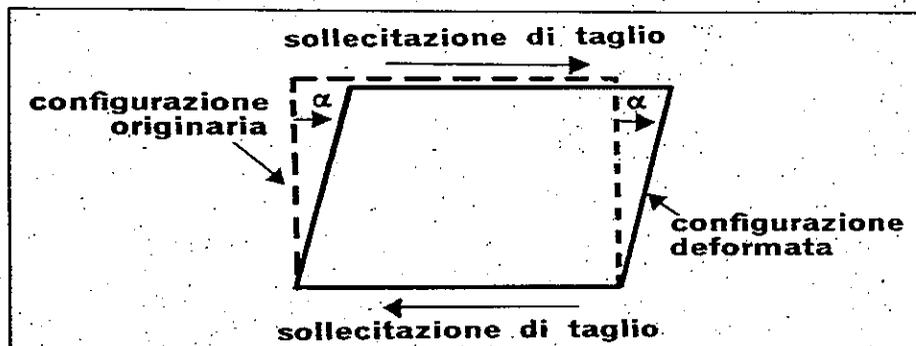


Fig. 25. La definizione della viscosità.

(alfa) compreso tra la direzione originaria di due lati opposti, perpendicolari agli altri due (linee tratteggiate) e la direzione finale degli stessi lati, adesso obliqui rispetto agli altri (linee continue). La resistenza viscosa si manifesta allora sotto forma di sollecitazioni tangenziali o di taglio necessarie a produrre questa deformazione a una certa velocità. Definiamo la *viscosità* del fluido nel modo seguente, come misura dell'interrelazione tra questi due eventi (ciascuno dei quali, si tenga presente, può essere considerato « causa » o « effetto »):

$$\text{viscosità} = \frac{\text{sollecitazione tangenziale}}{\text{velocità con cui } \alpha \text{ cambia col tempo}}$$

La condizione di assenza di scorrimento.

C'è un altro fatto molto importante relativo alla viscosità, che è bene conoscere: il fluido immediatamente adiacente a una superficie solida non può scorrere rispetto ad essa. Si

giunge così alla conclusione sorprendente ma vera che il materiale di cui è fatta una superficie — sia esso legno, metallo, vetro o materia plastica — non può di per se stesso modificare il comportamento viscoso del fluido o la resistenza al moto attraverso il fluido. Questo ci porta a un interessante problema. Sappiamo che l'acqua non « bagna » la cera: quando l'acqua viene lasciata cadere su una superficie cerata non si sparge ma si ritira per così dire in se stessa e assume una forma quasi sferica. In questo caso diciamo talvolta che l'acqua non « aderisce » alla cera. Se dunque rivestissimo l'interno di una condotta d'acqua di un sottile strato di cera, occorrerebbe una pressione minore per spingere l'acqua a una data velocità attraverso la condotta? No! Il fenomeno per cui una superficie si bagna o non si bagna, di cui abbiamo parlato prima, è connesso con la tensione superficiale, e un tubo ricoperto internamente di cera e pieno d'acqua si comporta ancora in base alla regola che non c'è moto relativo tra il fluido e la parete solida che lo delimita: dal punto di vista della viscosità l'acqua *aderisce* alla cera.

La figura 26a mostra una teglia circolare piena di glicerina, nel cui centro si trova un cilindro che può esser fatto ruotare. Si traccia una riga nel fluido per mezzo di una siringa da iniezioni riempita di glicerina colorata (fig. 26b), per poter individuare un particolare gruppo di particelle fluide. Quando si fa girare il cilindro si vede, senza possibilità di dubbio, che il fluido immediatamente adiacente alla superficie del cilindro si muove con esso: ciò significa che non v'è scorrimento tra fluido e superficie solida. Grazie alle sollecitazioni viscosse anche il fluido più lontano dal cilindro si muove (fig. 26d), ma a velocità che diminuiscono a mano a mano che aumenta la distanza dal cilindro.

Nella figura 27a si vede una particella fluide, per il momento in forma di quadrato, identificata dalla figura tracciata con la siringa. Quando si fa girare di nuovo il cilindro la particella subisce una deformazione di taglio assumendo una forma più o meno simile a un parallelogramma (figura 27b); tutte le particelle contenute nella teglia subiscono simili deformazioni di taglio. Ognuna di queste particelle fluide resiste alla deformazione, grazie alla viscosità, e perciò deve essere applicata una coppia di forze al cilindro interno per costringerlo a girare a una certa velocità.

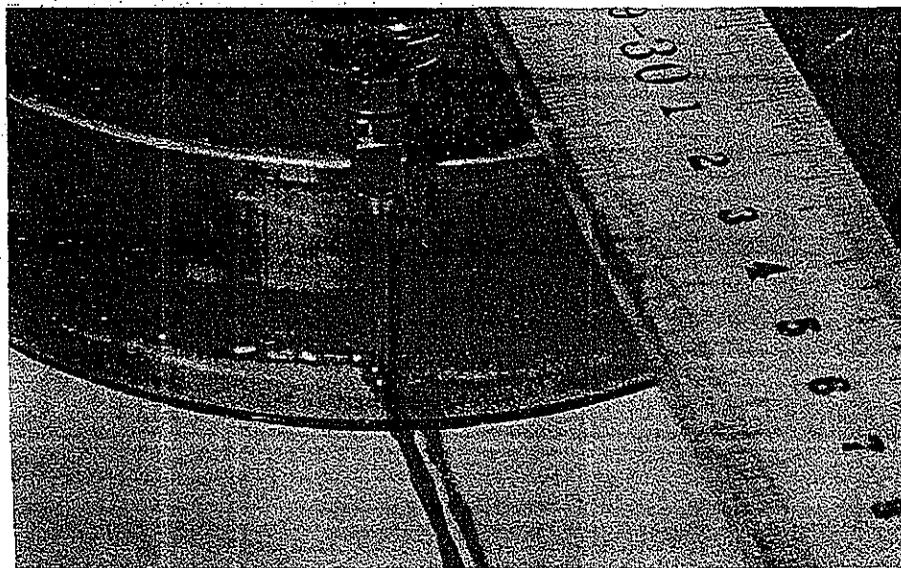
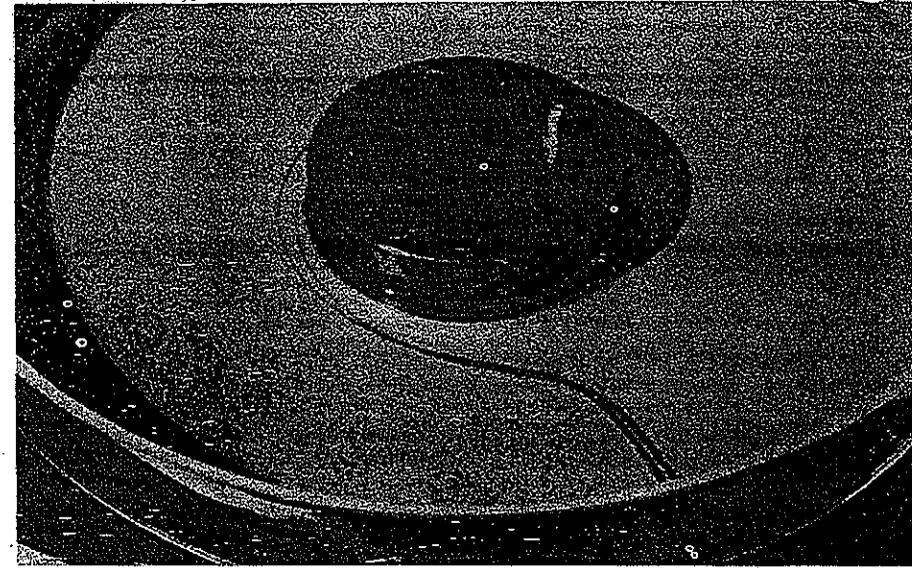
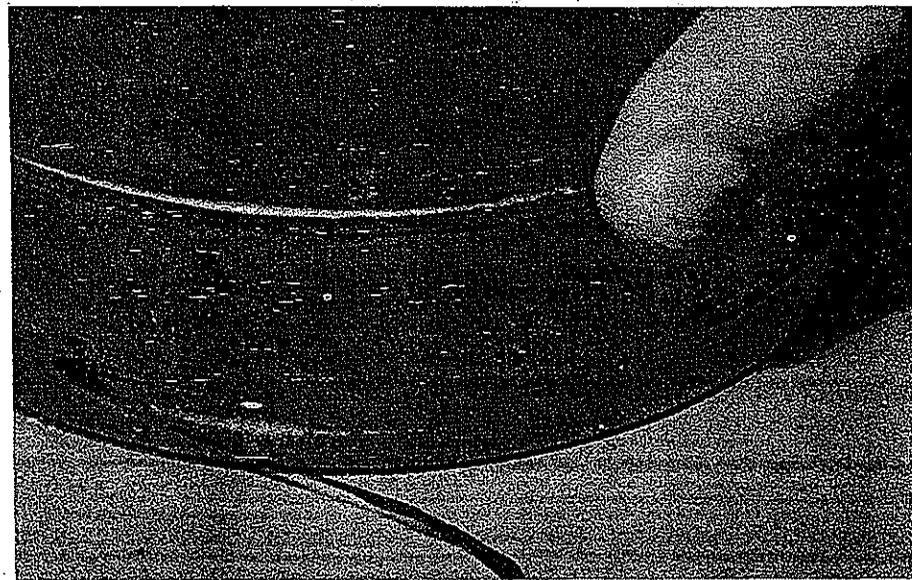


Fig. 26. Esperimento eseguito per mostrare che i fluidi non scivolano rispetto a un confine solido: (a) strumenti usati; (b) una linea di fluido viene tracciata con una siringa; (c) quando si



fa girare il cilindro interno l'estremità della linea fluida vi resta attaccata; (d) le sollecitazioni viscosse estendono il moto dal cilindro interno agli strati esterni del fluido.

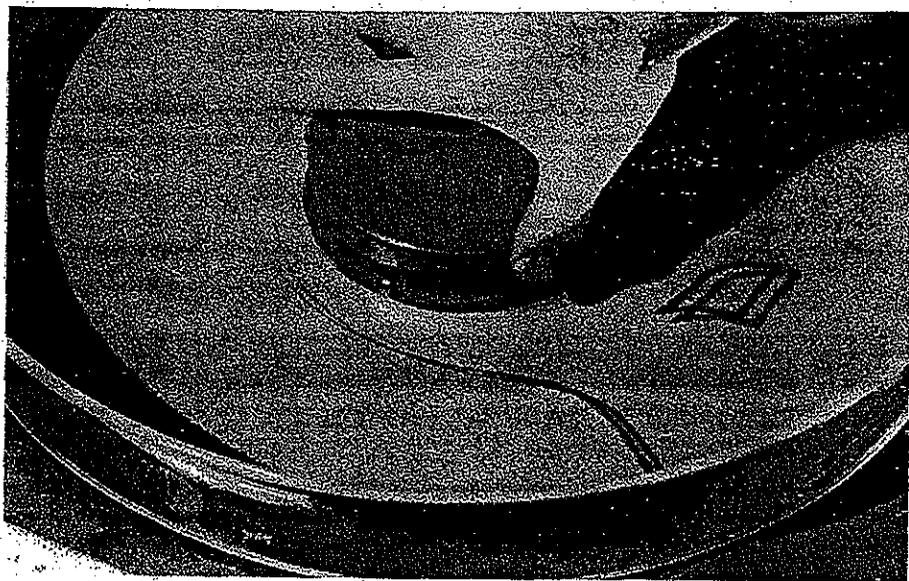
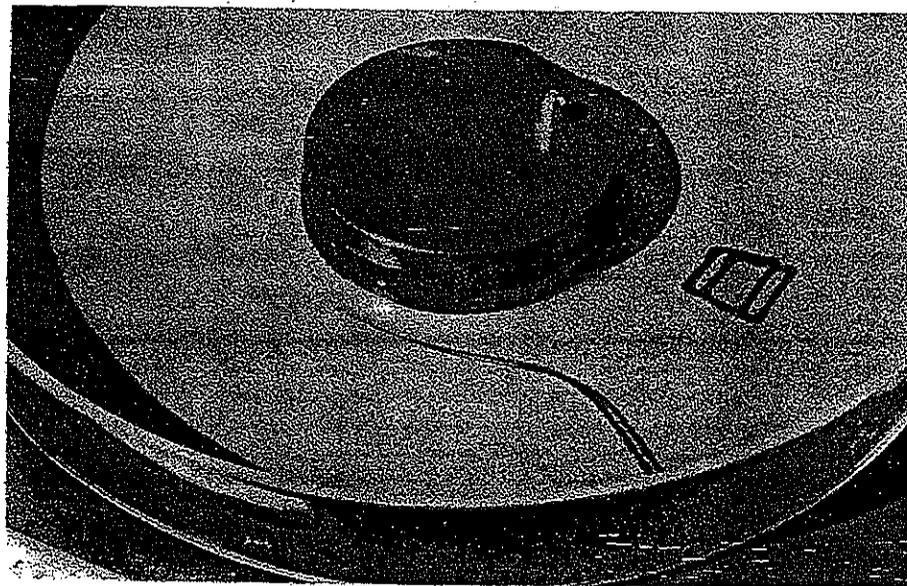


Fig. 27. Deformazioni tangenziali in un fluido: (a) è stata appena segnata una particella quadrata di fluido; (b) quando il cilindro interno viene girato la particella quadrata si trasforma in un parallelogramma. Sono necessarie forze tangenziali o di taglio per produrre con velocità definita questa deformazione tangenziale.

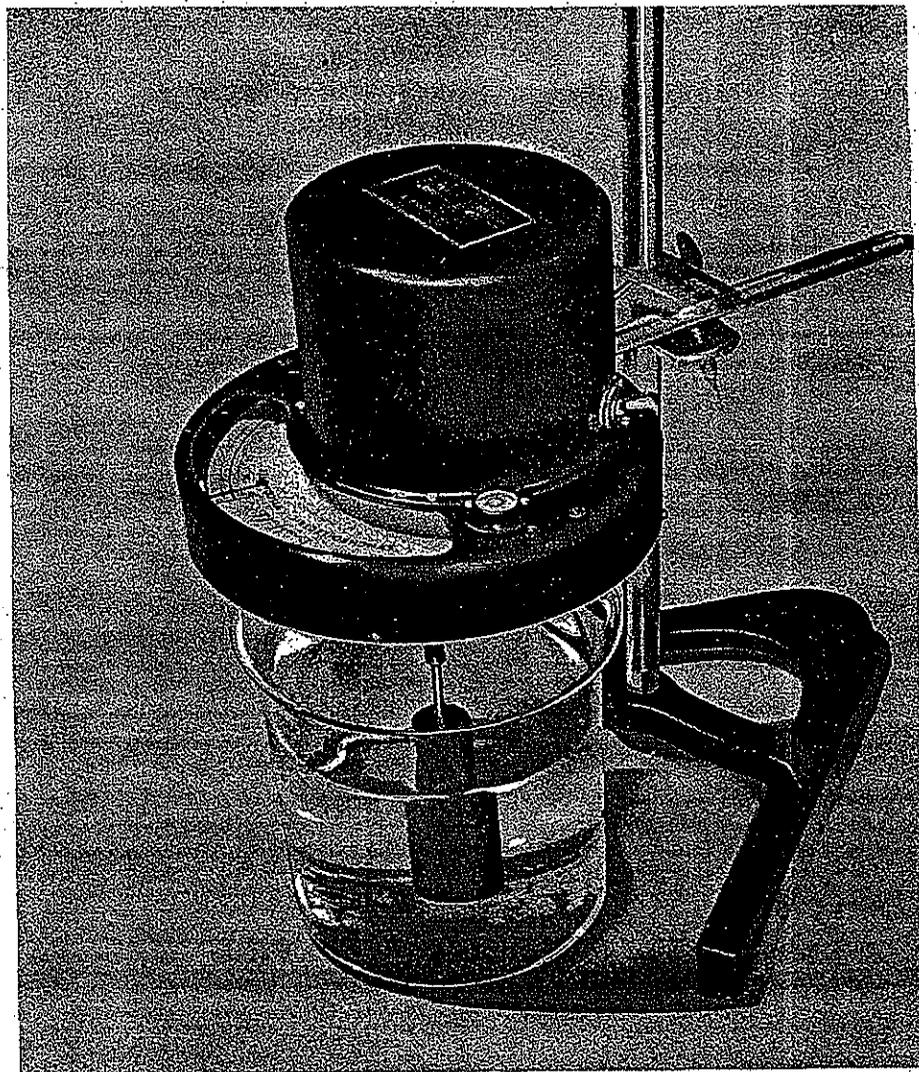


Fig. 28. Un tipo di viscosimetro del commercio (Brookfield Engineering Co.).

La figura 28 mostra un tipo di viscosimetro basato direttamente su questo principio. Un motore elettrico fa ruotare un cilindro a una velocità nota nel fluido contenuto nel bicchiere. Il momento della coppia di forze necessaria per far ruotare il cilindro è misurato per mezzo di una molla e può

essere letto su un quadrante. Dalla velocità della coppia di forze e dalle dimensioni del cilindro rotante si può ricavare la sollecitazione tangenziale che agisce sul cilindro interno, nonché la velocità della deformazione. Questo è appunto ciò di cui abbiamo bisogno per calcolare la viscosità in base alla formula di pagina 46.

Effetto della pressione sull'attrito viscoso.

L'attrito viscoso nei fluidi rivela un'altra proprietà inaspettata. La resistenza d'attrito tra solido e solido dipende dalla pressione normale di contatto: mentre spingete un libro facendolo strisciare lungo il piano di un tavolo, per esempio, la resistenza di attrito aumenta se vi appoggiate più pesantemente su di esso. Ma in un fluido la resistenza viscosa è quasi del tutto indipendente dalla pressione: dipende quasi esclusivamente dalla velocità con cui le particelle fluide cambiano forma. Per esempio, in una condotta la resistenza d'attrito al flusso d'acqua è pressappoco uguale sia che l'acqua preme contro le pareti della condotta con una pressione di 100 chili per centimetro quadrato sia che vi preme con una pressione di 100 grammi, purché la velocità della corrente sia la stessa. Oggi si è concordi nel ritenere che in un liquido le sollecitazioni tangenziali dovute alla viscosità non dipendano dalla pressione del fluido; ma questo è tanto poco evidente che perfino il grande Leonardo Eulero — padre spirituale dell'attuale dinamica razionale dei fluidi — riteneva che la sollecitazione d'attrito sulle pareti di un tubo potesse essere direttamente proporzionale alla pressione normale sulle pareti, analogamente al coefficiente di attrito di Coulomb tra due solidi.

La legge del moto di Newton.

Siamo ora in grado di tornare a riflettere sul modo in cui tutte le forze che abbiamo considerato — le forze di massa, le pressioni e le forze di viscosità — influiscono sul moto del fluido.

Innanzitutto è evidente che non abbiamo bisogno di tener conto della gravità in quei particolari esperimenti che abbiamo descritto. Nei quattro esperimenti del secondo capi-



Fig. 29.

tolo la gravità, cioè il peso del fluido, portava a un aumento della pressione al crescere della profondità, e perciò la risultante delle pressioni era semplicemente una spinta verso l'alto che faceva sì che il peso apparente degli oggetti risultasse minore. In realtà misuravamo soltanto i pesi netti, e perciò tutti gli esperimenti venivano eseguiti in modo da tenere automaticamente conto della gravità. Né in quegli esperimenti erano presenti altre forze di massa come la forza elettrica e quella elettromagnetica. Restano dunque le sole forze di superficie, cioè le pressioni e le forze di viscosità.

Ora, il modo in cui questi due tipi di forze di superficie agiscono sul moto di una particella fluida è regolato dalla legge del moto di Newton. Entrambe queste forze sono vettori: ciò vuol dire che per definirle quantitativamente occorre precisarne la direzione e l'intensità. La somma vettoriale di queste due forze, cioè la loro risultante, si trova eseguendo la somma dei vettori con la regola del parallelogramma delle forze (fig. 29). Questa forza risultante è uguale al prodotto della massa della particella per la sua accelerazione: per una particella di massa unitaria è uguale all'accelerazione stessa. L'accelerazione istantanea prodotta dalle forze istantanee determina il moto lungo il pezzettino

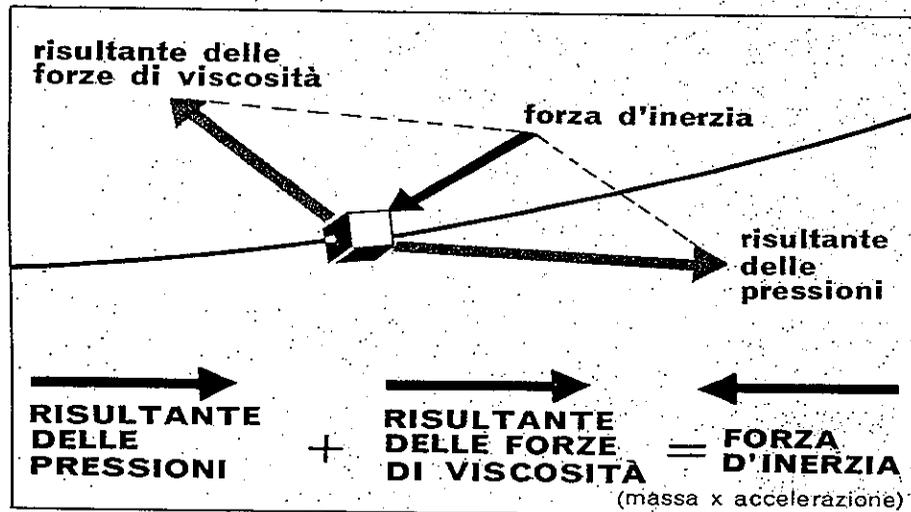


Fig. 30.

seguito di traiettoria della particella, e così via per successivi pezzettini di traiettoria. Tra parentesi, non è detto affatto che la direzione istantanea del moto della particella coincida con la direzione del vettore accelerazione e nemmeno che coincida con la direzione dell'uno o dell'altro dei due vettori forza.

La figura 30 mostra il parallelogramma delle forze unitamente all'equazione del moto di Newton. Il termine di destra (il prodotto della massa per l'accelerazione) è la *forza d'inerzia*. Di solito si attribuisce al vettore che rappresenta la forza d'inerzia senso opposto a quello del vettore che rappresenta l'accelerazione. Questo concorda con l'idea di forza d'inerzia come resistenza della massa ad essere accelerata. Per questa convenzione circa la direzione e il senso la forza d'inerzia deve equilibrare esattamente la somma vettoriale della risultante delle pressioni e della risultante delle forze di viscosità. In altre parole, la somma vettoriale delle tre forze — pressione, viscosità e forza d'inerzia — deve essere esattamente zero.

Sebbene ci si possa servire ampiamente e con profitto della matematica per arrivare a capire il moto dei fluidi, non è questo ora il nostro scopo. Molto si può capire semplicemente

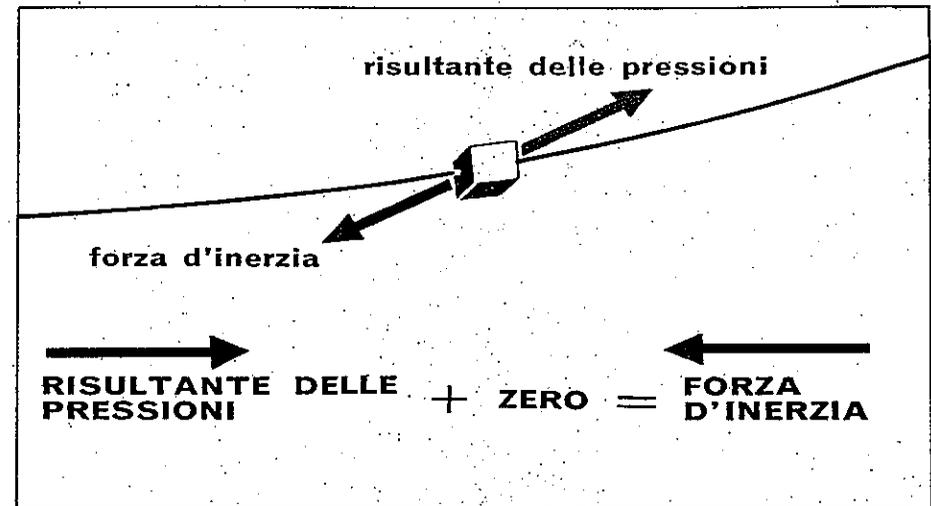


Fig. 31. Il parallelogramma delle forze e l'equazione del moto di Newton quando le forze di viscosità sono trascurabili.

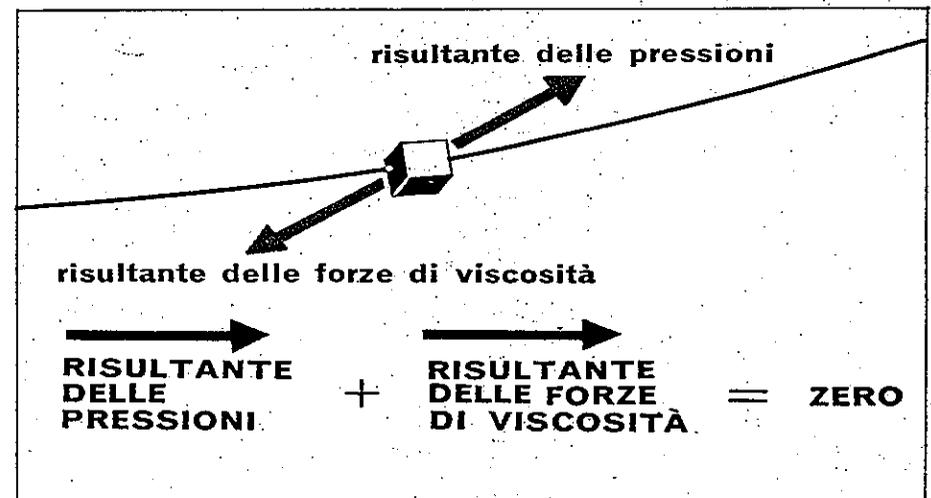


Fig. 32. Il parallelogramma delle forze e l'equazione del moto di Newton per fluidi aventi viscosità straordinariamente grande.

afferrando con esempi fisici l'idea di questo equilibrio fra le tre quantità: risultante delle pressioni, risultante delle forze di viscosità e forza d'inerzia. La chiave della spiegazione di molti fenomeni diversi e sconcertanti nel moto dei fluidi sta nel rendersi conto che, in condizioni diverse, queste tre quantità hanno diversa importanza relativa.

Supponiamo, per esempio, di avere un fluido di viscosità molto bassa; in questo caso, entro dati valori della velocità, le forze di viscosità sarebbero molto piccole in confronto alle forze d'inerzia. Per molti scopi pratici possiamo allora trascurare completamente le forze di viscosità: questo ci lascia con un semplice equilibrio tra la risultante delle pressioni e la forza d'inerzia. L'equazione di Newton (fig. 31) contiene ora soltanto due termini e nel diagramma dei vettori i vettori corrispondenti a queste due forze debbono essere esattamente uguali e opposti.

Da questo estremo di viscosità bassissima, passiamo all'altro estremo, cioè a fluidi di viscosità altissima. Con fluidi di questo tipo, entro dati valori della velocità le forze di viscosità resistono in tal misura da sopraffare completamente le forze d'inerzia connesse con l'accelerazione del fluido. In pratica le forze d'inerzia possono ora essere trascurate, lasciando a farsi equilibrio la risultante delle pressioni e le forze di viscosità (fig. 32). Nel diagramma dei vettori i vettori corrispondenti a queste due forze debbono ora essere uguali ed opposti.

È utile riflettere su questi due casi estremi: essi ci suggeriscono la possibilità di classificare i tipi di moto dei fluidi in base all'importanza *relativa* della risultante delle forze di viscosità rispetto alla forza d'inerzia. Questo porta a conseguenze davvero della massima importanza, come vedremo ora.

La similitudine dinamica e il Numero di Reynolds.

Ciò che rende così importante questo rapporto di forze è la sua connessione con quella che chiamiamo *similitudine dinamica*. La figura 33 mostra vari oggetti di diverse dimensioni: hanno però tutti la stessa forma e diciamo perciò

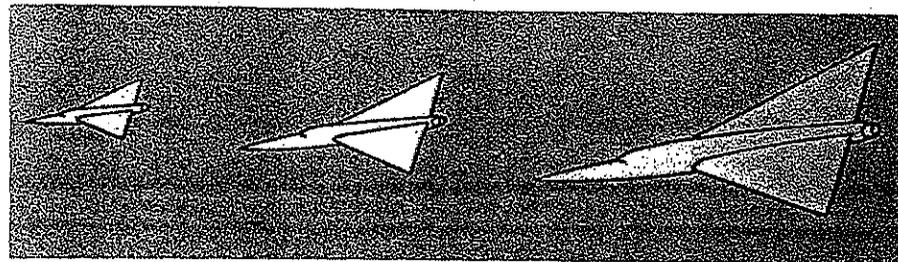


Fig. 33.

che sono geometricamente simili. I modelli in scala di aeroplani e navi sono geometricamente simili agli aeroplani e alle navi di grandezza naturale.

Immaginiamo di eseguire una serie di esperimenti di resistenza su una serie di modelli di dimensioni diverse ma geometricamente simili. Data l'esistente similitudine geometrica le misure del modello usato in ogni esperimento possono essere identificate mediante una sola delle sue dimensioni, per esempio la *lunghezza*. In ciascun esperimento della serie possiamo avere una diversa *velocità* della corrente. Possiamo inoltre usare nei vari esperimenti *fluidi* diversi, per esempio aria, acqua, olio e così via. Ora, le proprietà meccaniche che hanno importanza per il moto dei fluidi sono: primo, la densità, che è una misura dell'inerzia del fluido; secondo, la viscosità che è una misura della resistenza che gli attriti interni del fluido oppongono ai cambiamenti di forma. Nella figura 34 sono indicati i valori di queste due proprietà per l'aria e per l'acqua, a temperature normali. Sono anche visibili le colonne riservate alla lunghezza del modello e alla velocità della corrente nei vari esperimenti della serie. In questi esperimenti la lunghezza e la velocità possono variare entro un campo grandissimo, esattamente come la densità e la viscosità.

I singoli esperimenti che si possono eseguire, contraddistinti da determinati valori di lunghezza, velocità, densità e viscosità, sono infiniti. Inoltre questi esperimenti risultano fisicamente molto diversi uno dall'altro, dato che possiamo lavorare con fluidi tanto diversi come catrame, mercurio, aria e benzina, con dimensioni che vanno da un millesimo di millimetro a una decina di metri, con velocità che possono

lunghezza	velocità	fluidi	densità	viscosità
		aria	0.0012	0.018
		acqua	1.00	0.010
		olio	0.90	0.100

Fig. 34. Tabella dei valori delle variabili importanti, ricavati da una serie di esperimenti su modelli geometricamente simili ideati per spiegare il principio della similitudine dinamica (in questa tabella le viscosità sono misurate in centipoise, pari a 10^{-2} g/cm sec).

andare da un centimetro a 100 chilometri all'ora. In generale sono esperimenti che non hanno addirittura alcun rapporto tra loro, salvo un particolare insieme di circostanze. Supponiamo che in due o più esperimenti le varie forze in equilibrio — cioè la risultante delle forze di viscosità, la risultante delle pressioni e la forza d'inerzia —, tutte misurate per particelle fluide collocate in punti corrispondenti nella similitudine geometrica, presentino gli stessi rapporti tra loro, anche se le loro grandezze non sono rispettivamente uguali. Si dice allora che questi esperimenti sono *dinamicamente simili*. Dal punto di vista della dinamica newtoniana sono effettivamente esperimenti identici.

Mostreremo subito che esperimenti diversi su una serie di corpi geometricamente simili sono dinamicamente simili soltanto se una speciale combinazione dei valori di lunghezza, velocità, densità e viscosità ha esattamente lo stesso valore

numerico nei diversi esperimenti. Questa combinazione è il Numero di Reynolds:

$$\begin{aligned} \text{Numero di Reynolds} &= \frac{\text{densità} \times \text{velocità} \times \text{lunghezza}}{\text{viscosità}} \\ &= \frac{\rho \times V \times L}{\mu} \end{aligned}$$

L'espressione è così chiamata dal nome dello scienziato Osborne Reynolds che, circa ottant'anni fa, suggerì per primo quest'idea.

Come si giunge al Numero di Reynolds.

In una serie di esperienze sul moto dei fluidi, eseguite su corpi geometricamente simili, ciascun esperimento è completamente definito quando sia stata decisa la velocità V , la lunghezza del corpo L , la densità del fluido ρ , e la viscosità del fluido μ .

Dobbiamo ora adottare un particolare punto di vista: anziché interessarci del valore esatto delle forze che agiscono sulle singole particelle fluide ci accontenteremo di valutarne approssimativamente l'importanza dandone l'« ordine di grandezza ». Non dobbiamo preoccuparci troppo se questa valutazione non è esatta: non è privo di significato dire, per esempio, che lo sforzo di trazione di una pulce si misura in centesimi di grammo e quello di una locomotiva in decine di tonnellate; sebbene così non si precisino i millesimi di grammo o il numero delle tonnellate, si mette nettamente in evidenza che il rapporto tra gli sforzi di trazione è « dell'ordine di » 10^9 , vale a dire di circa 1 a 1 miliardo. Col sistema di attenerci all'ordine di grandezza non ci preoccupiamo delle grandezze esatte, e riteniamo corretto un numero decimale in cui la virgola risulti al posto giusto.

La forza d'inerzia che agisce su una particella fluida tipica in uno dei nostri esperimenti è misurata dal prodotto della sua massa per la sua accelerazione. Ora, la massa per unità di volume del fluido è, per definizione, la densità ρ , laddove il volume della particella è direttamente proporzionale alla terza potenza della lunghezza: la massa è quindi proporzionale a ρL^3 . L'accelerazione è il cambiamento di velocità di-

viso per il tempo impiegato perché questo cambiamento avvenga. Il cambiamento di velocità quando il fluido accelera e decelera nelle vicinanze del corpo è dell'ordine di grandezza della stessa velocità V . Il periodo di tempo in cui questo avviene è dell'ordine di grandezza del tempo che impiega una particella fluida media ad attraversare la lunghezza L del corpo alla velocità V : questo tempo è L/V . Di conseguenza l'accelerazione è direttamente proporzionale a V divisa per L/V , cioè a V^2/L . Moltiplicando la misura della massa ρL^3 per la misura dell'accelerazione V^2/L otteniamo forza d'inerzia $\sim \rho L^2 V^2$

dove il simbolo \sim significa in questo caso sia « direttamente proporzionale a », sia « dell'ordine di ».

La forza di viscosità è data dal prodotto della sollecitazione tangenziale dovuta alla viscosità per l'area della superficie su cui essa agisce. L'area di una particella fluida è direttamente proporzionale al quadrato della lunghezza caratteristica, cioè a L^2 . La sollecitazione viscosa è direttamente proporzionale alla viscosità μ e alla rapidità di variazione della velocità al variare della distanza. Poiché quest'ultima è direttamente proporzionale a V/L , giungiamo infine alla conclusione che

forza di viscosità $\sim \mu VL$.

Facendo il rapporto tra la forza d'inerzia e la forza di viscosità e semplificando i termini otteniamo

$$\frac{\text{forza d'inerzia}}{\text{forza di viscosità}} \sim \frac{\rho L^2 V^2}{\mu VL} \sim \frac{\rho VL}{\mu}$$

che è ciò che abbiamo prima chiamato Numero di Reynolds.

Senza nemmeno preoccuparci di sapere se il Numero di Reynolds così calcolato sia numericamente corretto (e può essere corretto al massimo come valore medio, poiché il rapporto delle due forze è diverso per ciascun punto di ogni linea aerodinamica) possiamo esser certi che due esperimenti sono dinamicamente simili se hanno uguale Numero di Reynolds. Ma, oltre a ciò, se scegliamo un insieme coerente di unità di misura per ρ , V , L e μ , tale che il Numero di Reynolds sia adimensionale (sia cioè un numero puro), e

se scegliamo con accortezza la dimensione più significativa del corpo come lunghezza caratteristica L , allora anche la grandezza numerica assume un significato. Un Numero di Reynolds che si trovi tra 1/10 e 10, per esempio, significa che sia le forze d'inerzia sia quelle di viscosità sono importanti. Un Numero di Reynolds inferiore a un millesimo ci autorizzerebbe a trascurare senza timore le forze d'inerzia. Un Numero di Reynolds superiore a un migliaio, invece, ci suggerirebbe che è possibile trascurare le forze di viscosità (vedremo però in seguito che queste forze non possono mai essere completamente trascurate, specialmente vicino al confine di un fluido con un solido).

Un esperimento sulla similitudine dinamica.

Per rendere meno astratta l'idea di similitudine dinamica facciamo un esperimento illustrativo. Useremo due modelli geometricamente simili, due sfere: una è una pallina di plastica con un diametro di 6 millimetri (fig. 35), l'altro un grosso pallone pieno di elio con un diametro di 1 metro

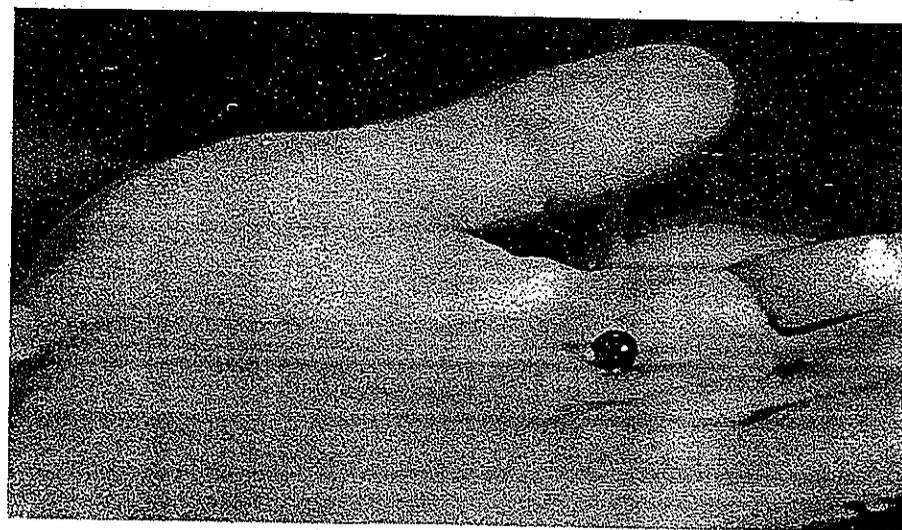


Fig. 35.

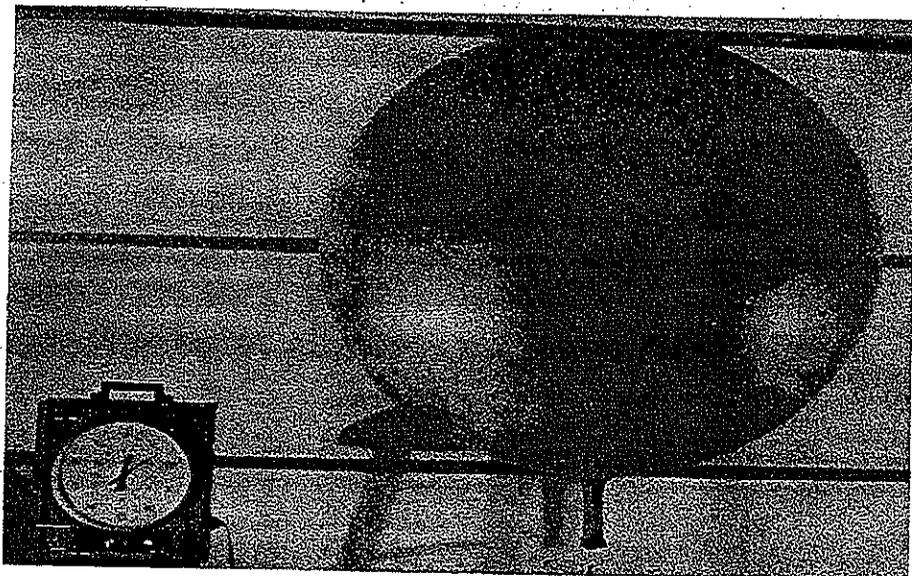


Fig. 36. Questo pallone pieno d'elio sale nell'aria a velocità terminale.

(fig. 36). Attaccando al pallone vari pesi eseguiamo una serie di esperimenti (fig. 36) in ognuno dei quali la velocità terminale di ascesa ha valori diversi. In uno di questi esperimenti la velocità terminale è 5,4 cm/sec. Lasciando cadere la pallina di plastica in acqua troviamo che la sua velocità terminale di discesa è di 55 cm/sec. Per ogni esperimento abbiamo indicato sulla tabella seguente i valori numerici di densità, velocità, lunghezza e viscosità.

Risultati degli esperimenti sulla similitudine dinamica

Lunghezza cm	Velocità cm/sec	Fluido	Densità g/cm ³	Viscosità g/cm sec	Numero di Reynolds *
100	5,4	aria	0,0012	0,00018	3 600
0,60	55	acqua	1,00	0,0089	3 700

* Numero di Reynolds = $\frac{\text{lunghezza} \times \text{velocità} \times \text{densità}}{\text{viscosità}}$

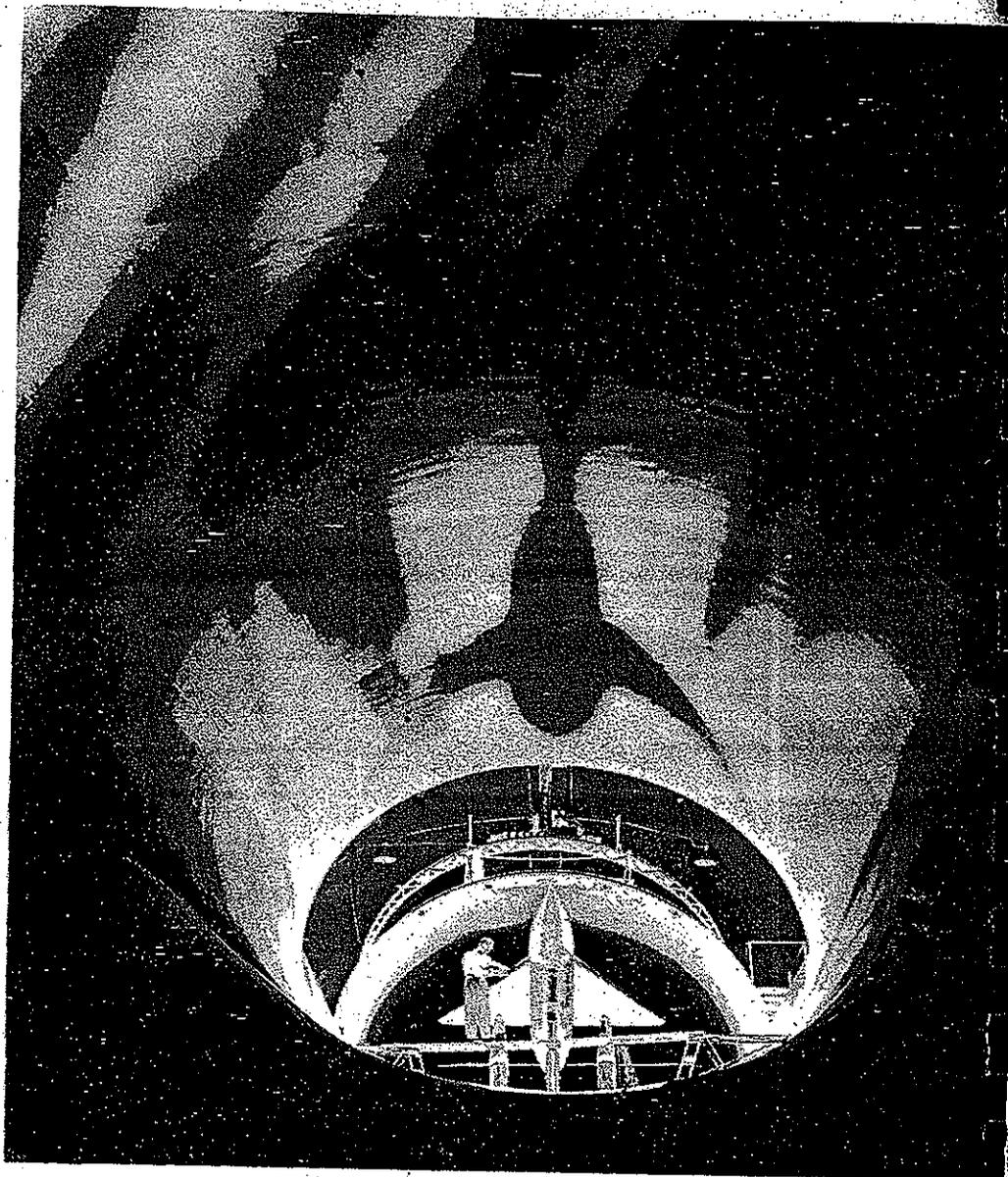


Fig. 37. Il principio della similitudine dinamica ci permette di prevedere il comportamento degli aeroplani di grandezza naturale attraverso alcune prove, relativamente comode e poco costose, che vengono eseguite nella galleria del vento su modelli in scala.

Introducendo questi valori nella formula del Numero di Reynolds otteniamo i valori numerici 3600 e 3700: dunque in questi due particolari esperimenti i Numeri di Reynolds differiscono soltanto di poche unità per cento. Così, sebbene questi esperimenti — uno in un gas e uno in un liquido, uno con un modello grande e uno con un modello piccolo, uno in salita e l'altro in discesa — sembrano in apparenza molto diversi, in realtà sono simili, dinamicamente simili. Conseguenza di grande importanza pratica è, come vedremo in seguito, che la condizione di similitudine dinamica ci permette di fare una cosa straordinaria: ci mette in grado di *predire* la resistenza che il pallone pieno d'elio incontra nell'aria, facendo un esperimento assai diverso, in cui misuriamo la resistenza che la pallina di plastica incontra nell'acqua.

L'idea della similitudine dinamica è la base stessa su cui si fondano le prove eseguite nelle gallerie del vento e altri tipi di prove su modelli. La similitudine dinamica è la chiave che ci permette di predire, sulla base di misure eseguite nella galleria del vento sopra un modello di aeroplano (fig. 37), le forze che l'aeroplano vero incontrerà.

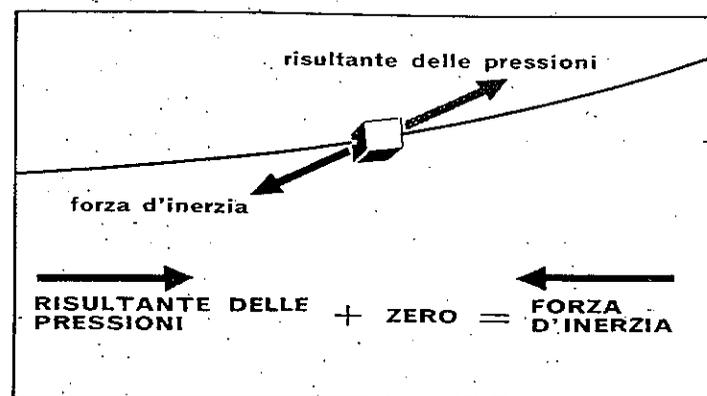
Altri significati del Numero di Reynolds.

La figura 38 mostra come il Numero di Reynolds ci venga in aiuto anche altrimenti. Abbiamo visto che il Numero di Reynolds è la misura del rapporto tra la forza d'inerzia e la forza di viscosità, nell'equilibrio delle forze:

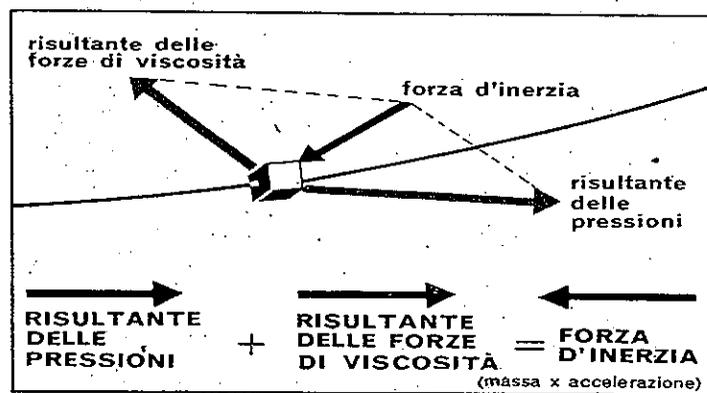
$$\text{Numero di Reynolds} = \frac{\text{densità} \times \text{velocità} \times \text{lunghezza}}{\text{viscosità}}$$

$$\text{Numero di Reynolds} = \frac{\text{forze d'inerzia}}{\text{forze di viscosità}}$$

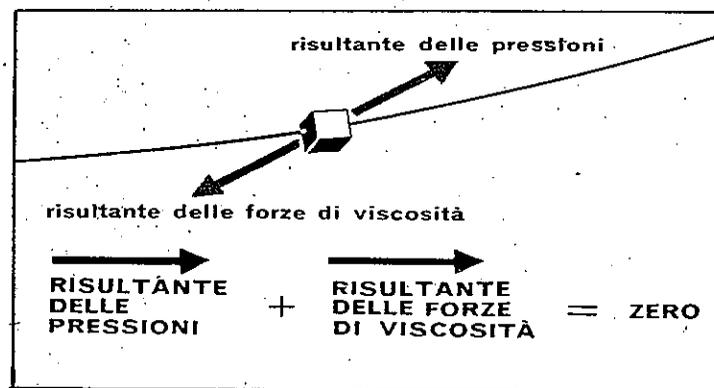
Fig. 38. Prospetto che spiega il significato del Numero di Reynolds come indice dell'importanza relativa delle forze di viscosità e di inerzia.



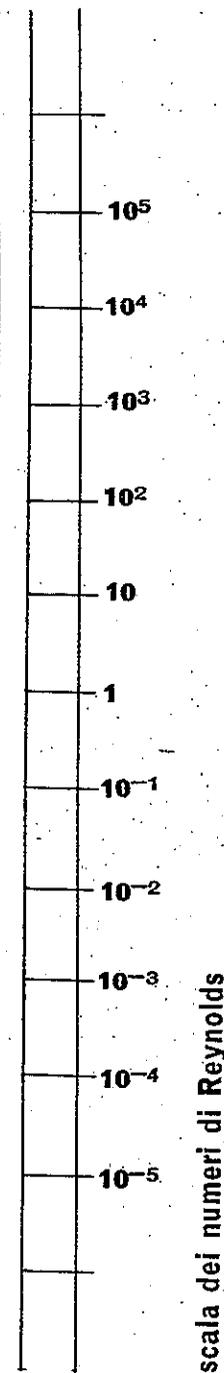
VISCOSITÀ ZERO



EQUAZIONE DEL MOTO DI NEWTON



ALTISSIMA VISCOSITÀ



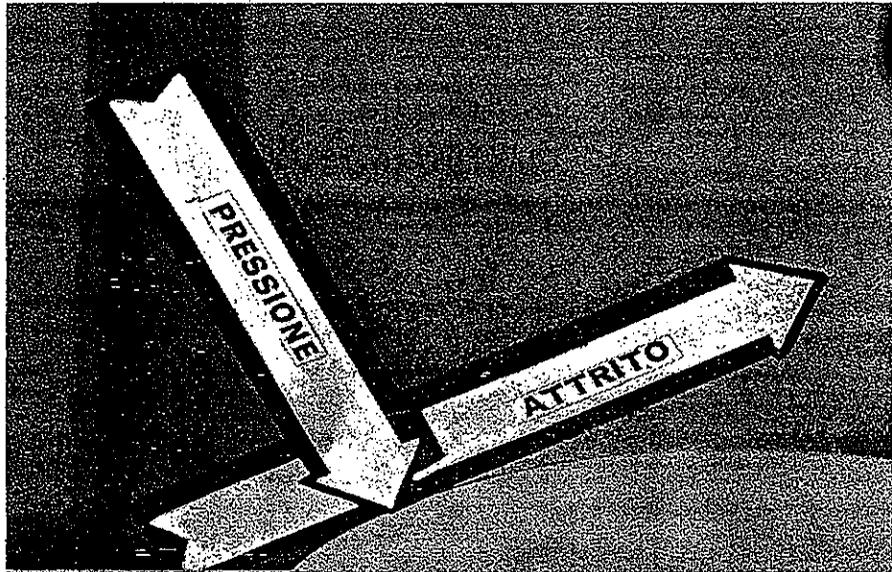
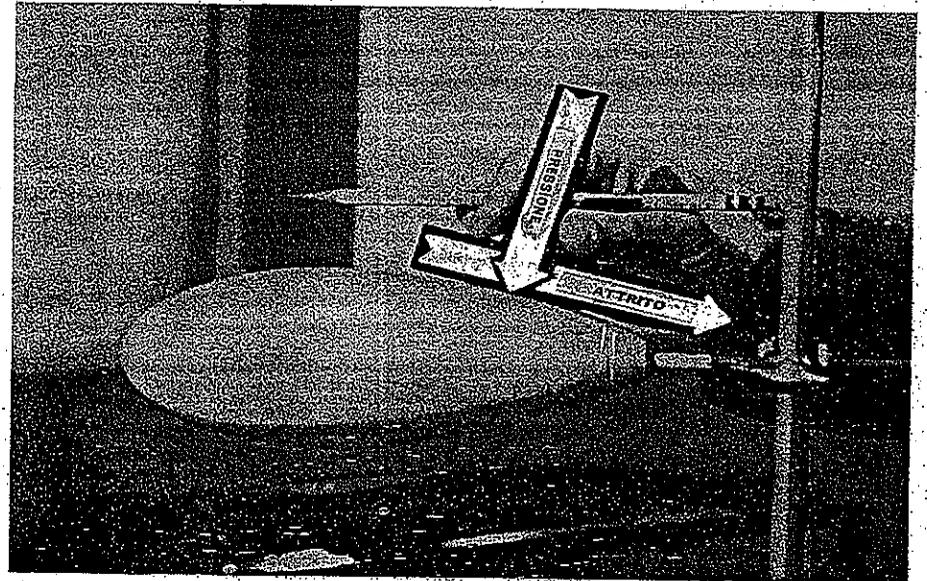
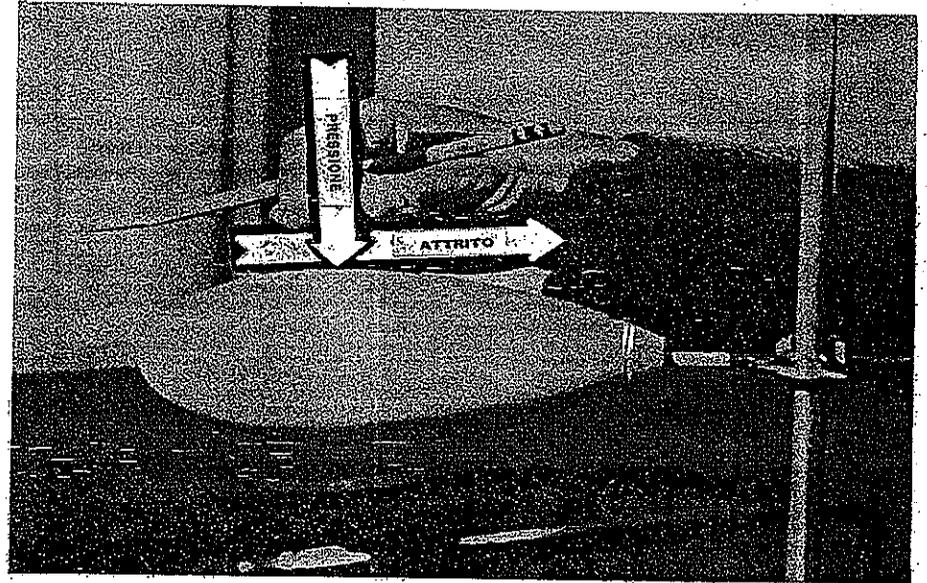


Fig. 39. Forze di superficie esercitate su un oggetto in una corrente in movimento: (a) soltanto quelle particelle fluide (rappresentate da un cubetto) in contatto immediato con la superficie contribuiscono alla forza esercitata sull'oggetto; (b) pres-



sioni e forze d'attrito applicate dal fluido vicino al bordo d'attacco di un corpo aerodinamico; (c) le stesse forze vicino alla spalla; (d) le stesse forze vicino al bordo di fuga.

Un Numero di Reynolds estremamente basso, per esempio, significa che la forza di viscosità è enormemente grande in confronto alla forza d'inerzia, a tal punto che la forza d'inerzia può essere trascurata. Abbiamo allora un equilibrio tra la risultante delle pressioni esercitate sul fluido e la risultante delle forze di viscosità che si oppongono alla deformazione. Un Numero di Reynolds estremamente alto, invece, significa che la risultante delle forze di viscosità può essere trascurata: abbiamo allora un equilibrio tra la risultante delle pressioni esercitate sul fluido e la resistenza inerziale all'accelerazione.

Riassumendo: un Numero di Reynolds estremamente basso indica un comportamento molto viscoso anche se il fluido in sé stesso può avere scarsa viscosità; mentre un Numero di Reynolds estremamente alto indica un comportamento debolmente viscoso, anche se il fluido in sé può essere estremamente viscoso.

Forze che agiscono sugli oggetti.

Finora abbiamo esaminato i principi fondamentali che regolano la dinamica dei fluidi concentrando la nostra attenzione sulle relazioni tra forze e movimenti per una piccola particella fluida qualsiasi. Prenderemo ora in esame le forze che agiscono sopra un oggetto di dimensioni rilevanti, sia che l'oggetto si muova in un fluido, sia che venga tenuto fermo in una corrente di fluido in movimento.

Dobbiamo premettere che qualunque forza venga esercitata dal fluido sul modello, essa è applicata alla superficie del modello soltanto da quelle particolari particelle fluide che si trovano in contatto immediato con questa superficie (fig. 39a). Su ogni punto della superficie la particella fluida adiacente esercita in generale una forza normale (pressione) e una forza tangenziale (attrito): ciascuna di queste forze ha una componente orientata nello stesso senso della corrente (fig. 39b, c, d).

Se esaminiamo le forze di attrito agenti su un corpo di forma più o meno aerodinamica, vediamo che per la maggior parte del corpo le forze tangenziali sono quasi parallele alla direzione della corrente e rivolte nel suo stesso

senso: sommate insieme, esse costituiscono la resistenza diretta viscosa o di attrito.

In un punto vicino all'estremità anteriore, o bordo d'attacco, la pressione, che agisce perpendicolarmente alla superficie ha una componente diretta nel senso della resistenza (fig. 39b); nel punto di massimo spessore del corpo (fig. 39c) la pressione non ha componente di resistenza; vicino all'estremità posteriore, o bordo di fuga, (fig. 39d) la pressione ha una componente diretta in senso opposto alla resistenza: cioè la componente orizzontale della pressione spinge in realtà l'oggetto contro la corrente. Sommando insieme tutte queste componenti per tutti i punti della superficie del corpo (tenendo conto del senso in cui è diretto ogni elemento), otteniamo il secondo contributo alla resistenza complessiva: la resistenza di pressione.

La resistenza d'attrito è sempre presente perché tutti i fluidi hanno una certa viscosità; invece, la resistenza di pressione — e questo è molto importante — dipende moltissimo dalla forma del corpo: in confronto alla resistenza d'attrito può essere grandissima o del tutto trascurabile. L'intensità della resistenza di pressione dipende dalla differenza tra la pressione media che agisce sulla metà anteriore del corpo e la pressione media che agisce sulla metà posteriore: se la pressione media sulla metà posteriore è uguale a quella sulla metà anteriore, allora la risultante delle resistenze di pressione è zero; ma se la pressione media sulla metà posteriore è molto inferiore alla pressione media sulla metà anteriore, la risultante delle resistenze di pressione può essere molto grande.

Perché i due tipi di resistenza vanno esaminati separatamente? Perché sono dovuti a cause diverse. È dato che può prevalere l'uno o l'altro, secondo il valore del Numero di Reynolds, non sorprende dopo tutto che vi siano tipi diversi e distinti di moto dei fluidi.

4 Correnti viscosose a basso Numero di Reynolds

Abbiamo già rilevato l'importanza del Numero di Reynolds per indicare se nel moto predominano gli effetti inerziali o gli effetti viscosi. La nostra comprensione intuitiva dell'intero nostro argomento può essere ora ampliata esaminando più a fondo le due possibilità estreme: un caso estremo, che sarà trattato in questo capitolo, è quello di fluidi viscosissimi nel cui moto predominano le forze di viscosità; l'altro caso estremo, che sarà trattato nel capitolo seguente, è quello di fluidi con bassissima viscosità in cui, nella maggior parte del campo della corrente, le forze di viscosità sono trascurabili in confronto alle forze d'inerzia.

Esempi di materiali molto viscosi.

Il catrame contenuto in un barile a temperature normali dà l'impressione di essere abbastanza solido e se lo colpite con un martello sembra di legno massiccio; eppure è un liquido, un liquido enormemente viscoso. Se vi poggiate sopra un mattone, il mattone resta lì come se si trovasse su una piattaforma, ma se ritornate il giorno dopo, è scomparso: sta sul fondo del barile.

Pensiamo un po' a quel che succede quando il catrame viene spostato dal mattone che sprofonda lentamente. Nel moto del catrame entrano in azione due tipi di forze: in primo luogo, le sollecitazioni viscosose tangenziali si oppongono alle deformazioni delle particelle di catrame; in secondo luogo, vi sono quelle che abbiamo chiamato resistenze inerziali all'accelerazione delle particelle di catrame. Però, quando vedete con quanta lentezza si muove il catrame, capite subito che l'accelerazione di ogni particella di catrame — e quindi la sua resistenza inerziale — è estremamente piccola. La resistenza viscosa alla deformazione, invece, è straordinariamente grande, come è evidente. Potete convincervene facilmente: prendete una lunga bacchetta d'acciaio,

tenetela verticale sopra il barile e osservate quanto tempo ci vuole a farvela sprofondare; vi sarete stancati molto prima che la bacchetta tocchi il fondo. In questi movimenti le forze di viscosità, rispetto alle forze d'inerzia, possono benissimo essere considerate infinite. Si ha così la situazione particolare della figura 32a.

La figura 40 mostra, a scopo illustrativo, una vaschetta contenente glicerina molto viscosa. Con una siringa da iniezioni piena di glicerina colorata abbiamo delimitato dei quadrati di liquido in modo che possiate osservare il moto del fluido quando un cilindro è spinto attraverso di esso. Nelle successive fotografie della figura 40 potete vedere come si deformano le particelle fluide quando vengono spostate dal cilindro: notate che i moti si propagano a notevole distanza dal cilindro. Quando il cilindro viene mosso estremamente adagio, i moti sono così lenti che provocano a mala pena un'accelerazione del fluido. Ma la sollecitazione viscosa tangenziale è direttamente proporzionale alla velocità di deformazione: così, anche se le velocità di deformazione che potete osservare nella figura 40 sono piccolissime, si oppongono loro sollecitazioni viscosose molto forti perché il fluido ha una viscosità così alta.

Estensione del concetto di comportamento molto viscoso.

L'aria, come la maggior parte dei gas, ha una viscosità relativamente piccola, eppure i gas si muovono talvolta come se fossero viscosissimi. Sarebbe bene domandarci: quando è che un fluido si comporta in modo molto viscoso? Quando è che si comporta in modo solo debolmente viscoso? La risposta l'abbiamo a portata di mano, nella formula del Numero di Reynolds:

$$\text{Numero di Reynolds} = \frac{\text{densità} \times \text{velocità} \times \text{lunghezza}}{\text{viscosità}}$$

Il Numero di Reynolds non contiene soltanto la viscosità del fluido, ma anche la densità del fluido, la sua velocità e la lunghezza, cioè la dimensione lineare caratteristica, dell'oggetto. Dalla disposizione algebrica della formula del Nu-

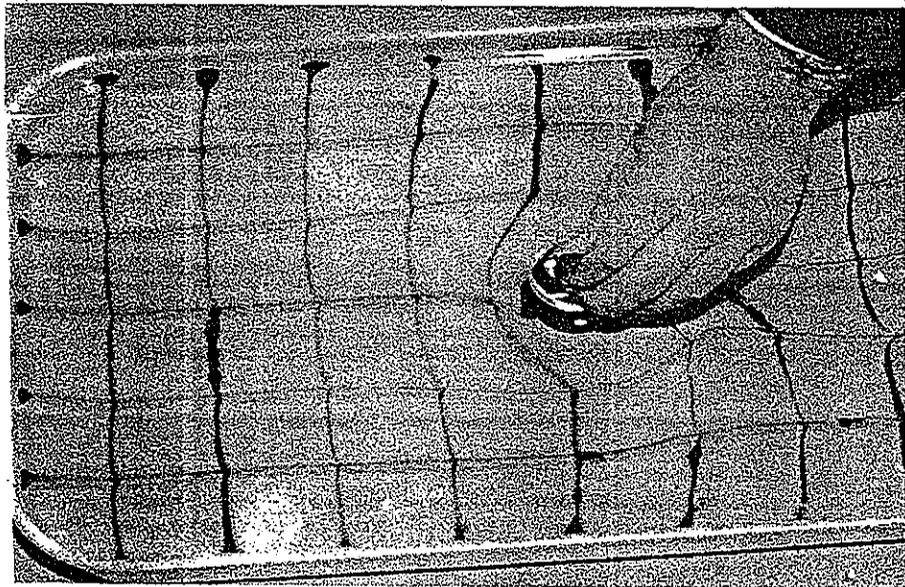
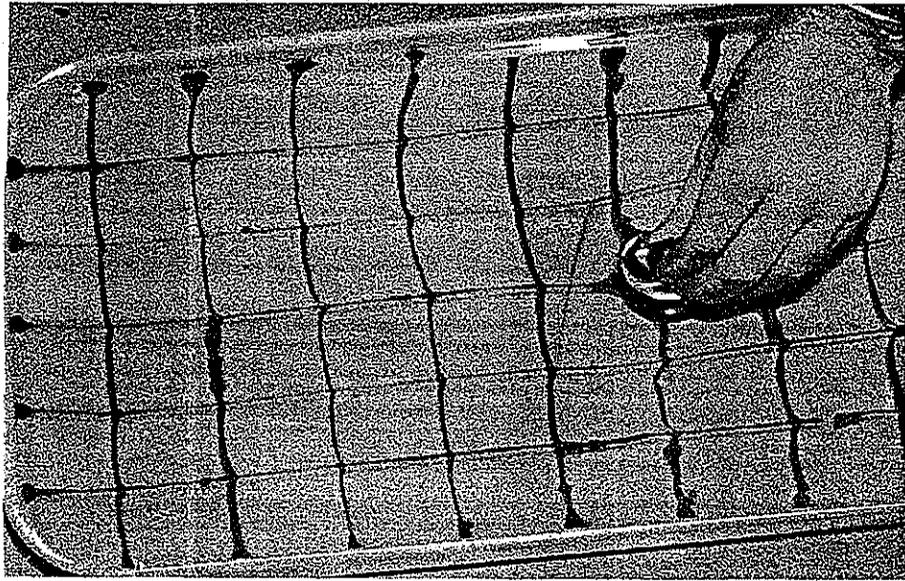
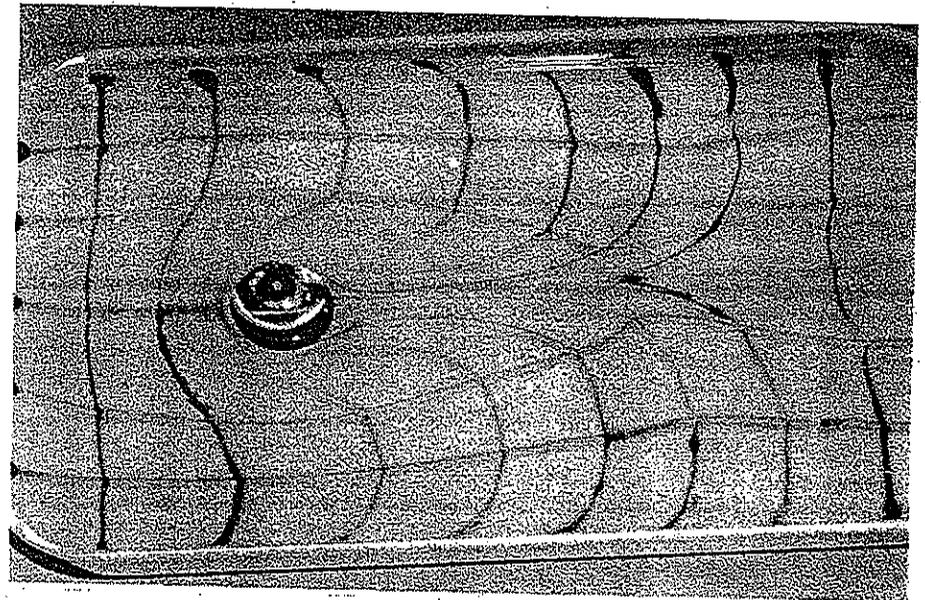
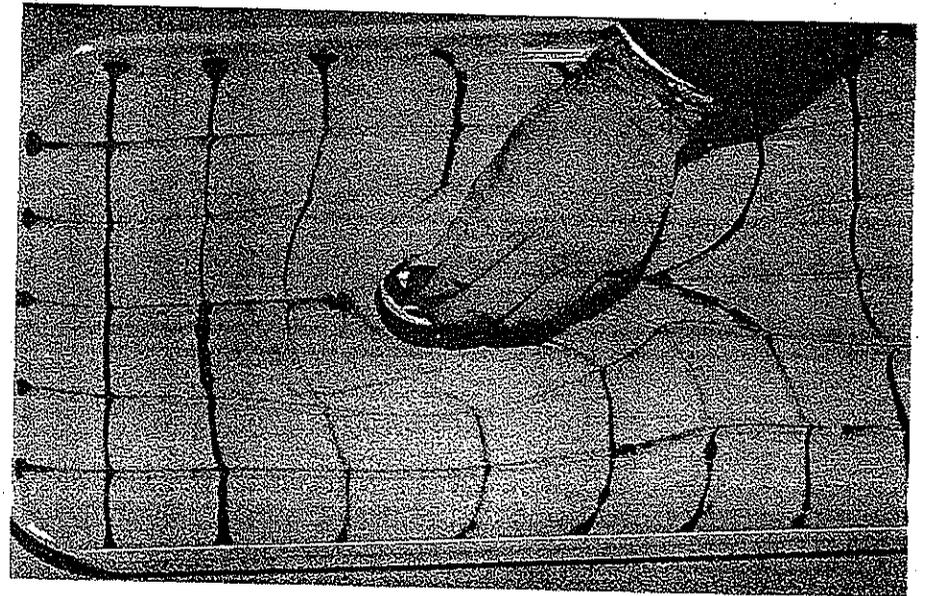


Fig. 40.



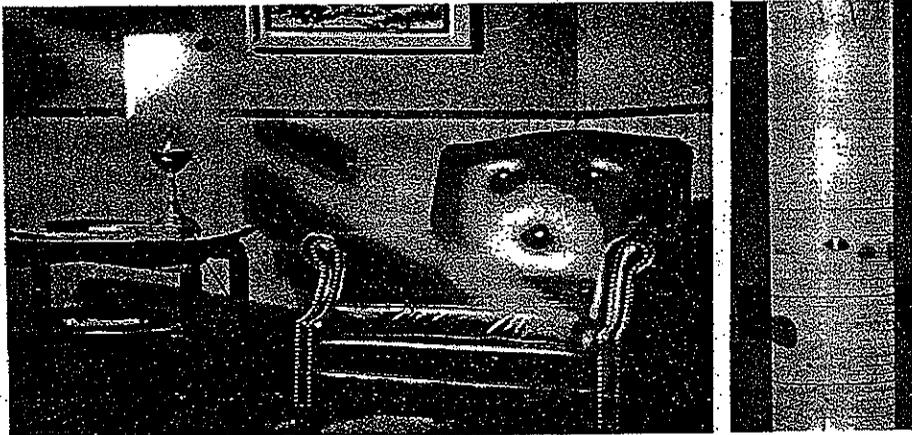


Fig. 41.

mero di Reynolds vediamo che una grandissima viscosità dà un Numero di Reynolds molto basso e produce perciò una corrente in cui prevalgono le forze di viscosità. Vediamo anche, però, che il Numero di Reynolds può essere molto piccolo per altri motivi: una densità bassissima, per esempio, ha lo stesso effetto sul Numero di Reynolds di una viscosità altissima. Perciò il volo in aria rarefatta, molto al di sopra della superficie terrestre, può essere un moto di tipo molto viscoso anche se l'aria ha una bassa viscosità e anche se nel linguaggio comune chiamiamo « sottile » l'aria rarefatta. Altri esempi di moti di fluidi in cui prevalgono le forze di viscosità, cioè con Numero di Reynolds molto basso, sono quelli in cui si hanno bassissime velocità o in cui intervengono oggetti di dimensioni molto piccole. Quando, per esempio, un oggetto sufficientemente piccolo si muove abbastanza lentamente attraverso l'aria, il moto è di tipo molto viscoso, sebbene l'aria sia solo debolmente viscosa. Accade proprio così allorché un granello di polvere discende lentamente in una stanza: in proporzione le forze di viscosità sono più forti per i minuscoli granelli di polvere che scendono nell'aria (fig. 41a) di quanto lo siano per una grossa palla d'acciaio che cada velocemente in una colonna di viscosissima glicerina (fig. 41b). I batteri che vivono nell'aria trovano la vita tanto viscosa quanto la troveremmo noi se vivessimo nella melassa.

Vediamo dunque che ha più senso parlare di una *situazione molto viscosa*, piuttosto che di un fluido molto viscoso.

Legge di Resistenza di Stokes per valori molto bassi del Numero di Reynolds.

Un centinaio d'anni fa Sir George Stokes, basandosi sul postulato che le forze d'inerzia siano completamente trascurabili, ricavò con metodo matematico una formula semplice per la resistenza di un oggetto in condizioni in cui il Numero di Reynolds sia molto basso:

resistenza proporzionale a velocità \times viscosità \times lunghezza.

Questa formula dice che la resistenza è direttamente proporzionale alla velocità della corrente, alla viscosità del fluido e alla lunghezza, ossia alle dimensioni lineari dell'oggetto. Per trasformare la proporzionalità in uguaglianza dobbiamo introdurre una costante di proporzionalità, che è un numero puro il cui valore dipende soltanto dalla forma dell'oggetto:

resistenza = costante \times velocità \times viscosità \times lunghezza.

Possiamo verificare il postulato di Stokes scegliendo una forma geometrica particolare ed eseguendo poi, in modo sistematico, una serie di esperimenti in cui misuriamo la resistenza, la velocità, la viscosità e la lunghezza. Possiamo poi vedere se le quattro quantità si adattano l'una all'altra proprio nella forma richiesta dalla Legge di Stokes, e questo a sua volta servirà a verificare se le forze d'inerzia possono davvero essere trascurate per valori molto bassi del Numero di Reynolds.

La forma geometrica da noi scelta è la sfera. Possiamo misurare direttamente ed esattamente il diametro di una sfera per mezzo di un calibro: sarà questa la lunghezza caratteristica che appare nella formula. La viscosità del fluido può essere misurata con un viscosimetro.

Lasciemo cadere la sfera in una colonna di liquido alla sua velocità terminale, così che la resistenza sarà uguale al peso netto della sfera misurato quando è sospesa nel liquido. La velocità del fluido relativamente al corpo sarà misurata dal tempo che il corpo impiega a percorrere nella sua caduta una distanza data.

Poiché stiamo ora misurando la velocità come rapporto tra

distanza e tempo, possiamo utilmente riscrivere la formula di Stokes in questo modo:

$$\text{resistenza} = \text{costante} \times \frac{\text{distanza} \times \text{viscosità} \times \text{lunghezza}}{\text{tempo}}$$

Se tre qualsiasi delle cinque quantità che figurano in questa formula sono mantenute invariate, le altre due dovrebbero risultare legate da una proporzionalità diretta. La tabella qui sotto mostra il piano di tre esperimenti di questo tipo: la seconda colonna indica quali sono per ciascun esperimento le tre quantità della formula che vanno mantenute costanti; nell'ultima colonna è indicata la proporzionalità prevista dalla Legge di Stokes.

Esperimento N°	Variabili mantenute a un valore costante	Proporzionalità prevista
1	Distanza Viscosità Lunghezza	Resistenza x Tempo = = Costante
2	Resistenza Distanza Viscosità	$\frac{\text{Lunghezza}}{\text{Tempo}} = \text{Costante}$
3	Resistenza Distanza Lunghezza	$\frac{\text{Viscosità}}{\text{Tempo}} = \text{Costante}$

Per la prima serie di esperimenti vogliamo che tutto resti invariato tranne la resistenza. Abbiamo perciò costruito due sferette che avessero esattamente lo stesso diametro ma diverso peso netto nella glicerina (fig. 42). Lasciamo cadere prima la sferetta più leggera e aspettiamo che abbia raggiunto la velocità terminale: troviamo che occorrono 20,0 secondi perché la pallina cada per 10 centimetri (fig. 43). La sferetta più pesante pesa nella glicerina quattro volte più della prima, perciò alla velocità terminale ha una resistenza esattamente quattro volte maggiore: ripetendo l'esperimento con la sferetta più pesante troviamo che occorrono 4,9 se-

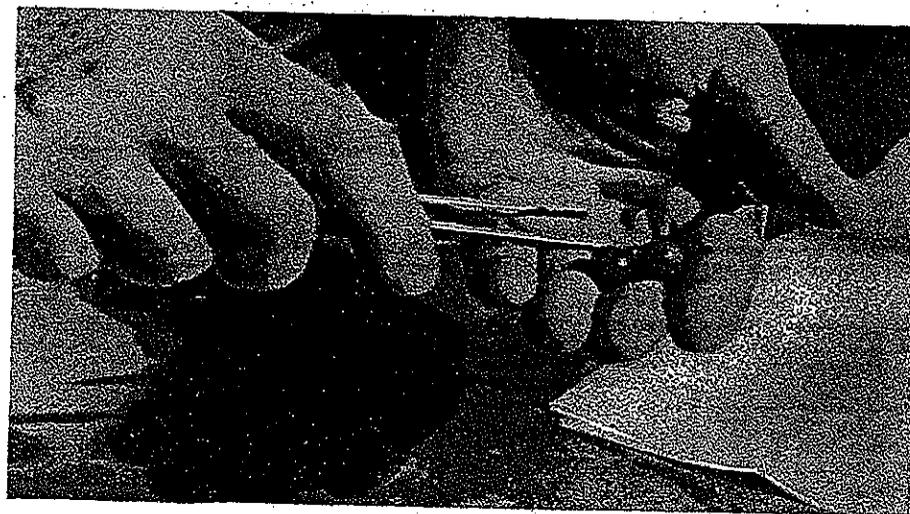


Fig. 42. Le due sfere hanno uguali dimensioni, ma quando sono immerse nella glicerina una pesa quattro volte più dell'altra.

condi perché cada a velocità terminale per 10 centimetri. La tabella seguente riporta questi dati e i risultati ottenuti.

Resistenza	Tempo	Resistenza x Tempo
1	20,0	20,0
4	4,9	19,6

Nei due esperimenti, il prodotto della resistenza per il tempo, entro i limiti degli errori sperimentali, è uguale: abbiamo così una verifica sperimentale del postulato che sta alla base della Legge di Resistenza di Stokes.

Per la seconda verifica del postulato abbiamo bisogno che tutto resti invariato tranne le dimensioni lineari caratteristiche degli oggetti. Usiamo perciò due sfere che hanno esattamente lo stesso peso nella glicerina (e quindi la stessa

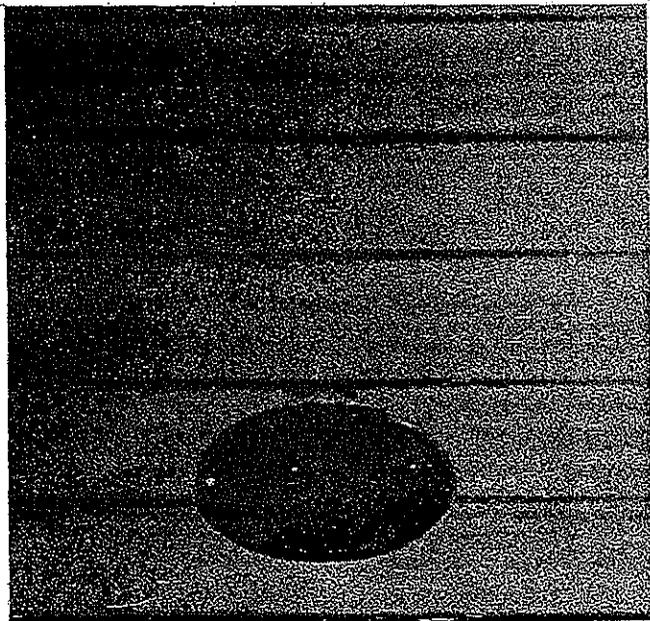
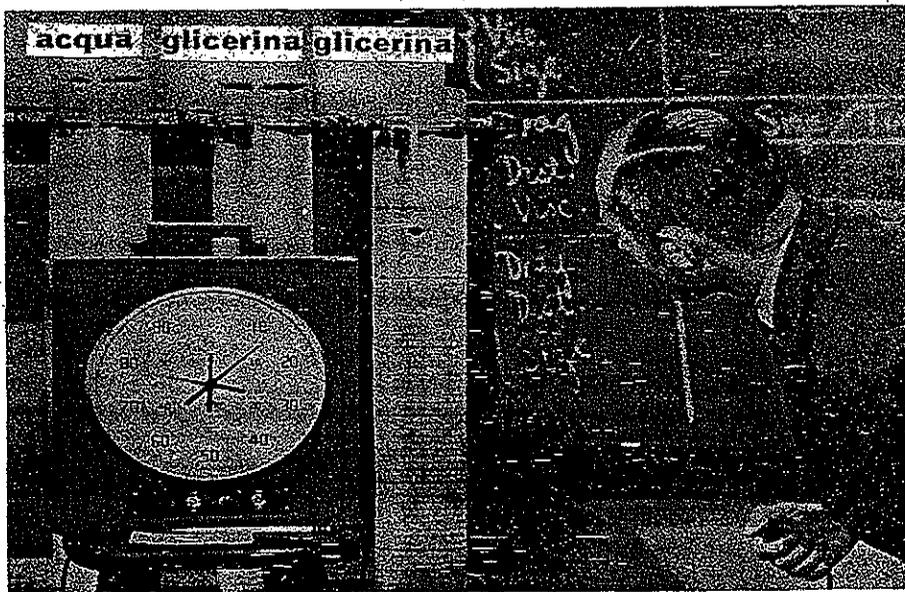


Fig. 43. Esperimenti sulla velocità terminale eseguiti con una sfera che cade nella glicerina percorrendo a velocità terminale una distanza definita.

resistenza), ma i cui diametri stanno tra loro nel rapporto di 1 a 2 (fig. 44). Ecco i dati:

Lunghezza	Tempo	Lunghezza/Tempo
1	20,0	0,050
2	38,6	0,052

Restando sempre entro i limiti degli errori sperimentali, troviamo che i rapporti lunghezza/tempo sono gli stessi e abbiamo così una seconda verifica sperimentale della Legge di Stokes.

Nella terza prova vogliamo che vari soltanto la viscosità: usiamo perciò due recipienti graduati, uno contenente glicerina e l'altro un olio di silicone che è 61 volte più viscoso della glicerina. Le due sferette hanno uguale diametro e uguale peso netto, quando ciascuna è immersa nel liquido in cui sarà fatta cadere. La figura 45 mostra come viene eseguito l'esperimento. I dati e i risultati compaiono nella figura 46. Abbiamo di nuovo un buon accordo, entro l'approssimazione sperimentale, con le previsioni della Legge di Stokes.

Effetti della densità del fluido.

Ripensando a questi tre esperimenti vediamo che sono state variate sistematicamente le dimensioni, la viscosità e la resistenza e che questo influisce sulla velocità di caduta proprio nel modo indicato dalla Legge di Stokes. Sembra certamente bizzarro che la resistenza non dipenda dalla densità del fluido: si sarebbe potuto pensare che un fluido pesante offrisse al moto di un corpo una resistenza maggiore di un fluido più leggero.

Per verificare se effettivamente la densità non interviene possiamo fare un esperimento con due cilindri verticali contenenti colonne d'aria (fig. 47a). Il primo contiene aria a pressione atmosferica normale, mentre dal secondo è stato tolto il 99 per cento dell'aria: perciò la densità dell'aria in

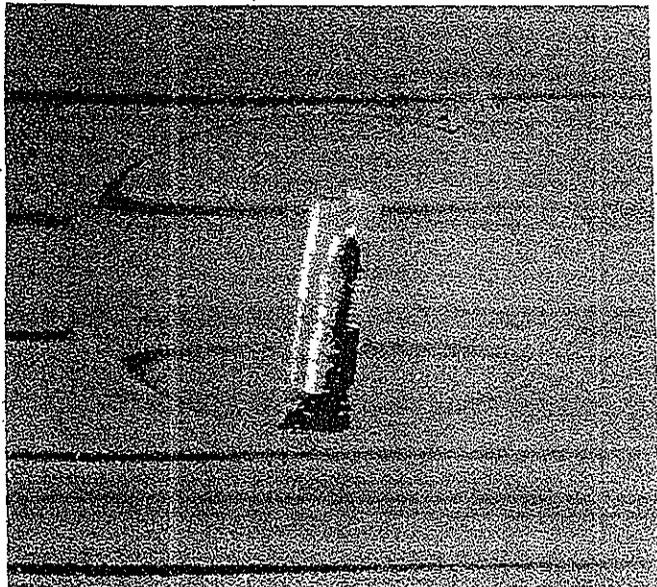


Fig. 44. Esperimenti sulla velocità terminale di due sfere aventi lo stesso peso netto nella glicerina, ma i cui diametri stanno tra loro nel rapporto di uno a due. Il foro praticato nella sfera più grande contiene il bastoncino d'ottone con cui la sfera era stata appesantita per ottenere il peso netto voluto.

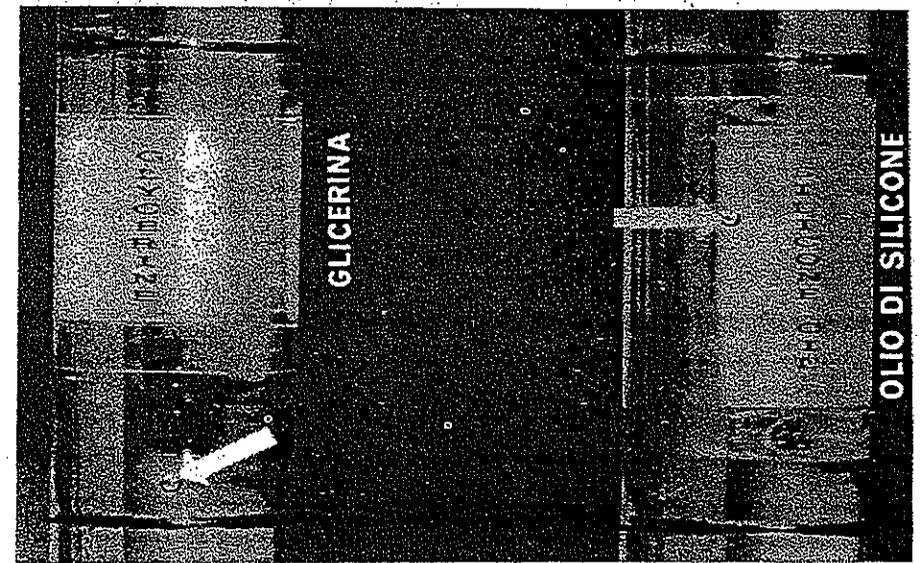
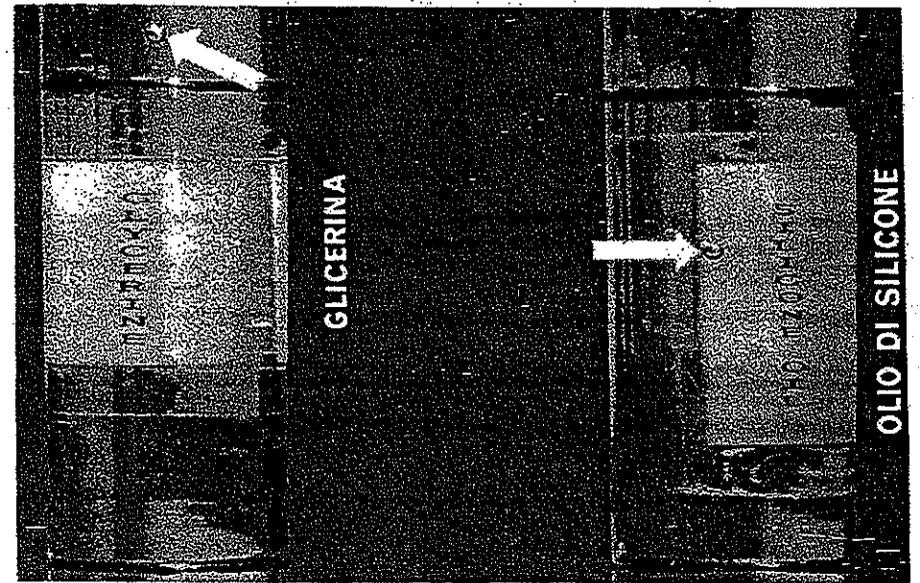


Fig. 45. Esperimenti sulla velocità terminale di due sfere, aventi le stesse dimensioni e lo stesso peso netto, che cadono rispettivamente nella glicerina e in un olio di silicone che è 61 volte più viscoso della glicerina. Osservate fin dove è scesa la sfera nella glicerina nel tempo in cui l'altra è giunta appena oltre la « L » di « SILICONE ».

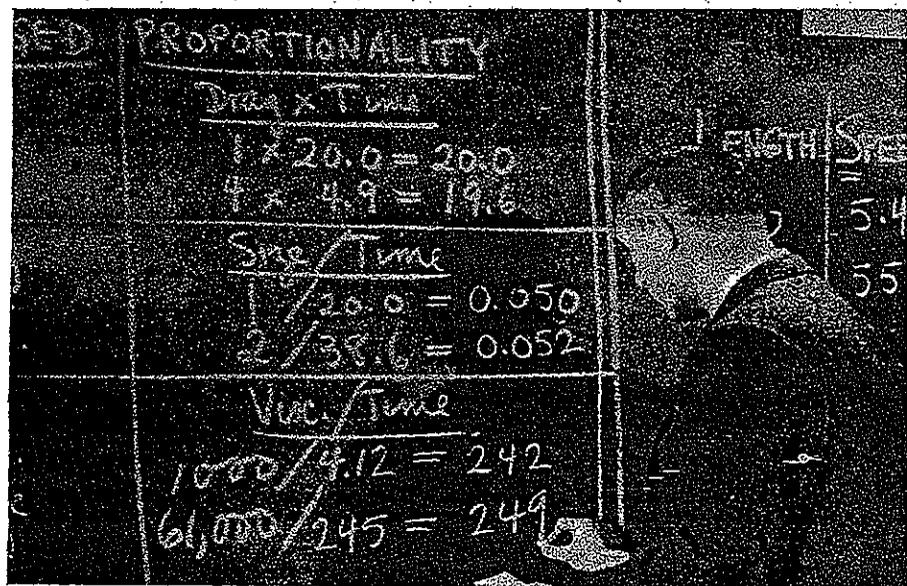


Fig. 46. Risultati dei tre esperimenti precedenti.

quest'ultimo è solo l'uno per cento della densità di quella che c'è nel primo cilindro. L'esperimento consiste nel lasciar cadere, da contenitori posti alla sommità dei due cilindri, piccolissime particelle di polvere e nel confrontarne le velocità terminali di caduta.

Ora, per interpretare le osservazioni dobbiamo tener presente una notevole proprietà dei gas (l'averla prevista fu un grande trionfo della teoria cinetica dei gas): un cambiamento anche grande nella pressione non cambia molto la viscosità di un gas, purché la temperatura resti invariata. Perciò in entrambi i cilindri l'aria ha praticamente la stessa viscosità anche se le densità differiscono da uno a 100.

Osservando le particelle di polvere che cadono (fig. 47b) si constata che la velocità terminale è la stessa nei due cilindri: in altre parole, l'aria che è stata rarefatta 100 volte offre alla polvere che cade proprio la stessa resistenza dell'aria avente densità normale.

Perciò la formula di Stokes è esatta, non solo per le quantità che include ma anche per quelle che esclude.

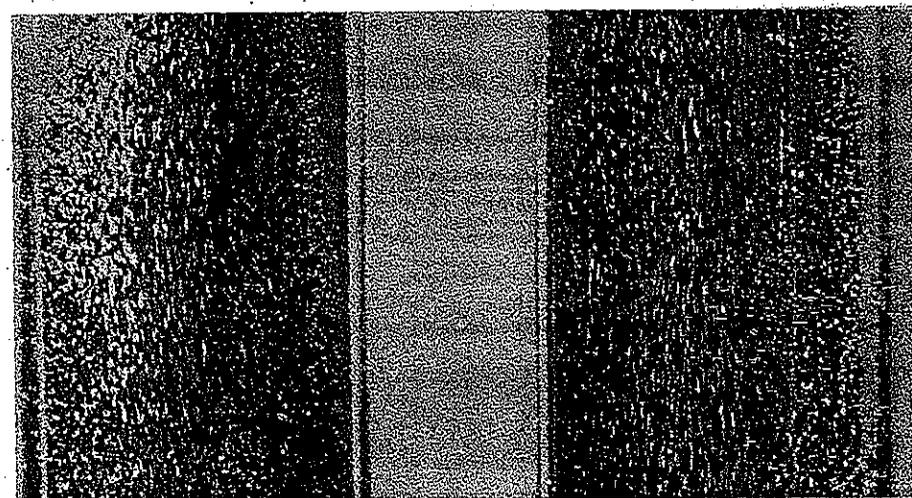
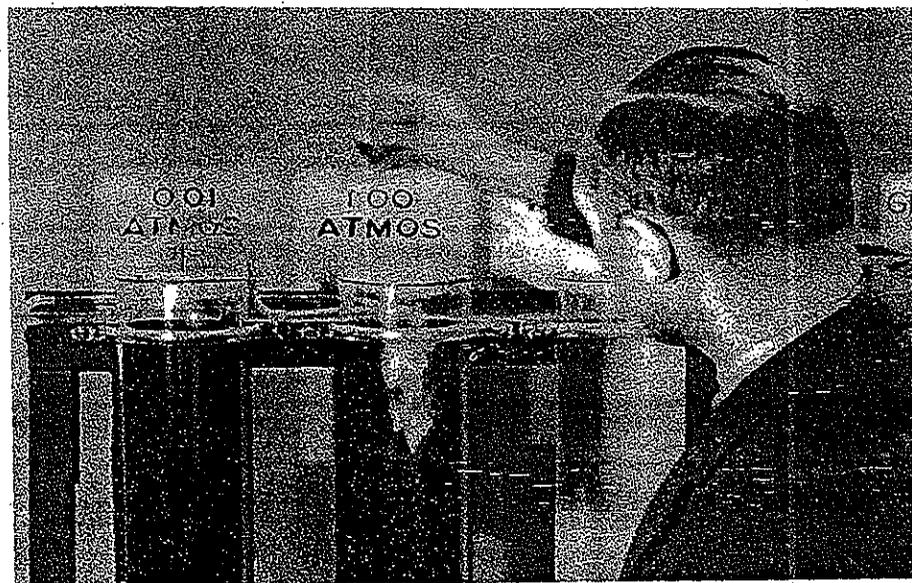


Fig. 47. Quando piccolissime particelle di polvere cadono attraverso una colonna d'aria di densità pari a quella atmosferica e attraverso un'altra colonna con densità pari a un centesimo di quella atmosferica hanno le stesse velocità terminali: (a) l'apparecchiatura, (b) primo piano. Poiché la lunghezza delle striature è uguale in entrambi i tubi le velocità sono uguali.

Questi esperimenti e molti altri di diverso genere provano decisamente che Stokes aveva ragione: con valori del Numero di Reynolds sufficientemente bassi le forze d'inerzia sono realmente trascurabili. Il nostro ultimo esperimento è di particolare evidenza, perché, se le forze d'inerzia non hanno importanza, allora la densità del fluido, che dopo tutto è soltanto una misura dell'inerzia del fluido, deve essere una proprietà insignificante; e abbiamo visto che è così. Se il mercurio fosse meno viscoso dell'aria (lo è solo dieci volte di più), offrirebbe minor resistenza dell'aria a microorganismi che nuotassero attraverso di esso, pur pesando diecimila volte di più.

5 La legge di Resistenza per alti Numeri di Reynolds

Nel capitolo precedente abbiamo visto che le leggi di resistenza per le correnti in cui predomina la viscosità, cioè a bassissimi Numeri di Reynolds sono semplici e non presentano anomalie. All'altro estremo invece, con altissimi Numeri di Reynolds, la situazione è molto meno semplice e dobbiamo introdurre un gran numero di idee nuove — strato limite, corrente laminare, corrente turbolenta e stallo — anche soltanto per descrivere la situazione. Gli apparecchi più comuni funzionano nell'ambito di questi fenomeni relativamente complessi: aeroplani, turbine idrauliche, sistemi di ventilazione, razzi, motori a reazione, navi, eliche sono soltanto alcuni esempi di macchine funzionanti ad alti Numeri di Reynolds.

Esperimenti sugli effetti della velocità sulla resistenza.

Eseguiamo alcuni esperimenti sulla resistenza servendoci della nostra piccola galleria del vento per vedere come, al variare della velocità dell'aria, varia la resistenza di una « buona » forma aerodinamica, per esempio simile alla sagoma di una fusoliera; utilizzeremo per questo la leva e il quadrante della bilancia (fig. 48). A velocità zero anche la resistenza del mezzo deve essere zero: controbilanciamo la leva in modo che l'indice sul quadrante dia questa lettura. A una velocità di 75 miglia (circa 120 chilometri) all'ora la resistenza che leggiamo sul quadrante è 1,0 unità (fig. 48a); a una velocità doppia, 150 miglia all'ora (circa 240 chilometri), misuriamo una resistenza di 4,0 unità (fig. 48b); infine, con una velocità tripla, 225 miglia all'ora (circa 360 chilometri), la resistenza sale a 9,5 unità (fig. 48c). Ora che possediamo questi dati (fig. 48d), come possiamo utilizzarli? La prima cosa che notiamo è che quando la velocità è stata raddoppiata la resistenza è divenuta molto più

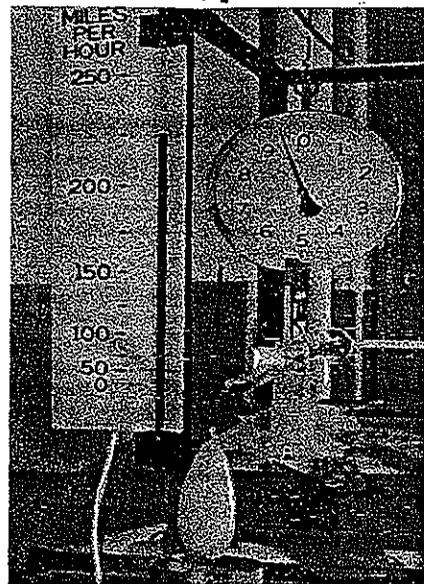
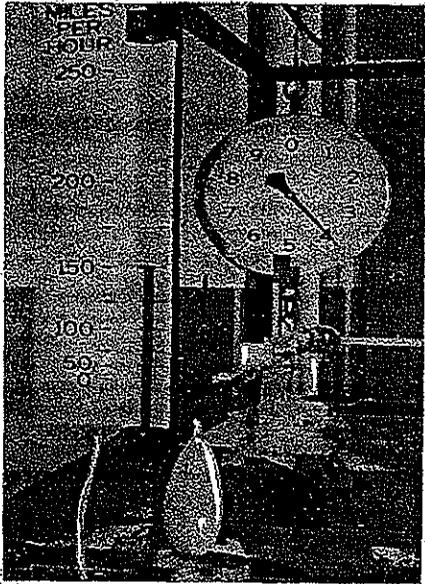
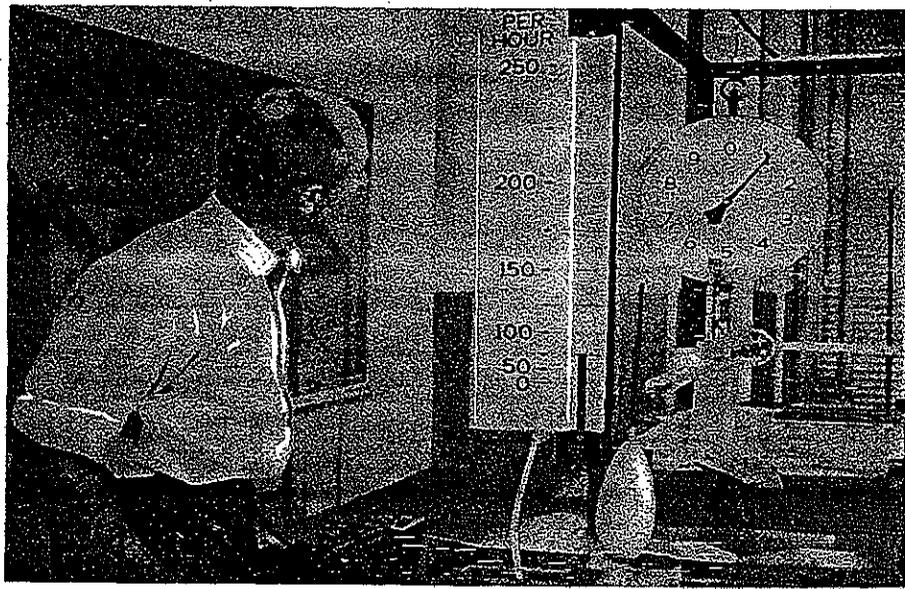


Fig. 48. Esperimento per accertare come varia la resistenza di un corpo aerodinamico al variare della velocità ad alti Numeri di Reynolds. L'apparecchio in funzione: (a) a 75 miglia (circa 120 chilometri) all'ora; (b) a 150 miglia (circa 240 chilometri) all'ora; (c) a 225 miglia (circa 365 chilometri) all'ora.



Fig. 48. (d) Tabella riassuntiva.

che doppia: infatti è cresciuta esattamente di quattro volte. Quando poi si è triplicata la velocità, la resistenza è divenuta molto più di tre volte tanto: infatti è cresciuta in proporzione a un fattore compreso tra nove e dieci. Possiamo vedere in ciò una qualche regola? Sì. Se supponeste che la resistenza del mezzo è direttamente proporzionale al quadrato della velocità sareste quasi nel giusto: sapete tutti che 2 al quadrato è uguale a 4 e che 3 al quadrato è uguale a 9, cifra molto vicina al 9,5 misurato.

Lunghe serie di esperimenti eseguiti su oggetti di molte forme diverse provano che nelle correnti « poco viscoso », di cui è indice un alto Numero di Reynolds, la resistenza di solito è all'incirca proporzionale al quadrato della velocità.

Proprio per questa legge del quadrato della velocità dobbiamo spendere molto in carburante per viaggiare a forte velocità in automobile o in aeroplano. A 40 miglia all'ora la resistenza aerodinamica è quattro volte superiore a quella che si ha a 20 miglia all'ora; a 60 miglia è nove volte maggiore e a 80 miglia sedici volte. Poiché la potenza impiegata è direttamente proporzionale sia alla resistenza sia alla velocità il consumo di carburante necessario a superare la

resistenza aerodinamica a queste quattro velocità sta nel rapporto di 8:27:64. Notate che la potenza cresce con il cubo della velocità; quando un'automobile viaggia a velocità ridotta questo fattore non è molto importante perché la resistenza della strada è maggiore della resistenza aerodinamica, ma a velocità progressivamente crescenti quest'ultima diventa sempre più prevalente finché stabilisce il limite alle prestazioni del veicolo. Perciò mentre una forma aerodinamica non è particolarmente importante per le automobili che viaggiano a velocità basse, diventa importantissima a velocità elevate. La proporzionalità al quadrato della velocità per la resistenza e al cubo della velocità per la potenza spiega anche perché i progressi nella velocità degli aeroplani siano stati conseguiti non tanto attraverso miglioramenti nella forma dell'aeroplano quanto piuttosto attraverso la costruzione di motori sempre più potenti da parte delle industrie motoristiche.

Se volessimo avere un quadro completo della legge di resistenza per valori alti del Numero di Reynolds dovremmo studiare gli effetti della viscosità, della densità e della lunghezza, nonché della velocità. Sta di fatto però che non esiste per Numeri di Reynolds alti una legge semplice e precisa come quella per Numeri di Reynolds bassi. Si può al massimo avere una legge sperimentale approssimativa, sfortunatamente con molte eccezioni, che stabilisce che la resistenza è direttamente proporzionale al quadrato della velocità, alla densità e al quadrato della lunghezza caratteristica dell'oggetto:

resistenza proporzionale a $(velocità)^2 \times densità \times (lunghezza)^2$.

Confrontiamo questa legge approssimativa per Numeri di Reynolds alti con la Legge di Stokes valida per Numeri di Reynolds molto bassi (fig. 49). Per valori molto bassi del Numero di Reynolds raddoppiando la velocità raddoppia la resistenza; ma per Numeri di Reynolds molto alti raddoppiando la velocità la resistenza diventa quadrupla. Per Numeri di Reynolds molto bassi raddoppiando le dimensioni lineari dell'oggetto la resistenza raddoppia; ma per Numeri di Reynolds molto alti raddoppiando le dimensioni la resistenza diventa quadrupla. Per Numeri di Reynolds bassi la

viscosità, e non la densità, ha una parte di rilievo; per Numeri di Reynolds alti accade pressappoco il contrario. Le differenze di struttura meccanica e di abilità nel nuoto tra i più grandi e i più piccoli organismi biologici marini dipendono in parte da queste diverse leggi di proporzionalità:

LEGGE DELLA RESISTENZA DEL MEZZO PER VALORI BASSI DEL NUMERO DI REYNOLDS

$$RESISTENZA \propto VELOCITÀ \times VISCOSITÀ \times LUNGHEZZA$$

$$RESISTENZA \propto \frac{DISTANZA \times VISCOSITÀ \times LUNGHEZZA}{TEMPO}$$

LEGGE APPROSSIMATA DELLA RESISTENZA PER VALORI ALTI DEL NUMERO DI REYNOLDS

$$RESISTENZA \propto (VELOCITÀ)^2 \times DENSITÀ \times (LUNGHEZZA)^2$$

Fig. 49.

la potenza propulsiva necessaria a un pesce per unità di peso è inversamente proporzionale alle sue dimensioni, così che il pesce più grande ha un vantaggio relativo su quello più piccolo; per gli organismi microscopici, invece, la potenza propulsiva richiesta per unità di peso è inversamente proporzionale al quadrato delle dimensioni lineari: infatti, se queste si riducono di un fattore 10, la resistenza e la potenza propulsiva necessaria per un essere del plancton diminuiscono di un uguale fattore, ma il peso dell'organismo diminuisce di un fattore mille. Questo è un fatto gravemente sfavorevole e spiega perché gli organismi viventi estremamente piccoli siano costretti a bassissime velocità.

La legge della similitudine dinamica che mette in rapporto il coefficiente di resistenza e il Numero di Reynolds.

Nell'enunciare le leggi della resistenza del mezzo ci siamo basati sul presupposto fondamentale di avere a che fare con forme geometricamente simili, anche se le dimensioni, la velocità e altri fattori, come la densità e la viscosità, potevano variare enormemente. Quando abbiamo incontrato per la prima volta il Numero di Reynolds a p. 59 abbiamo preso in esame forme geometricamente simili: ricordate, per esempio, gli esperimenti con la sfera di plastica che cadeva nell'acqua e il pallone pieno di elio che saliva in aria. Ci siamo serviti di questi esperimenti per cominciare a capire che il Numero di Reynolds è la chiave della similitudine dinamica; ora siamo in grado di approfondire ulteriormente questa idea. Si può dimostrare che quando si eseguono esperimenti su forme geometricamente simili, aventi uguale Numero di Reynolds, le resistenze esercitate sugli oggetti, pur potendo variare moltissimo in grandezza, sono correlate in modo molto particolare. Ci serviremo di qualche dato supplementare ottenuto con gli esperimenti sulla sfera di plastica che cade nell'acqua e sul pallone pieno d'elio che sale nell'aria. Nella tabella seguente sono contenuti i dati già esposti a pagine 62 e quelli nuovi che esporremo adesso.

	Lunghezza	Velocità	Fluido	Densità	Viscosità	Numero di Reynolds	Resistenza	Coefficiente di resistenza
	cm	cm/sec		g/cm ³	g/cm sec	—	dine*	—
Pallone pieno di elio	100	5,4	Aria	0,0012	0,00018	3 600	6,7	0,019
Sfera di plastica	0,60	55	Acqua	1,00	0,0089	3 700	20	0,018

* Misurando le masse in grammi, le lunghezze in centimetri e i tempi in secondi, le forze (e quindi la resistenza) vanno misurate in dine, unità pari all'incirca al peso di 1 milligrammo (N.d.T.).

La resistenza esercitata sulla sfera di plastica che cade a velocità terminale è il suo peso netto nell'acqua: misurandolo troviamo che è 20 dine. La resistenza che incontra il pallone pieno di elio salendo a velocità terminale è la risultante delle spinte verso l'alto, è cioè la stessa forza con cui esso agisce sull'indice del quadrante: la misuriamo e troviamo 6,7 dine. Queste forze sono ovviamente molto diverse, ma il principio di similitudine dinamica stabilisce che se i Numeri di Reynolds sono uguali, sono uguali anche i cosiddetti *coefficienti di resistenza*. Il coefficiente di resistenza è così definito:

$$\text{coefficiente di resistenza} = \frac{\text{resistenza}}{(\text{velocità})^2 \times \text{densità} \times (\text{lunghezza})^2}$$

Nella tabella sono indicati tutti i numeri necessari a calcolare i coefficienti di resistenza nei due esperimenti: per il pallone pieno di elio che sale in aria è 0,019; per la sfera di plastica che cade nell'acqua risulta praticamente lo stesso, 0,018. Questi coefficienti corrispondono rispettivamente ai Numeri di Reynolds 3600 e 3700. Abbiamo dunque una verifica sperimentale della

LEGGE DELLA SIMILITUDINE DINAMICA

QUANDO SONO UGUALI I NUMERI DI REYNOLDS
ANCHE I COEFFICIENTI DI RESISTENZA SONO UGUALI

La similitudine dinamica base delle prove sui modelli.

Quel che abbiamo detto ha notevoli conseguenze. Se ci riflettete un momento vi renderete conto che se aveste conosciuto il principio della similitudine dinamica avreste potuto prevedere la resistenza esercitata sul pallone pieno d'elio che sale nell'aria misurando la resistenza esercitata sulla sfera di plastica che cade nell'acqua.

Utilizzato così il principio della similitudine dinamica è molto importante per i tecnici che progettano aeroplani e razzi, sistemi di propulsione, navi o turbine idrauliche. In tutti questi campi il principio della similitudine dinamica

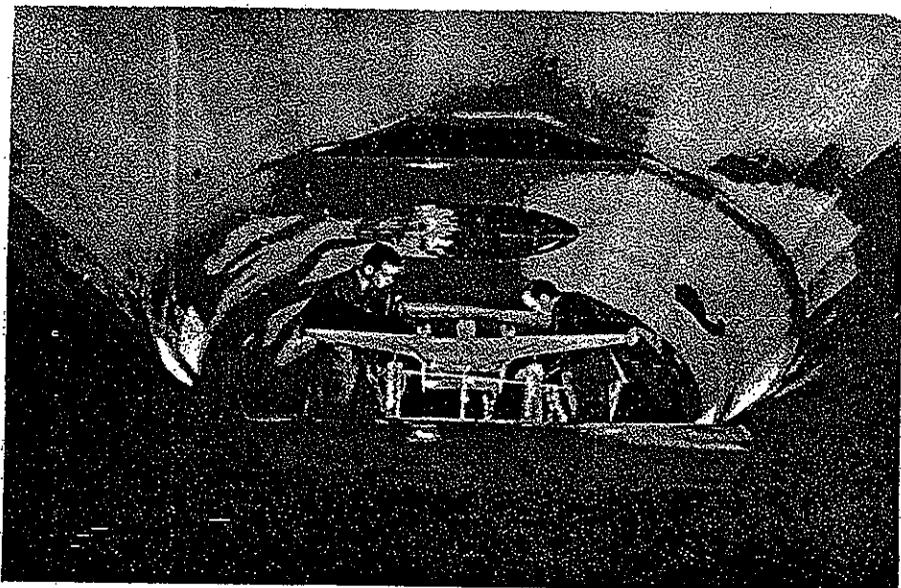


Fig. 50. Prove su un modello di aeroplano nella galleria del vento. I dati ottenuti sono trasferiti sull'aeroplano in grandezza naturale utilizzando il principio della similitudine dinamica.

fornisce ai tecnici un potentissimo strumento: la prova sul modello. La similitudine dinamica non soltanto indica come vanno preparati gli esperimenti da eseguire sul modello perché siano significativi, ma dice anche come vanno utilizzati i risultati, in modo che l'esperimento possa essere applicabile al prototipo di grandezza naturale.

Una delle meraviglie del nostro tempo sono i progressi fatti negli ultimi sessant'anni nel volo a motore. Fuori degli ambienti dell'industria aeronautica ci si rende ben poco conto della parte avuta in ciò dalle gallerie del vento (fig. 50): è quasi impensabile che senza di esse si sarebbero potuti avere nel 1960 tipi di aeroplani superiori a quelli del 1930. Le prove con la galleria del vento non sono un semplice controllo del progetto già completo, ma sono piuttosto parte integrante della progettazione. In ogni ramo dell'ingegneria in cui la dinamica dei fluidi abbia una parte rilevante si riconosce oggi l'importanza che le prove sui modelli hanno per ogni ulteriore progresso. Ma le prove sui modelli non avrebbero valore senza il principio della similitudine dinamica che ci insegna a interpretarne i risultati.

6 Lo strato limite viscoso

Può sembrare che con le leggi della resistenza per valori bassi e alti del Numero di Reynolds e con il principio della similitudine dinamica, che mette in relazione il coefficiente di resistenza e il Numero di Reynolds, si cominci ad avere un quadro abbastanza chiaro della resistenza nei fluidi; invece c'è ancora molto da spiegare.

Che importanza ha la viscosità ad alti Numeri di Reynolds?

Supponiamo di avere un fluido magico, privo di qualsiasi viscosità: un fluido « perfetto » come questo non offrirebbe resistenza alcuna. Possiamo allora domandarci: perché fluidi come l'aria, che hanno solo una piccola viscosità, producono tanta resistenza? E, se esercitano una resistenza sensibile, la viscosità non dovrebbe comparire nella legge della resistenza per valori alti del Numero di Reynolds, di cui si è parlato a p. 88? Certamente dovrebbe: ricordate che questa legge è soltanto approssimativa; c'è, è vero, un effetto della viscosità sulla resistenza, ma spesso è tanto piccolo da poter essere trascurato quando si vuole soltanto un quadro generale dei fattori più importanti. Per esempio, un aumento nella viscosità del 100 per cento fa aumentare la resistenza di una forza aerodinamica ad alto Numero di Reynolds soltanto del 15 per cento, che è relativamente poco.

Ma ora dobbiamo essere molto prudenti poiché gli effetti della viscosità possono talvolta essere più grandi. Inoltre, l'aspetto tutto particolare della curva velocità-resistenza, che avevamo ottenuto per la sfera (fig. 7) negli esperimenti eseguiti con la galleria del vento e descritti nel secondo capitolo, fa pensare che anche questi effetti possano essere un po' particolari.

Ebbene, è un fatto che per valori molto elevati del Numero di Reynolds la viscosità non è per nulla trascurabile, seb-

bene il suo effetto si manifesti in modo strano e inaspettato. La viscosità è responsabile in primo luogo della resistenza, e perfino la minima traccia di viscosità può talvolta provocare, indirettamente, una resistenza molto grande; essa spiega inoltre perché forme che differiscono di poco — come la sfera levigata e la sfera leggermente ruvida degli esperimenti descritti nel secondo capitolo (fig. 10) — possano incontrare resistenze molto diverse.

La difficoltà che incontriamo nello studio dei fluidi a bassissima viscosità può essere espressa in altro modo. Ricordate che il Numero di Reynolds è la misura del rapporto tra le forze d'inerzia e le forze di viscosità, e che la densità e la viscosità sono le proprietà del fluido associate rispettivamente a queste forze: nel capitolo 4 abbiamo visto che per valori molto bassi del Numero di Reynolds, quando le forze d'inerzia sono trascurabili, la densità del fluido è effettivamente insignificante, cosa ben comprensibile; con un ragionamento analogo ci potremmo aspettare che per Numeri di Reynolds molto alti le forze di viscosità fossero trascurabili e che la viscosità fosse quindi una proprietà irrilevante. Questo, però, non è vero del tutto.

Lo strato limite.

La figura 51 rappresenta la corrente di un fluido leggermente viscoso come l'aria intorno a un profilo alare. I fili metallici rappresentano le traiettorie di particelle fluide qualsiasi, o linee di corrente. Veniamo ora al punto cruciale. Per quanto piccole siano le forze di viscosità nella maggior parte della corrente, vi sono delle regioni in cui sono estremamente importanti. Il motivo essenziale è che in tutti i fluidi le particelle fluide in contatto immediato con confini solidi non scendono rispetto al confine. Perciò, mentre la maggior parte dell'aria può scorrere veloce intorno al profilo alare, alla sua superficie l'aria non si muove affatto rispetto ad esso. Tra questa pellicola d'aria assolutamente immobile adiacente al profilo alare e il grosso dell'aria che si muove velocemente già a piccole distanze dal profilo c'è una regione della corrente chiamata *strato limite*. In questo strato limite la velocità passa da zero, valore che ha sulla parete, fino a una velocità non rallentata dalle forze di viscosità, lungo il margine esterno dello strato.

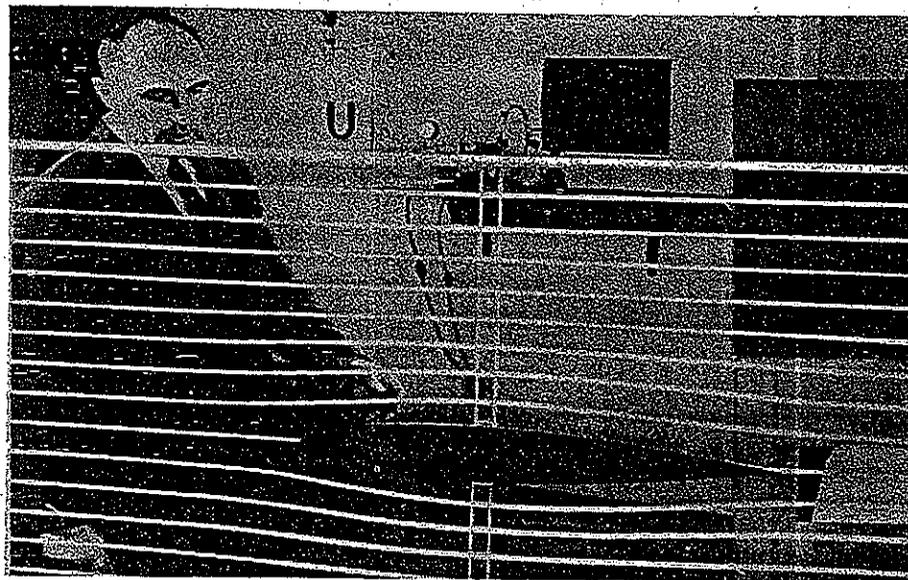


Fig. 51.

Nel dispositivo della figura 52 la glicerina, che proviene da un serbatoio a destra, scorre verso sinistra attraverso il canale quando si solleva una paratoia posta all'estremità a valle. Con una siringa piena di glicerina colorata tracciamo

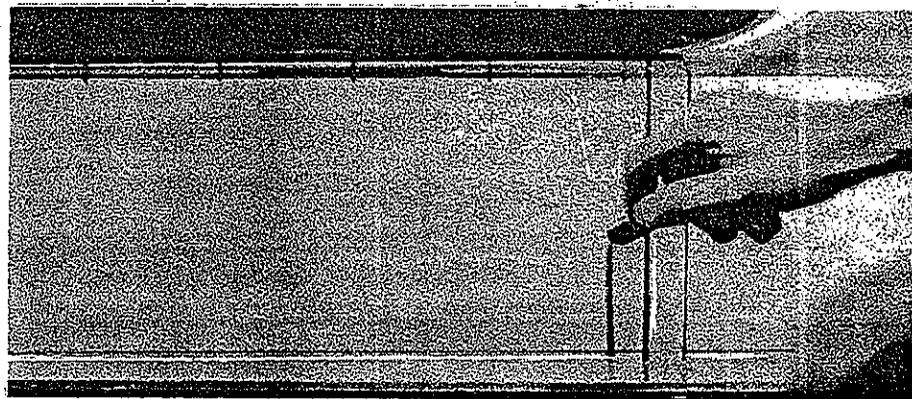


Fig. 52. Tracciamo una linea di glicerina colorata. Quando si apre una paratoia a sinistra (non visibile nella fotografia) la glicerina che si trova nel canale accelera verso sinistra.

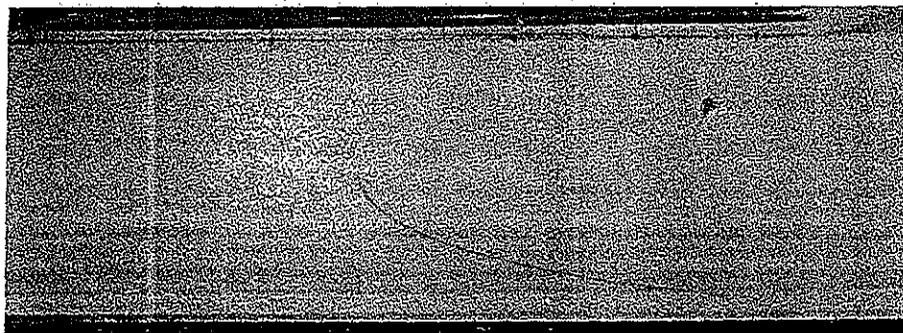


Fig. 53. La linea fluida della figura 52 dopo che la corrente si è mossa per breve tempo verso sinistra. L'estremità inferiore della linea resta ancorata alla parete.

una linea retta di particelle fluide chiaramente identificabili; solleviamo poi la paratoia: tutta la corrente si muove verso sinistra e la linea colorata mostra di quanto e con quale velocità si spostino le particelle che si trovano a distanze diverse dalla parete. Osservando il movimento della linea (la figura 53 ne mostra una posizione successiva) vediamo che al centro del canale le particelle fluide si muovono più in fretta, laddove quelle che si trovano vicino alla parete non si muovono affatto. Dall'esperimento della figura 54, in cui abbiamo tracciato con la glicerina una linea a forma di U, vediamo che *nessuna* delle particelle fluide vicine alla parete si muove relativamente alla parete: non si ha cioè nessuno scorrimento.

La figura 55 mostra che, a partire da una certa distanza dalla parete, tutte le particelle fluide si muovono a valle con la stessa velocità. Nel tempo trascorso per raggiungere la posizione indicata dalle figure 55b e 55c la distanza percorsa da ogni particella fluida partendo dalla sua posizione iniziale misura la velocità media di quella particella in quel periodo di tempo. Lo strato limite è la regione di assenza di velocità o di corrente rallentata (indicata nella figura 55c dalla graffa più spessa). Oltre lo strato limite la corrente non è rallentata dalla viscosità (graffa più sottile nella figura 55c).

La formazione dello strato limite trae origine dallo strato

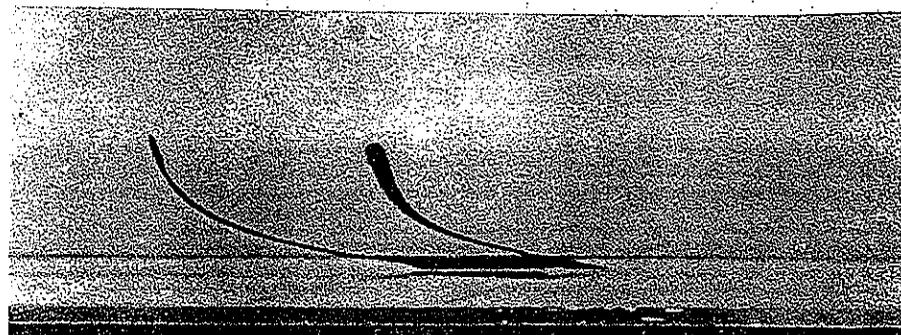
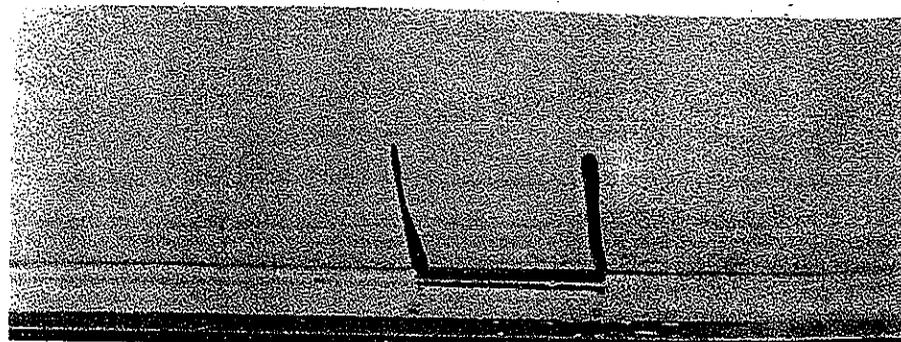


Fig. 54. Movimento di una linea di fluido a forma di U: (a) prima che la corrente abbia cominciato a fluire; (b) quando la corrente è avanzata per breve tempo: la parte orizzontale della U, adiacente alla parete, non si muove.

di fluido immobile aderente alla parete: questo strato immobile esercita una resistenza viscosa sopra lo strato di fluido che gli sta vicino e così rallenta gradualmente questo secondo strato. Man mano che il secondo strato perde velocità comincia a esercitare a sua volta una resistenza viscosa sul terzo strato e anche questo comincia a perdere velocità, e così via di strato in strato. La diminuzione di velocità vicino alla parete si diffonde dunque per effetto della viscosità verso l'esterno attraverso il fluido, e quantità sempre maggiori di fluido sono raggiunte dallo strato limite. Il continuo ispessimento dello strato limite è visibile nella figura 55d, dove le frecce verticali rappresentano lo spessore dello strato di fluido rallentato, in tre momenti successivi.

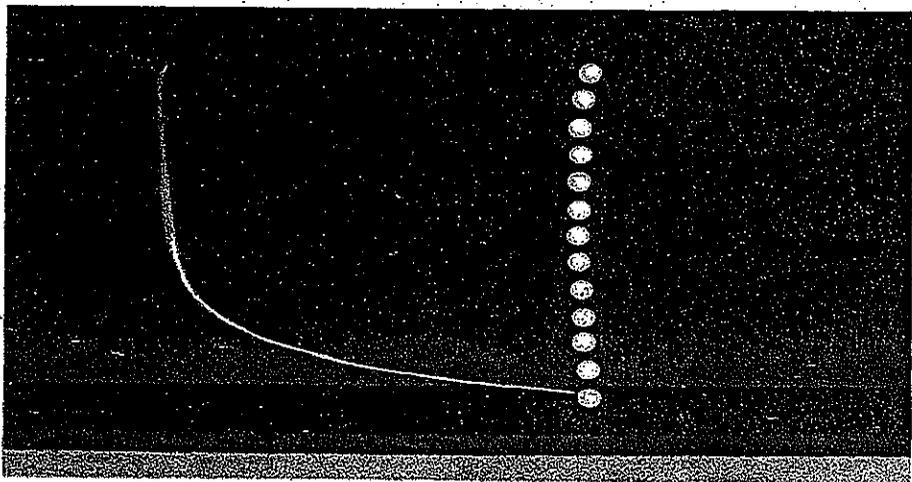
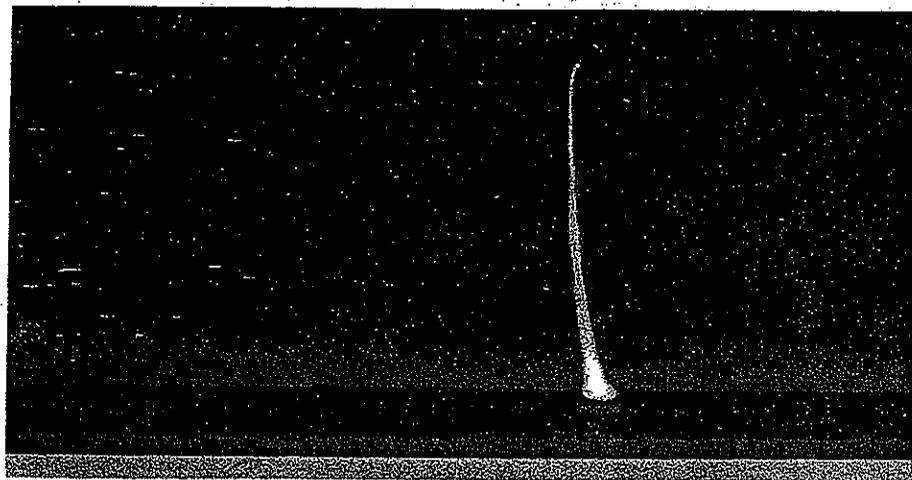
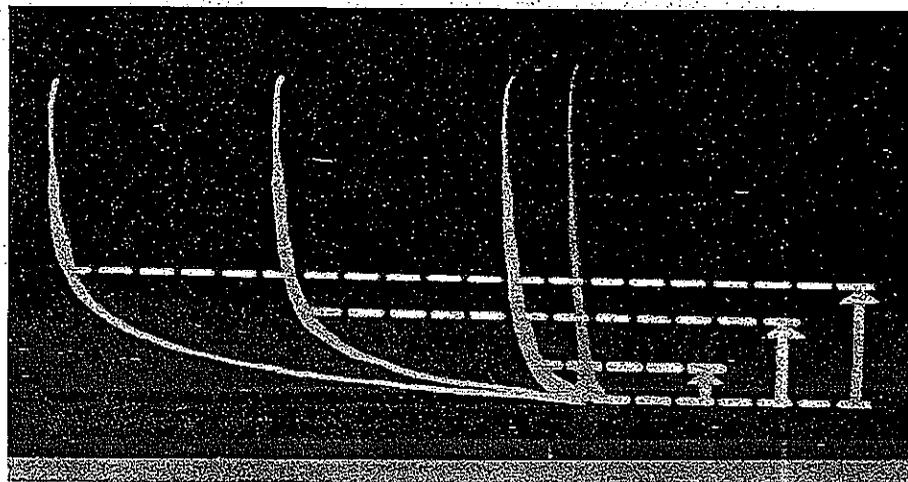
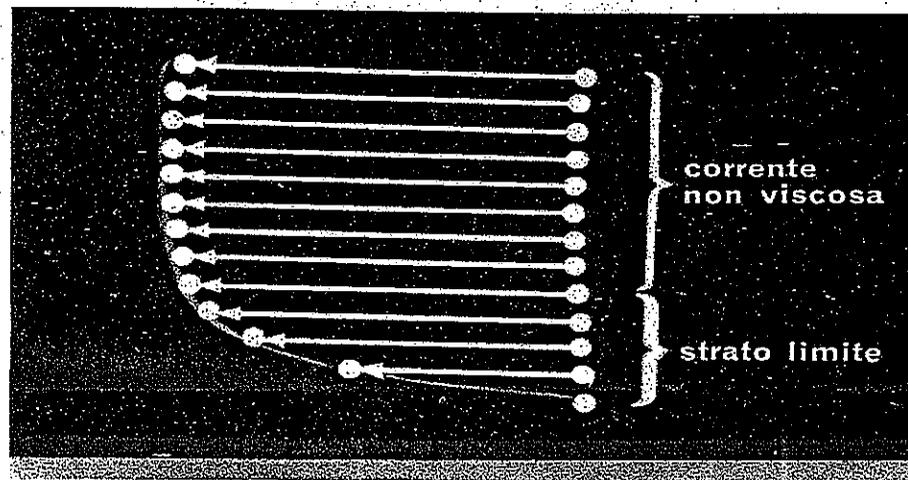


Fig. 55. Le fotografie (in negativo) illustrano come si sviluppa uno strato limite viscoso. La corrente di fluido va da destra a sinistra. (a) Posizioni iniziali delle particelle fluide colorate. (b) Posizione della stessa linea di particelle fluide in un momento successivo, quando la corrente è avanzata. La linea punteggiata rappresenta le posizioni iniziali delle particelle indicate



nella figura 55a. (c) La stessa posizione della figura 55b: la lunghezza delle frecce è direttamente proporzionale alla velocità media a cui ciascuna particella si muove dalla posizione iniziale della figura 55a alla posizione finale della figura 55b. (d) Fotografie sovrapposte che mostrano le posizioni della linea di particelle fluide in quattro momenti successivi.

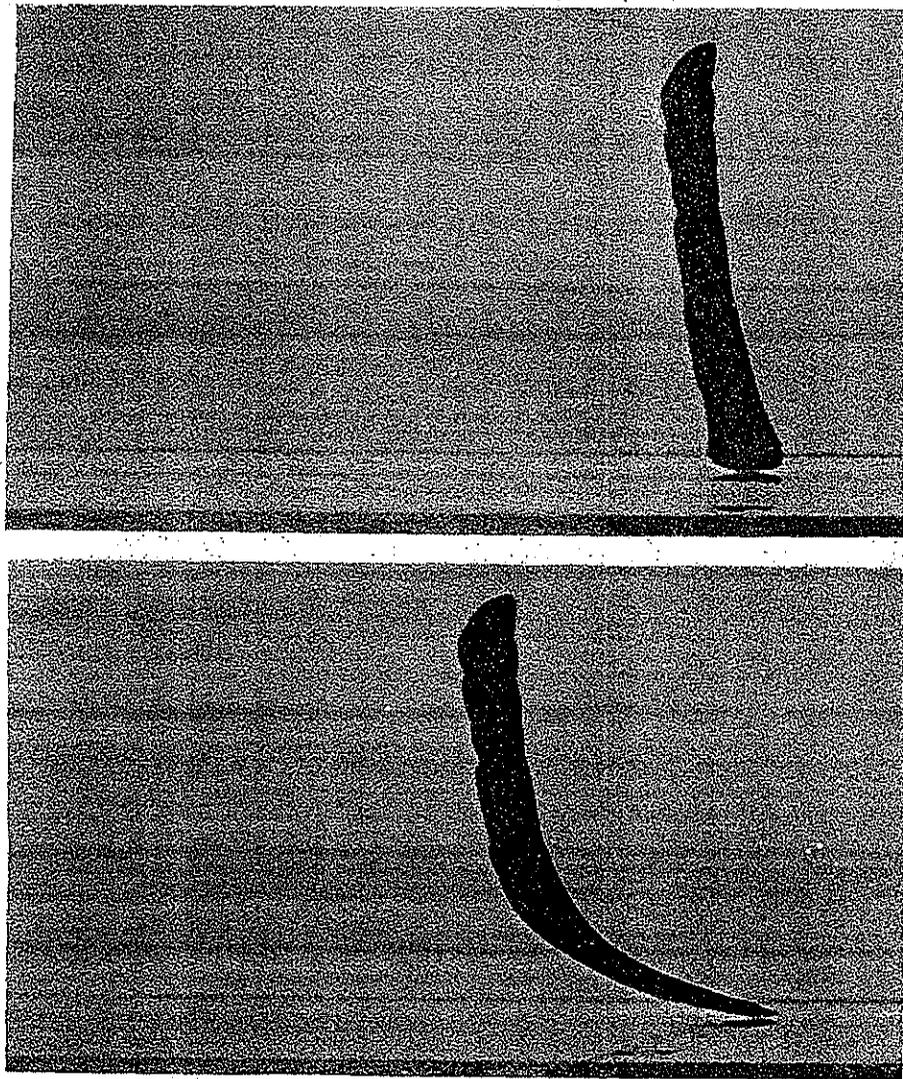
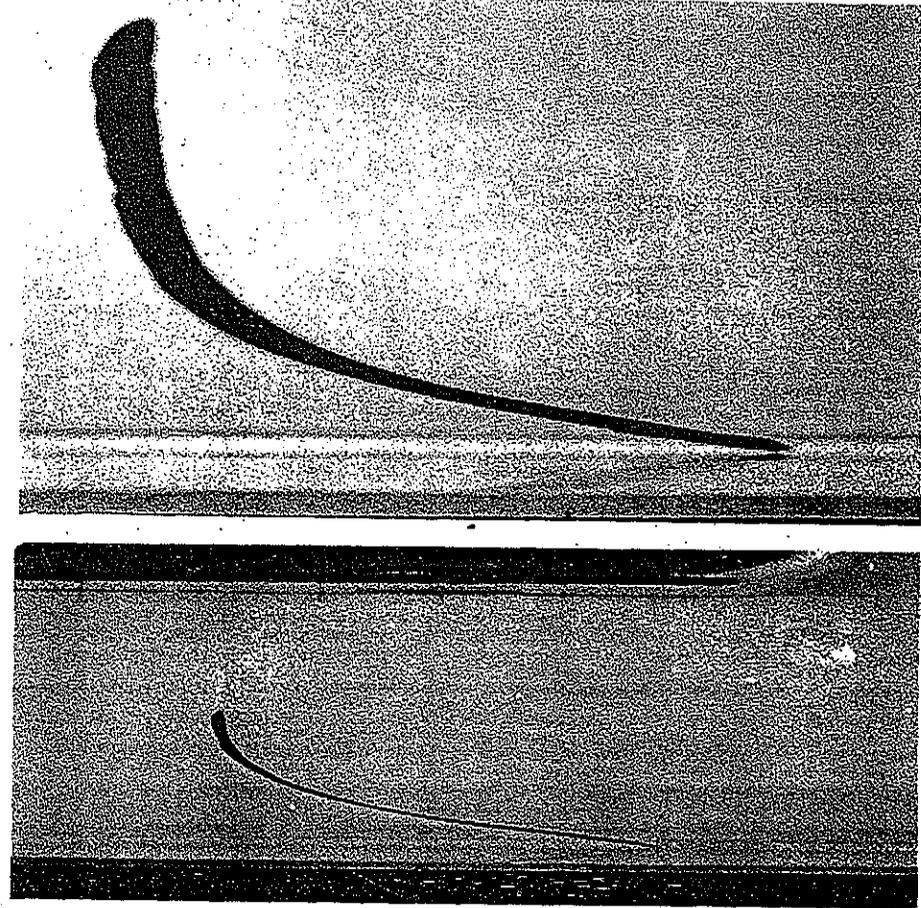


Fig. 56. Rapido sviluppo di uno strato limite in condizioni di velocità bassa e viscosità elevata. (a) Posizione iniziale prima che la corrente cominci a fluire. (b) La corrente ha cominciato a fluire. (c) Poco dopo. (d) Lo strato limite raggiunge il centro del canale nel tempo che la corrente centrale impiega a percorrere una distanza pari all'incirca alla larghezza del condotto.



Effetto del Numero di Reynolds sullo sviluppo dello strato limite.

L'accrescimento dello strato limite in un certo tempo o su una certa distanza dipende da fattori come la velocità, la viscosità e la densità. Nella figura 56, per esempio, dove la velocità è bassa e la viscosità alta, lo strato limite diventa molto spesso in brevissimo tempo, raggiungendo il centro del canale nel tempo in cui la corrente centrale percorre una distanza non molto superiore all'ampiezza del canale.

Nella figura 57, in cui si ha la stessa velocità ma una viscosità minore, lo strato limite si ispessisce meno rapidamente. La figura 58. mostra poi cosa accade, con questa viscosità ridotta, quando aumenta la velocità: lo strato limite si ispessisce ancor più lentamente.

Riassumendo: quanto maggiore è la velocità, o quanto minore è la viscosità, tanto meno rapidamente cresce lo strato limite. Ricordando che il Numero di Reynolds è uguale a $\text{velocità} \times \text{lunghezza} \times \text{densità} / \text{viscosità}$, possiamo giungere a una conclusione più generale: al crescere del Numero di Reynolds lo strato limite cresce sempre meno rapidamente. Ma — e questo spiega perché la viscosità non diventa mai completamente trascurabile — per quanto grande sia il numero di Reynolds, cioè per quanto piccola sia la viscosità, lo strato limite viscoso, pur diventando sempre più sottile, non potrà mai scomparire perché la velocità sulla parete resterà sempre zero.

Il Numero di Reynolds per un'ala di aeroplano è così alto che lo strato limite ha appena lo spessore che può avere un cartone (fig. 59). Sebbene l'aria abbia effettivamente una viscosità relativamente piccola, le forze di viscosità in questo sottilissimo strato limite sono considerevoli perché la velocità passa da zero a centinaia di chilometri all'ora in una frazione di centimetro appena. Perciò una particella fluida nello strato limite sperimenta, nell'unità di tempo, una fortissima deformazione tangenziale. Vedremo in seguito quanto possa essere importante capire il comportamento dello strato limite per apportare miglioramenti alla progettazione degli aeroplani.

Il rivestimento di un'ala d'aeroplano è attaccato alla struttura per mezzo di ribattini. I costruttori di aeroplani un tempo usavano ribattini a testa tonda, ma l'industria ha speso somme enormi per trovare il modo di costruire ribattini a testa piatta, che risultassero esattamente a livello della superficie. Se lo strato limite sopra l'ala avesse uno spessore di diversi centimetri questo non sarebbe stato necessario perché le protuberanze dei ribattini affonderebbero nella parte dello strato limite che si muove lentamente, e la superficie dell'ala risulterebbe a tutti gli effetti liscia rispetto all'aria che scorre velocemente all'esterno dello strato limite.

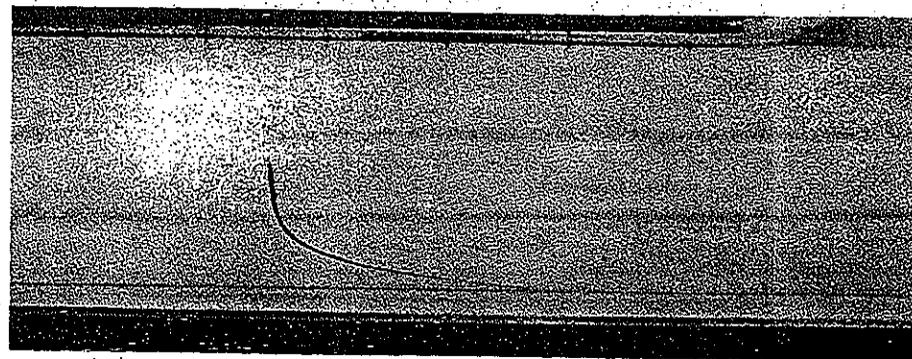


Fig. 57. Sviluppo di uno strato limite con velocità bassa e viscosità ridotta.

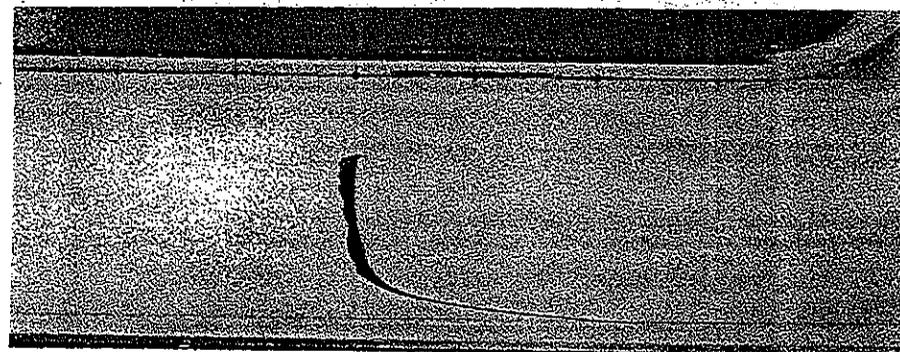


Fig. 58. Lento sviluppo di uno strato limite con velocità alta e viscosità bassa.

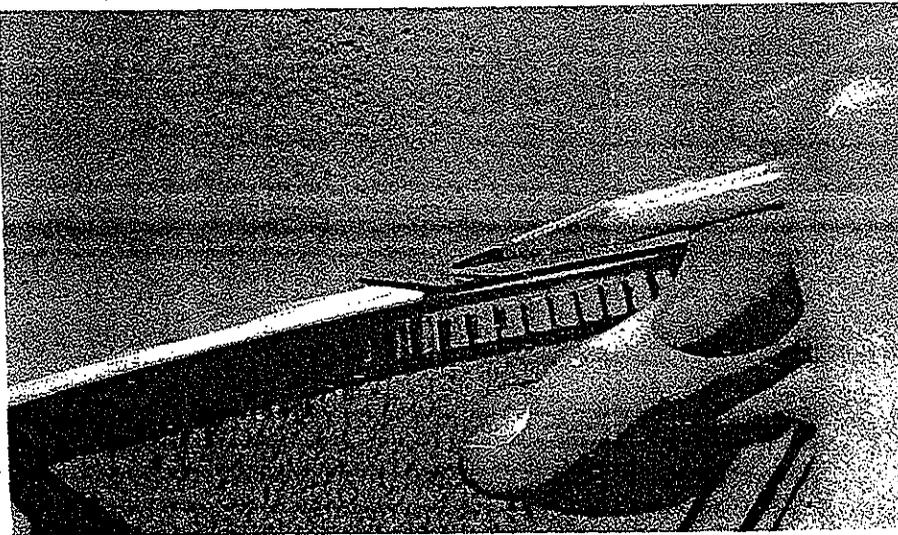
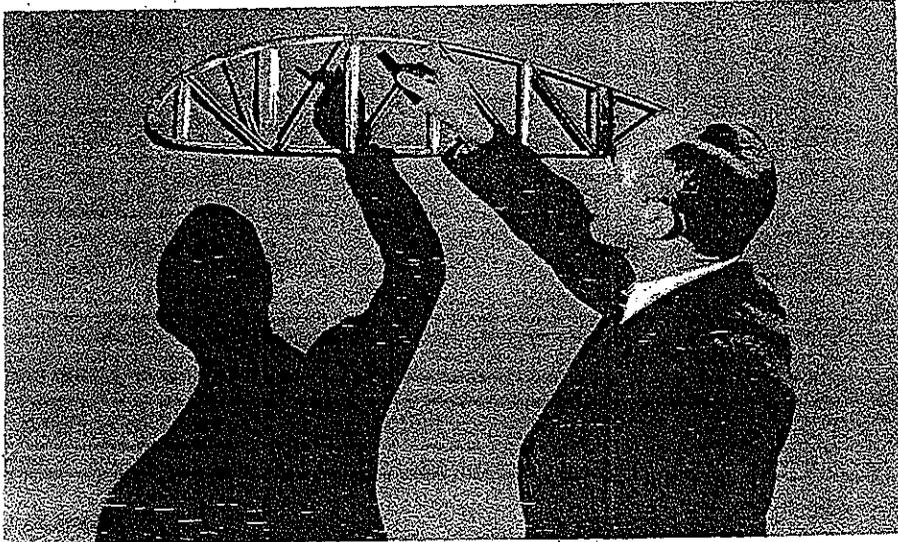


Fig. 59. Lo strato limite su un'ala di aeroplano è sottilissimo in confronto alle dimensioni dell'ala.

Ma in pratica i ribattini a testa tonda costituiscono un grosso ostacolo alla corrente dello strato limite, e questo spiega perché si sia cercato di costruire dei ribattini a testa piatta. Sulla base di quanto abbiamo detto, ci rendiamo conto che

una superficie è aerodinamicamente levigata o ruvida a seconda che su di essa le protuberanze e le cavità siano alte o basse in confronto allo spessore dello strato limite. Una condotta d'acqua in ghisa può essere « ruvida » se ha soltanto mezzo centimetro di diametro, ma « levigata » se il suo diametro è di 80 centimetri: la condotta di ghisa con un diametro di 80 centimetri può essere idrodinamicamente più levigata di un tubo di vetro con un diametro di 3 millimetri. Come per ogni altra cosa, la scabrosità « grande » o « piccola » va interpretata in senso relativo, in questo caso relativamente allo strato limite.

Ognuno di noi ha avuto esperienza, per un motivo o per l'altro, di qualche strato limite. Sulla spiaggia in una giornata ventosa ci stendiamo a terra per sottrarci al vento: affondiamo allora in uno strato limite molto spesso, che raggiunge un'altezza di diversi decimetri al di sopra del suolo, e all'interno del quale la velocità dell'aria è bassa. Se vi è capitato di viaggiare su una grossa nave e di sporgervi dalla murata a guardare fuori, avrete visto uno strato limite spesso molti centimetri muoversi lentamente lungo i fianchi della nave. Vicino alla prua questo strato limite è sottile, ma se lo seguite verso poppa lo vedete crescere di spessore e diventare decisamente molto largo vicino alla poppa. Un tipo di strato limite è anche quello che si può vedere inclinando una teglia contenente grasso caldo e osservando il grasso muoversi da una parte all'altra.

7 Corrente laminare e corrente turbolenta

Esamineremo adesso un altro aspetto del moto dei fluidi collegato con gli strati limite. Talvolta una corrente sembra molto regolare e uniforme: la chiamiamo allora *laminare*; altre volte sembra discontinua e irregolare e la chiamiamo *turbolenta*. Incontriamo esempi di questi due tipi di corrente nella vita di tutti i giorni: per esempio, se in una stanza molto calma c'è una sigaretta accesa in un portacenere (fig. 60), un filo sottile e uniforme di fumo si innalza diritto nell'aria senza mescolarsi ad essa; a un certo punto, però, il filo di fumo si rompe e si diffonde irregolarmente e rapidamente nell'aria circostante. La parte uniforme del filo di fumo è laminare, la parte irregolare turbolenta.

Le figure 61 e 62 mostrano un esperimento simile, ma controllabile, eseguito con un getto di fumo scaricato da un tubo nell'aria. A bassa velocità il getto è per un certo tratto laminare, poi diventa turbolento e si mescola rapidamente con l'aria circostante. Quando la velocità del getto aumenta, il punto di transizione dalla corrente laminare a quella turbolenta arriva prima. Un altro esempio comune, che potete facilmente osservare voi stessi, è quello dell'acqua che esce da un rubinetto (fig. 63). A velocità bassa la superficie del getto è levigata e sembra di vetro; a forte velocità è irregolare. Queste due configurazioni corrispondono rispettivamente alla corrente laminare e a quella turbolenta. Se versate da una brocca uno sciroppo denso la corrente è laminare, e veramente sarebbe difficile renderla turbolenta, perché ogni irregolarità è rapidamente smorzata dalla forte azione della viscosità.

Quale è la differenza sostanziale tra la corrente laminare e quella turbolenta? In una corrente laminare le particelle fluide si muovono seguendo la corrente, lungo traiettorie uniformi e regolari, senza che i diversi strati di fluido si mescolino in modo apprezzabile. Questa corrente laminare è un vero moto *stazionario*, nel senso che ogni particella fluida

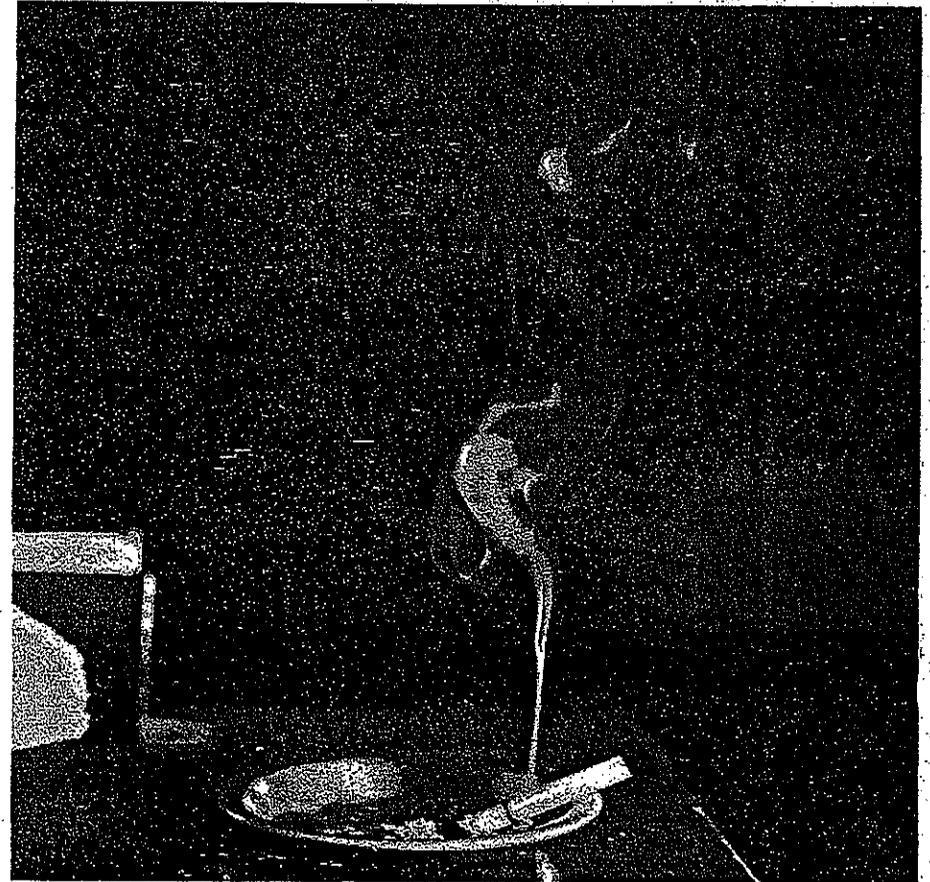


Fig. 60. Il filo di fumo è dapprima laminare, ma a un certo punto diventa instabile e alla fine turbolento.

che passa per un dato punto dello spazio vi arriva esattamente con la stessa velocità e la stessa direzione di scorrimento di tutte le particelle che l'hanno preceduta. In una corrente turbolenta, invece, al moto medio del fluido nel senso della corrente si sovrappone un moto irregolare e apparentemente casuale che provoca molto rimescolio e scambi di massa tra le diverse linee di corrente medie. Questo rimescolio naturalmente determina uno scambio di fluido tra le diverse linee di corrente: ma da un punto di vista dina-

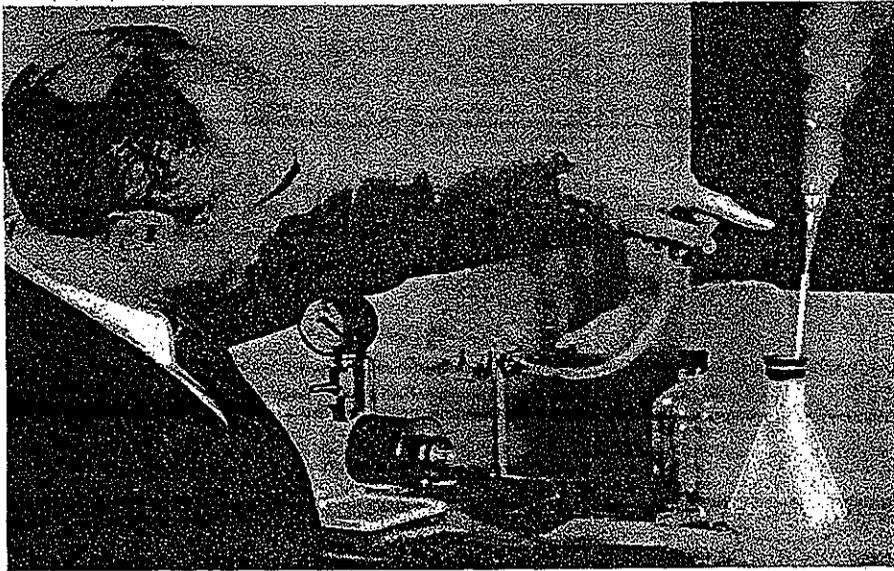


Fig. 61. Del fumo viene prodotto facendo passare l'aria sul tetracloruro di titanio; l'aria contenente il fumo è fatta uscire, a velocità regolabile, da un tubicino di vetro. (a) A bassa velocità il getto resta laminare per un tratto di circa 5 centimetri e poi diventa turbolento. (b) A velocità elevata il getto diventa quasi immediatamente turbolento.

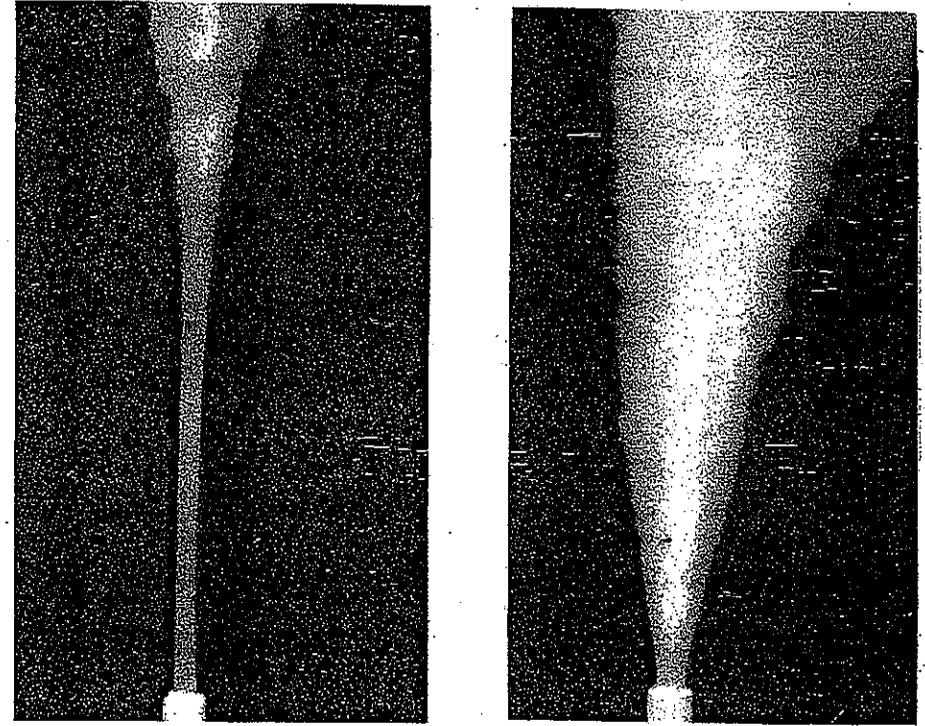


Fig. 62. Primo piano dei getti di fumo della figura 61: (a) getto a bassa velocità; (b) getto ad alta velocità.

mico, come vedremo in seguito, la vera importanza di questo rimescolio non sta nel provocare semplicemente uno scambio reciproco di massa ma scambi di *quantità di moto* tra le diverse linee di corrente; vale a dire che attraverso questo processo di rimescolamento ogni porzione di fluido che si muove lentamente viene rinvigorita e accelerata dal fluido che si muove rapidamente col quale si mescola, mentre quest'ultimo tende a sua volta a essere rallentato.

A questo punto dovremmo osservare che, negli esperimenti eseguiti, sia col getto di fumo sia col getto d'acqua, il passaggio da una corrente laminare a una corrente turbolenta è stato provocato da un aumento di velocità del getto. Più in generale possiamo dire che aumentavamo il Numero di Reynolds della corrente. È di solito vero, infatti, che a bassi

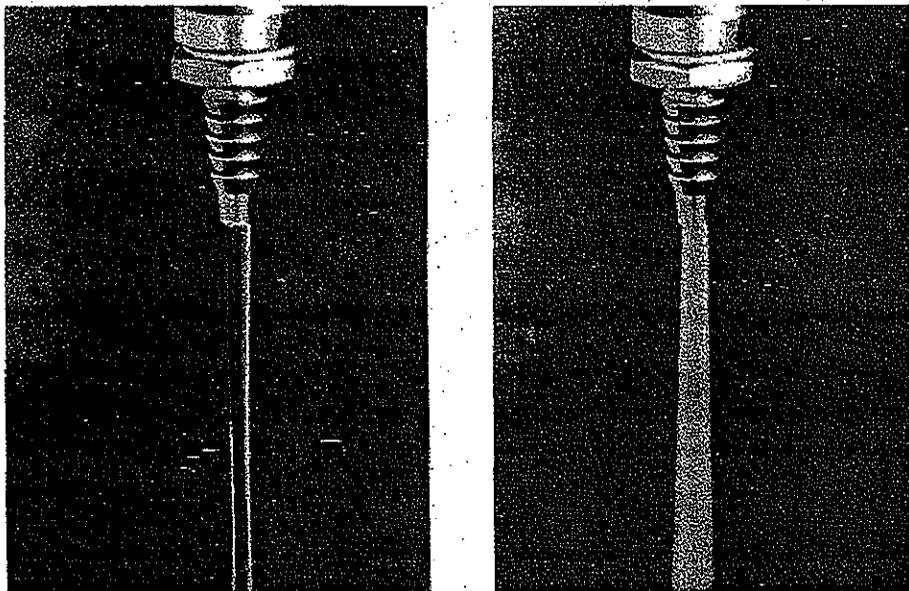


Fig. 63. Acqua uscente da un rubinetto: (a) corrente laminare; (b) corrente turbolenta.

valori del Numero di Reynolds la corrente tende a mantenersi laminare. Lo si può vedere dalla figura 64 dove un getto di glicerina colorata è immesso, per mezzo di una siringa, in una corrente di glicerina: praticamente non avviene nessun miscuglio. Con Numeri di Reynolds più alti, invece, la corrente è instabile e diventa turbolenta: appare chiaro dalla figura 65 dove un getto d'acqua colorata viene iniettato in una corrente d'acqua e si diffonde rapidamente. Quando soffiate fuori il fumo di una sigaretta il getto è turbolento e il fumo si diffonde rapidamente intorno; lo stesso accade col fumo che esce da un camino. Ma se versate un getto di miele da una brocca in un bicchiere contenente miele la penetrazione del getto avviene in modo laminare. Sulla maggior parte della superficie di un aeroplano la corrente dello strato limite è turbolenta. I pesci grossi sperimentano strati limite turbolenti e i pesci piccoli correnti laminari. Nel mondo delle cose estremamente piccole, animate o inanimate, la turbolenza è praticamente sco-

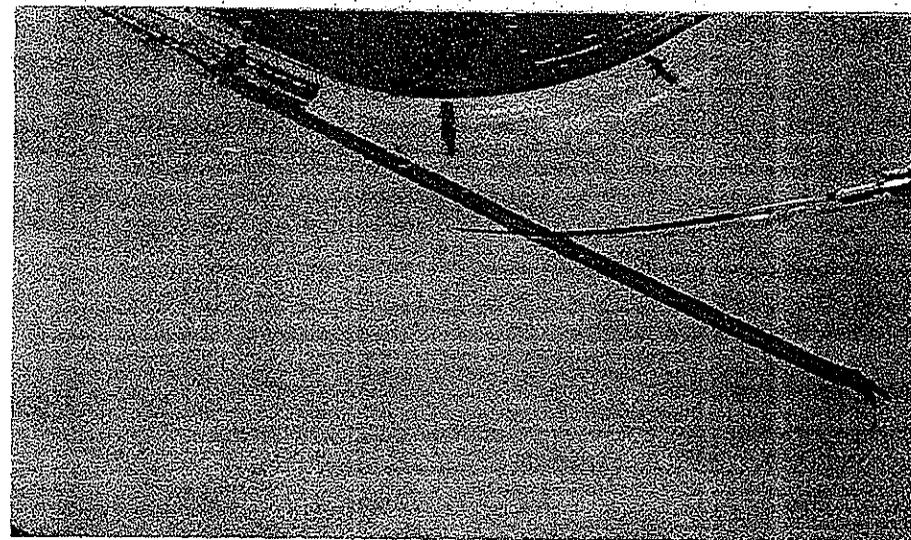


Fig. 64. Il fatto che il filo di glicerina colorata, iniettato in una corrente di glicerina, si conservi unito, mostra che a bassi Numeri di Reynolds la corrente resta laminare.

nosciuta: la meccanica dei fluidi è molto piú semplice in questo mondo perché tutto il caos dovuto alla turbolenza è qui fortunatamente assente.



Fig. 65. La dispersione dell'acqua colorata, iniettata in una corrente d'acqua, mostra che ad alti Numeri di Reynolds la corrente è instabile e diventa rapidamente turbolenta.

8 Riduzione della resistenza per mezzo dell'affusolamento

Noi vorremmo quasi sempre che la resistenza del mezzo fosse piccola (non sempre, però; non, ad esempio, nel caso del paracadute): contrastare la resistenza richiede, in un modo o nell'altro, un consumo di energia o potenza.

Se riduciamo la resistenza di un aeroplano possiamo usare un motore piú piccolo e inoltre percorrere una distanza maggiore con la stessa quantità di carburante. Uno dei modi per ridurre la resistenza è servirsi di quello che chiamiamo « affusolamento ». Vediamo ora, con l'aiuto di alcuni semplici esperimenti eseguiti nella galleria del vento, che vantaggi se ne possono trarre.

Esperimenti sull'affusolamento.

Gli esperimenti consistono nel misurare successivamente le resistenze di diverse forme bidimensionali investite dal getto d'aria, mantenendo costante la velocità dell'aria. Nel primo esperimento un profilo alare viene sistemato nella giusta posizione, con il bordo d'attacco arrotondato rivolto controcorrente e il bordo di fuga affilato rivolto in direzione della corrente. Aumentiamo la velocità del vento finché la forza di resistenza che agisce sul profilo alare fa segnare un'unità all'indice sul quadrante (fig. 66): questo avviene a 210 miglia all'ora (circa 340 chilometri). Manterremo questa velocità anche negli esperimenti successivi in modo da poter confrontare facilmente le resistenze di altre forme con questa cifra di riferimento di un'unità, misurata per il profilo alare.

Non molto tempo fa, quando non si sapeva ancora gran che sulla dinamica dei fluidi, si credeva che il modo migliore per ottenere la minima resistenza consistesse nell'avere un bordo d'attacco affilato come un coltello, che si sarebbe, per così dire, tagliato la strada attraverso il fluido; si riteneva che invece un'estremità anteriore arrotondata avrebbe provocato uno « scontro » con il fluido e prodotto così una

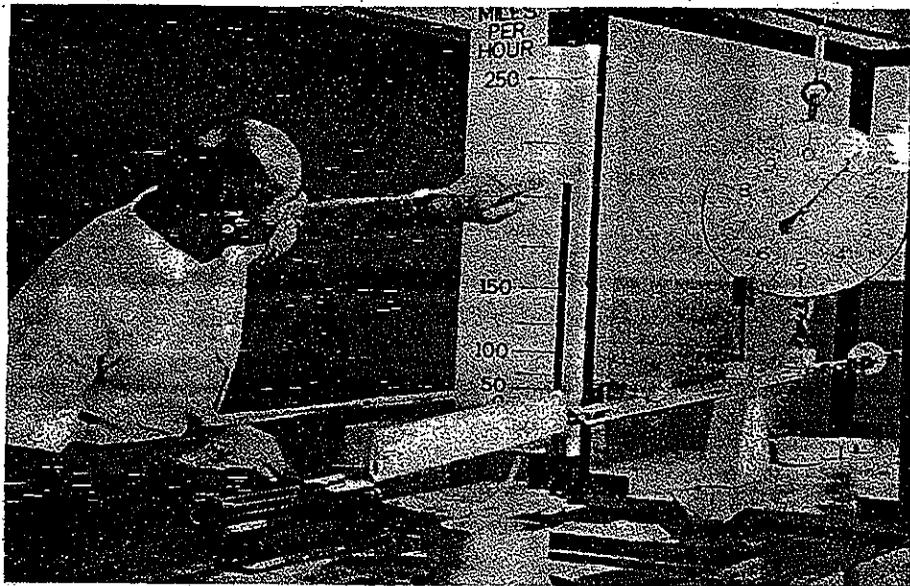


Fig. 66. Il profilo alare aerodinamico ha una resistenza di 1,0 unità a una velocità di 210 miglia (circa 340 chilometri) all'ora.

grande resistenza. Vediamo cosa accade rovesciando il profilo alare, in modo che abbia l'estremità affilata rivolta contro il getto d'aria e che l'estremità arrotondata si trovi nella parte posteriore (fig. 67a). Portando l'aria alla velocità campione di 210 miglia all'ora troviamo che contrariamente a quel che ci aspettavamo — l'indice sul quadrante che misura la resistenza segna ora 2,6 unità (fig. 67b). Un ragionamento come quello di prima, basato sul « buon senso », appare ora piuttosto come un discorso senza senso, perché non si collega ad alcun principio fondamentale. In certo modo è più dannoso di una supposizione perché può spingere ad agire senza neanche rendersi conto che la decisione presa non ha alcun reale fondamento.

Ora togliamo il profilo alare dal supporto rettangolare su cui è montato in modo da poter misurare la resistenza del solo supporto rettangolare, relativamente piccolo (fig. 68a). Accelerando di nuovo la velocità dell'aria fino a 210 miglia all'ora, troviamo che la resistenza è quattro volte maggiore

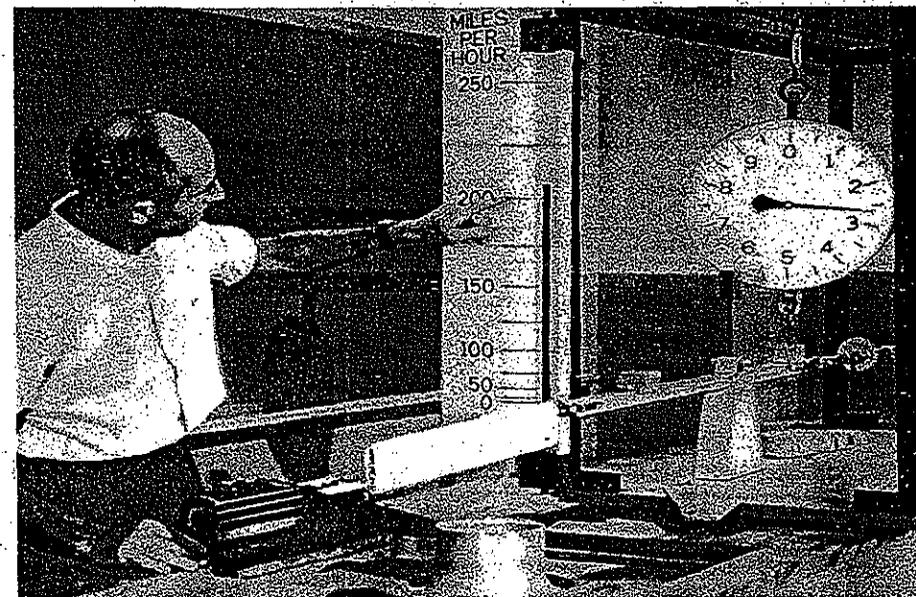
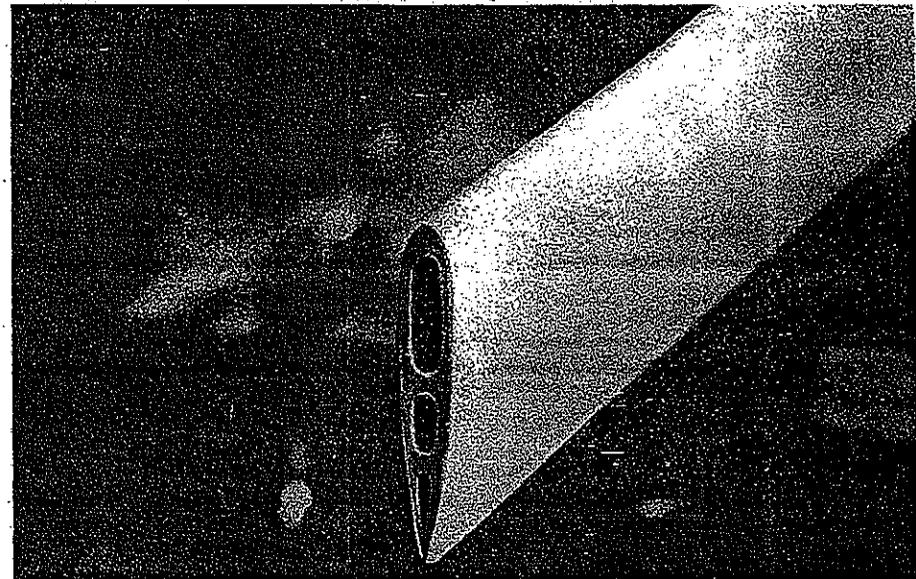


Fig. 67. Quando il profilo alare della figura 66 è rovesciato, con la parte affilata rivolta contro corrente, la resistenza sale a 2,6 unità.

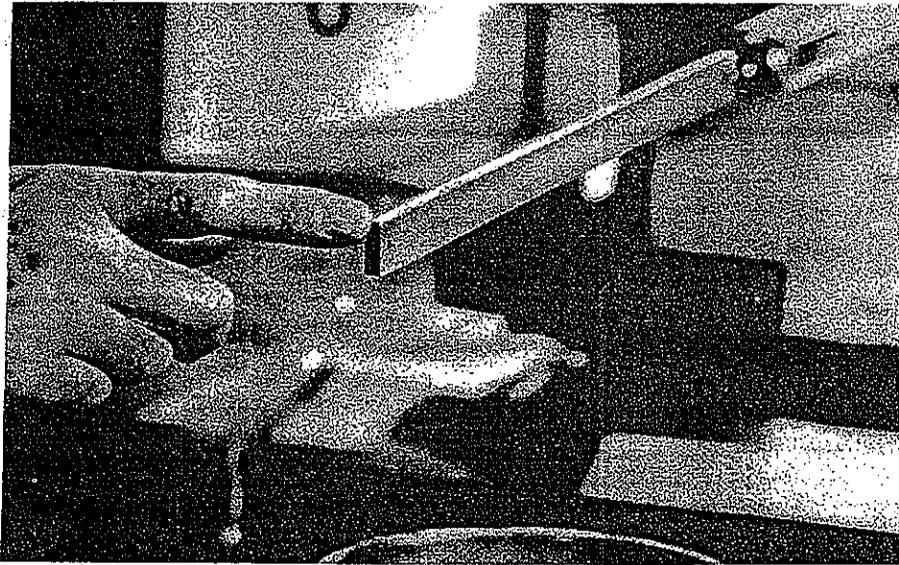


Fig. 68. Il supporto rettangolare, su cui era montato il profilo alare della figura 66, ha da solo una resistenza di 4,0 unità.



Fig. 69. Un bastoncino cilindrico, il cui diametro è pari allo spessore massimo del profilo alare, ha una resistenza di 9,3 unità.

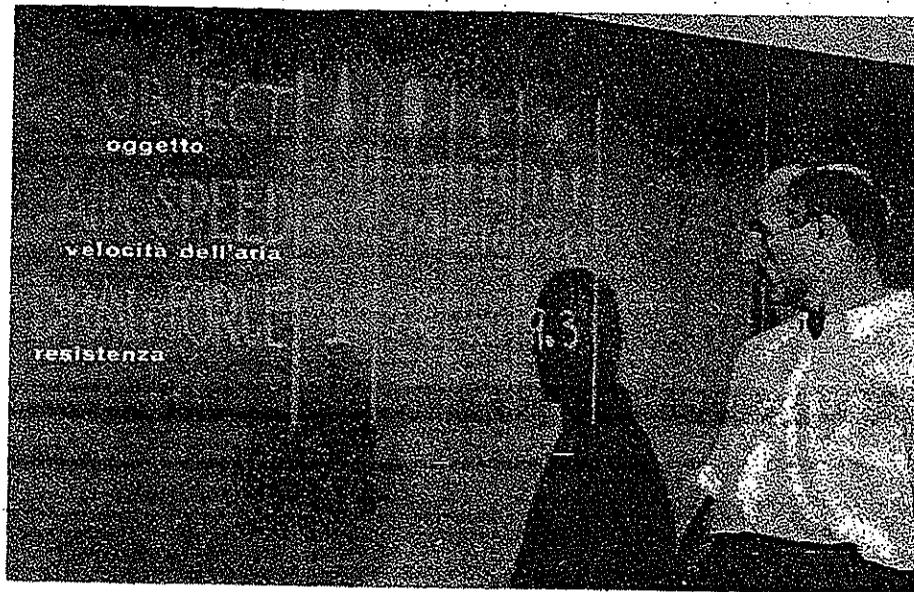


Fig. 70. Tabella riassuntiva degli esperimenti sulle forme aerodinamiche.

di quella del profilo alare (fig. 68b), pur essendo nel supporto rettangolare molto minore la superficie totale, e anche la superficie frontale.

Sistemiamo successivamente sul braccio della leva un bastoncino cilindrico con un diametro esattamente uguale allo spessore massimo del profilo alare, così che il profilo alare può apparire come lo stesso bastoncino, con in più una parte anteriore lievemente allungata e una lunga coda appuntita (fig. 69a). Alla velocità campione di 210 miglia all'ora la resistenza esercitata sul bastoncino cilindrico è più di nove volte superiore a quella esercitata sul profilo alare.

Questi quattro esperimenti sono una prova schiacciante di quanto sia efficace l'affusolamento per ridurre la resistenza (fig. 70).

Nei primi tempi del volo, e soprattutto nell'età d'oro del biplano, venivano usati montanti di filo di ferro per irrigidire e rafforzare la struttura dell'aeroplano. Potete immaginarvi facilmente, dagli esperimenti che abbiamo or

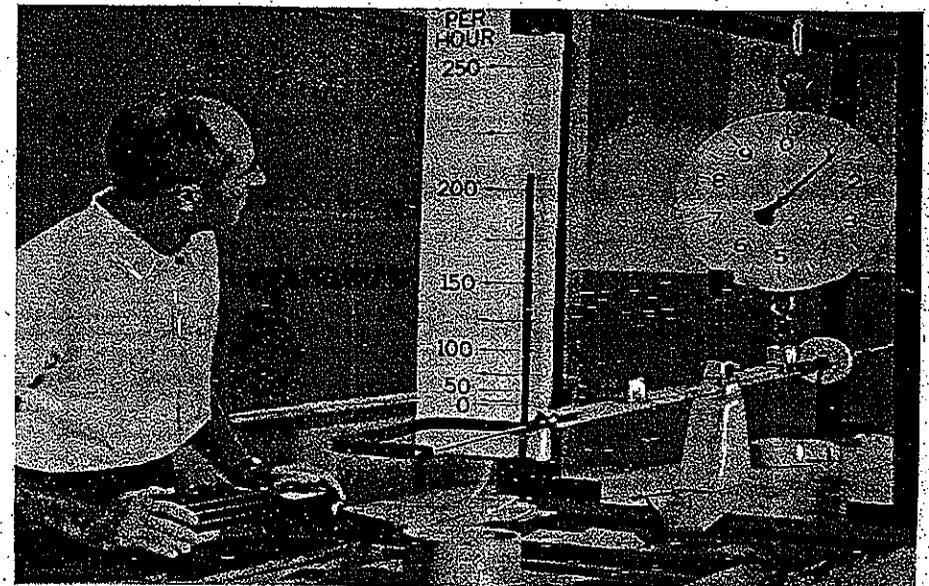
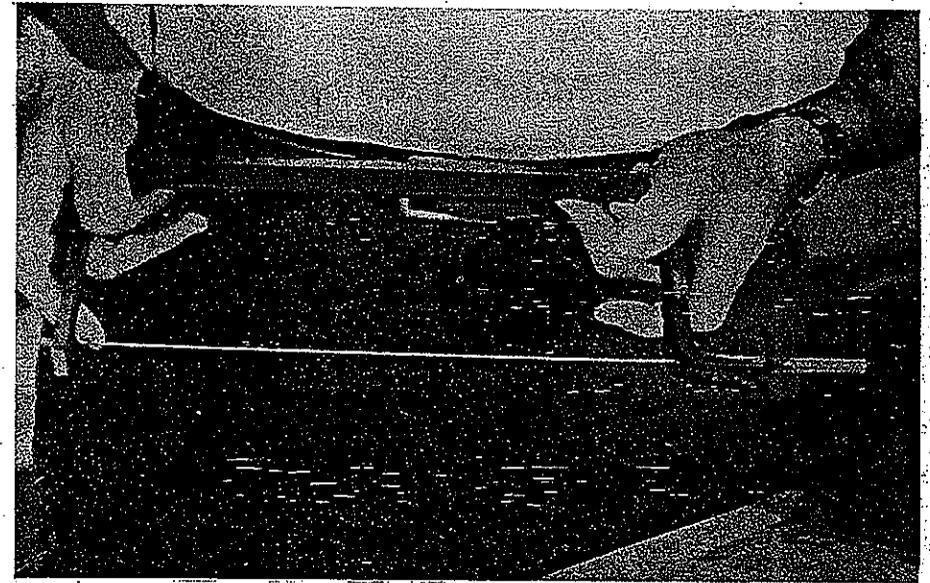


Fig. 71. Un filo di ferro con un diametro pari a un decimo soltanto dello spessore del profilo alare ha una resistenza di 1,1 unità.

ora descritto, quanto questi fili di ferro incrementassero la resistenza.

Per chiarire meglio questo punto abbiamo teso sull'intelaiatura a U di uno di quegli arnesi che servono a tagliare i formaggi un filo di ferro il cui diametro è soltanto un decimo circa dello spessore massimo del profilo alare (fig. 71a).

Questo arnese è sistemato sul braccio di leva in modo che l'intelaiatura resti ben lontana dal getto d'aria e si possa misurare soltanto la resistenza esercitata sul filo di ferro. A 210 miglia all'ora troviamo che la resistenza di questo filo, indicata sul quadrante, è di 1,1 unità (fig. 71b), un po' più della resistenza di un profilo alare dieci volte più spesso.

Poiché una forma aerodinamica ben fatta può essere dieci

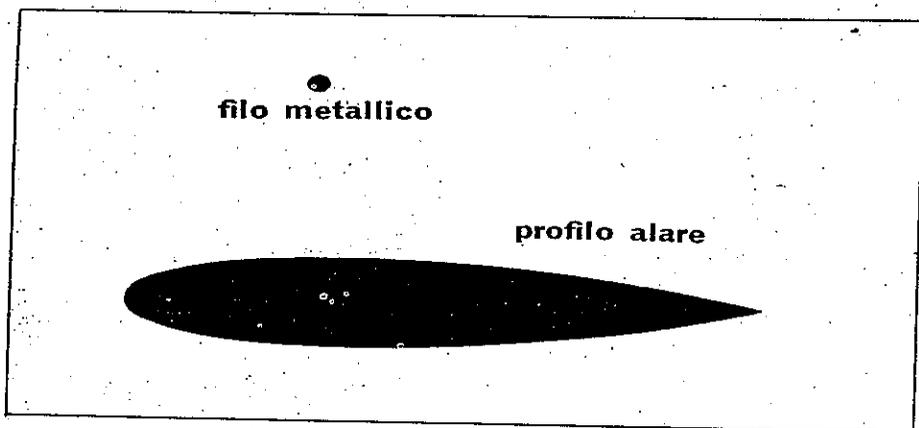


Fig. 72. Proporzione tra le sezioni di un filo di ferro e di un profilo alare aventi resistenze uguali.

volte più spessa di un filo di ferro e non offrire, tuttavia, maggiore resistenza (fig. 72), vi renderete conto che erano pienamente giustificati i grandi cambiamenti apportati nella progettazione degli aeroplani — dall'apparecchio dei fratelli Wright di quarant'anni fa, ai velocissimi caccia di oggi (fig. 73).

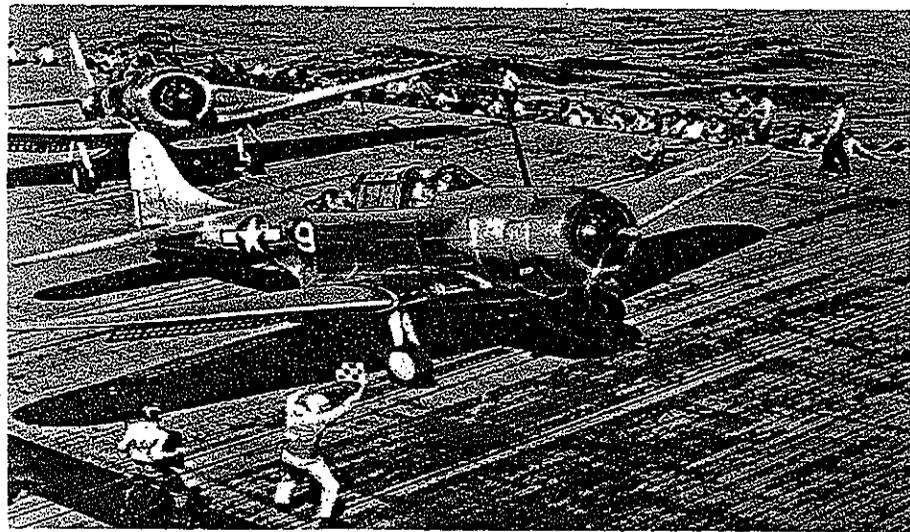
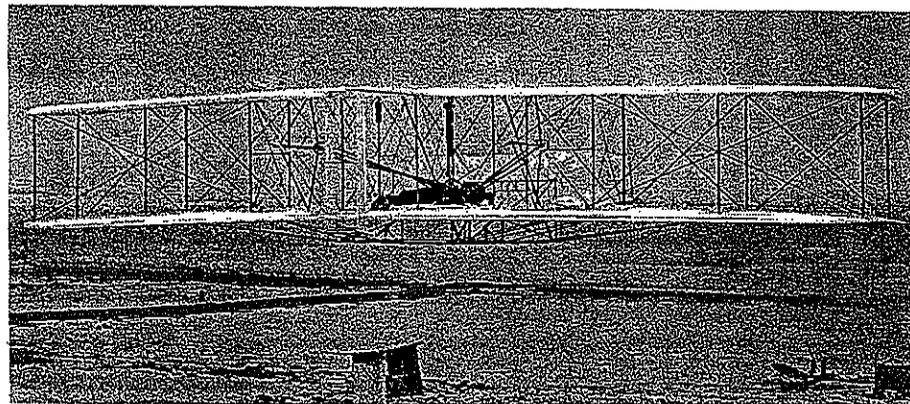


Fig. 73.

Il principio di Bernoulli per il moto di un fluido non viscoso.

Come possiamo spiegare i vantaggi veramente grandiosi ottenuti con la forma aerodinamica? Il segreto sta nel comprendere la pericolosa situazione che viene a formarsi quando uno strato limite deve scorrere da una regione di bassa pressione a una di alta pressione: se lo strato limite rallenta fino a fermarsi, cioè « stalla », tutta la corrente può essere sconvolta e la conseguenza è di solito un grande aumento della resistenza. Proprio questa è la situazione che la forma aerodinamica permette di evitare.

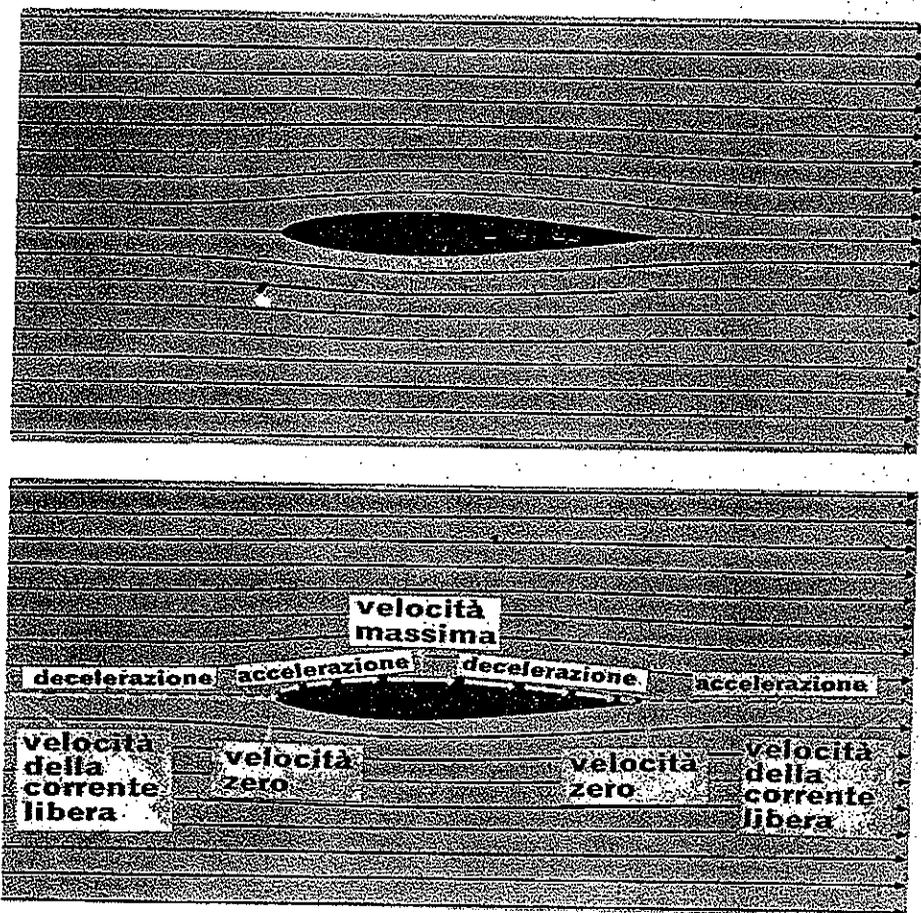


Fig. 74. Corrente non viscosa intorno a un profilo alare: (a) configurazione delle linee di corrente; (b) distribuzione della velocità sulla linea di corrente centrale che avvolge il profilo alare.

Per spiegare tutto ciò cominciamo a esaminare la corrente intorno a un profilo alare, partendo dal presupposto che il fluido non abbia affatto viscosità: questa assenza di viscosità implica che il fluido possa scivolare sulla superficie del profilo alare. Nella figura 74a sono indicate le linee di corrente per un fluido di questo tipo: osservate la linea di corrente centrale, che si suddivide vicino al bordo d'attacco, scorre poi intorno ai due lati del profilo alare e si ricon-

giunge infine, ridiventando una linea unica, sul bordo di fuga. Per questo tipo di moto si può fare un'analisi matematica completa che ci dà la forma delle linee di corrente e la velocità in ogni punto.

Di questa analisi il risultato che ora ci interessa è che le velocità di una particella nei diversi punti lungo la linea di corrente centrale sono proporzionali alle lunghezze delle frecce della figura 74b. Una particella fluida, cominciando con la velocità della corrente libera molto a monte, decelera fino a fermarsi sul bordo d'attacco. Un punto come questo, in cui la velocità è zero, si chiama *punto d'arresto*. Via via che la particella fluida si allontana dal punto d'arresto, seguendo la corrente lungo la superficie del profilo alare, accelera fino a raggiungere la massima velocità pressappoco nella posizione di massimo spessore; poi la particella fluida rallenta fino a raggiungere un altro punto d'arresto vicino al bordo di fuga, dopo di che accelera di nuovo raggiungendo la velocità della corrente libera molto a valle.

Sulla base dell'equazione del moto di Newton possiamo ora calcolare come varia la pressione lungo la stessa linea di corrente centrale. Mentre la particella fluida si avvicina al bordo d'attacco, già molto a monte (fig. 75a) comincia a rallentare. Abbiamo presupposto che le forze di viscosità siano assenti, quindi la decelerazione può essere provocata solo dall'azione delle pressioni sulla faccia anteriore e su quella posteriore della particella. Per fare di questo un esame più particolareggiato, osserviamo la figura 75b che rappresenta la nostra particella fluida ingrandita. Se la particella rallenta, la forza risultante che agisce su di essa deve avere senso opposto a quello del moto; perciò la pressione sulla faccia anteriore della particella deve essere maggiore della pressione sulla faccia posteriore. Questo è espresso dal *principio di Bernoulli* che può essere così enunciato: *in un moto non viscoso una decelerazione è accompagnata da un aumento di pressione lungo la linea di corrente, e, viceversa, quando si ha un'accelerazione c'è una caduta di pressione lungo la linea di corrente*. Più brevemente: lungo una data linea di corrente dove la velocità è alta la pressione è bassa e dove la velocità è bassa la pressione è alta.

Basandoci su quanto afferma il principio di Bernoulli possiamo ora calcolare come è distribuita la pressione che agisce sulla superficie del profilo alare (fig. 76). Molto a monte e

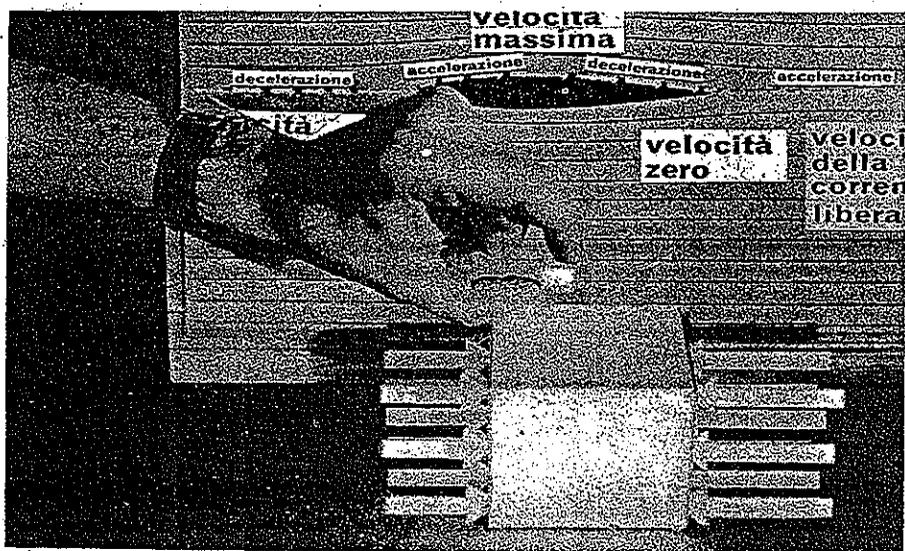
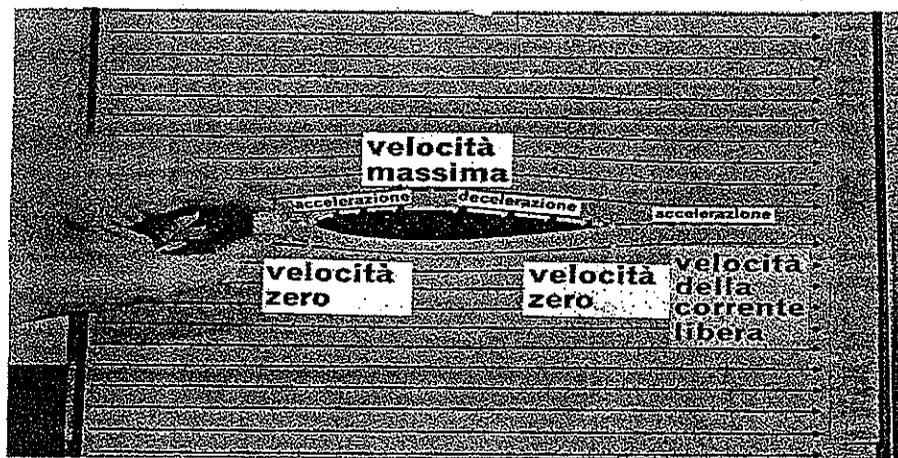


Fig. 75. Illustrazione del principio di Bernoulli per una particella fluida che si muova in assenza di forze viscosse lungo una certa linea di corrente: se la particella rallenta la pressione deve salire e viceversa.

molto a valle, dove si ha la velocità della corrente libera, la pressione è uguale alla pressione atmosferica; accanto al bordo d'attacco e al bordo di fuga, dove la velocità è zero,

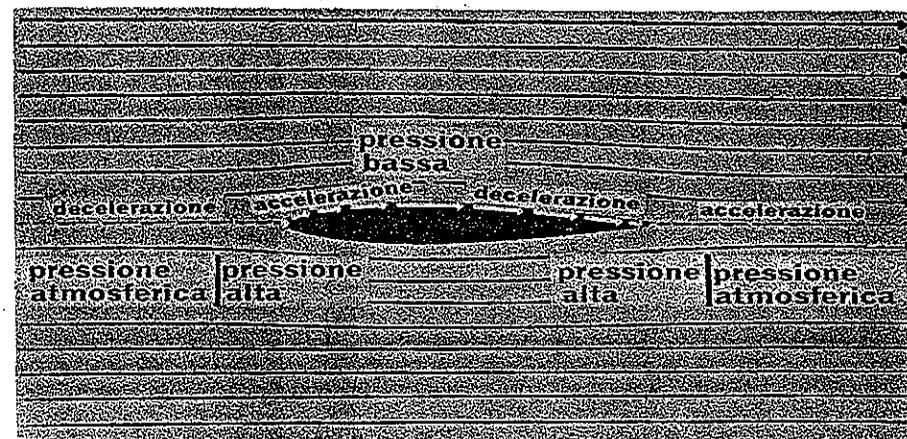


Fig. 76. In base al principio di Bernoulli la distribuzione della pressione può essere ricavata dalla distribuzione della velocità (fig. 74b).

la pressione raggiunge il valore massimo; vicino alla spalla, dove la velocità è massima, la pressione tocca il valore minimo. Così, quando una particella fluida viaggia lungo la superficie del profilo alare, dal bordo d'attacco alla spalla, guadagna quantità di moto e perde pressione. La particella perde poi questa quantità di moto viaggiando dalla spalla al bordo di fuga, mentre riguadagna pressione.

Vediamo che la pressione del fluido è alta sia vicino al bordo d'attacco sia vicino al bordo di fuga. Mentre il primo fornisce una componente di resistenza, il secondo fornisce una spinta, cioè una componente di resistenza negativa. Teoricamente si può dimostrare che quando una forma aerodinamica di portanza nulla si muove attraverso un fluido non viscoso, queste due componenti sono esattamente uguali e opposte, e quindi la loro risultante è zero: in queste circostanze non si ha cioè resistenza alcuna. Questa conclusione si chiama Paradosso di d'Alembert: paradosso perché intuitivamente sembra errato (come è poco attendibile il nostro intuito in questo campo!) dire che un corpo può muoversi attraverso un fluido, sia pure non viscoso, senza incontrare resistenza al suo movimento.

Effetto della viscosità sulla distribuzione della pressione.

Quel che abbiamo detto finora a proposito del profilo alare era basato sul presupposto che non ci fosse viscosità; dobbiamo ora vedere come possono cambiare le cose quando è presente la viscosità. Il fluido non può più scorrere sulla superficie del profilo alare, anzi la velocità alla superficie del profilo alare è zero. Tutta la situazione è adesso così diversa che a prima vista il nostro ragionamento sui fluidi non viscosi può sembrare completamente inutilizzabile. Ma dobbiamo ricordare che per Numeri di Reynolds molto alti le forze di viscosità hanno importanza soltanto per gli strati limite molto sottili vicini alle superfici solide (fig. 77). Il resto della corrente si comporta pressappoco come prima, in modo essenzialmente non viscoso. La distribuzione della pressione sopra la superficie del profilo alare è determinata dalla gran massa della corrente non viscosa ed è pressappoco uguale a quella che si avrebbe se lo strato limite fosse del tutto assente. Inoltre questa ripartizione della pressione esercitata dalla gran massa della corrente si imprime, per così dire, sul sottile strato limite di fluido che si muove lentamente vicino al corpo. Le particelle fluide nello strato limite in lento movimento devono obbedire alle forze originate da questa distribuzione di pressioni (fig. 78).

Tra il bordo d'attacco e la spalla, una particella dello strato limite è spinta verso valle dalla pressione decrescente; però, a causa del contrasto con le forze di viscosità che ha incontrato, nell'istante in cui raggiunge il punto di minima pressione sopra la spalla la sua quantità di moto è minore di quella che sarebbe stata altrimenti. Così, mentre continua il suo viaggio dalla spalla verso il bordo di fuga, la particella dello strato limite parte con una quantità di moto ridotta; non solo, ma deve anche opporsi sia alle forze viscosive contrarie sia alle forze frenanti generate ora dalla pressione crescente. Se la velocità con cui aumenta la pressione è troppo alta la particella dello strato limite può rallentare fino a fermarsi: chiamiamo questo fenomeno *stallo*. Quando uno strato limite stalla può essere spinto indietro dalla pressione più alta che esiste sul bordo di fuga. Tale inversione della corrente dello strato limite crea, alla fine, una vasta regione

vorticoso di fluido « morto » e sconvolge la corrente principale che ora deve fluire intorno a questa regione morta.

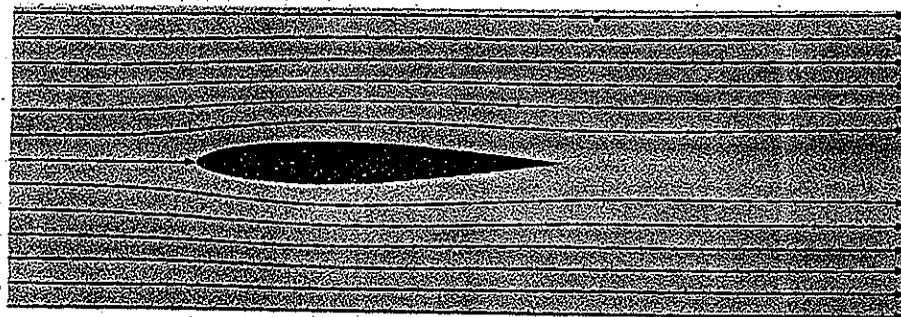


Fig. 77. In una corrente di bassa viscosità (cioè con alto valore del Numero di Reynolds) gli effetti viscosi sono limitati ai sottili strati limite vicino al corpo, rappresentati qui dalle regioni più chiare lungo la superficie, che si fondono in una scia.



Fig. 78. Distribuzione della pressione esercitata sullo strato limite, rispetto alla quale lo strato limite deve assestarsi.

Stallo dello strato limite dovuto a un gradiente di pressione avverso.

I fotogrammi della figura 79, tratti da un film, mostrano come si evolve una corrente intorno alla poppa di un profilo alare troppo spesso per evitare lo stallo. Il fluido scorre da sinistra a destra, e la freccia spessa indica la regione in cui comincia il distacco dello strato limite. Nella figura 79a

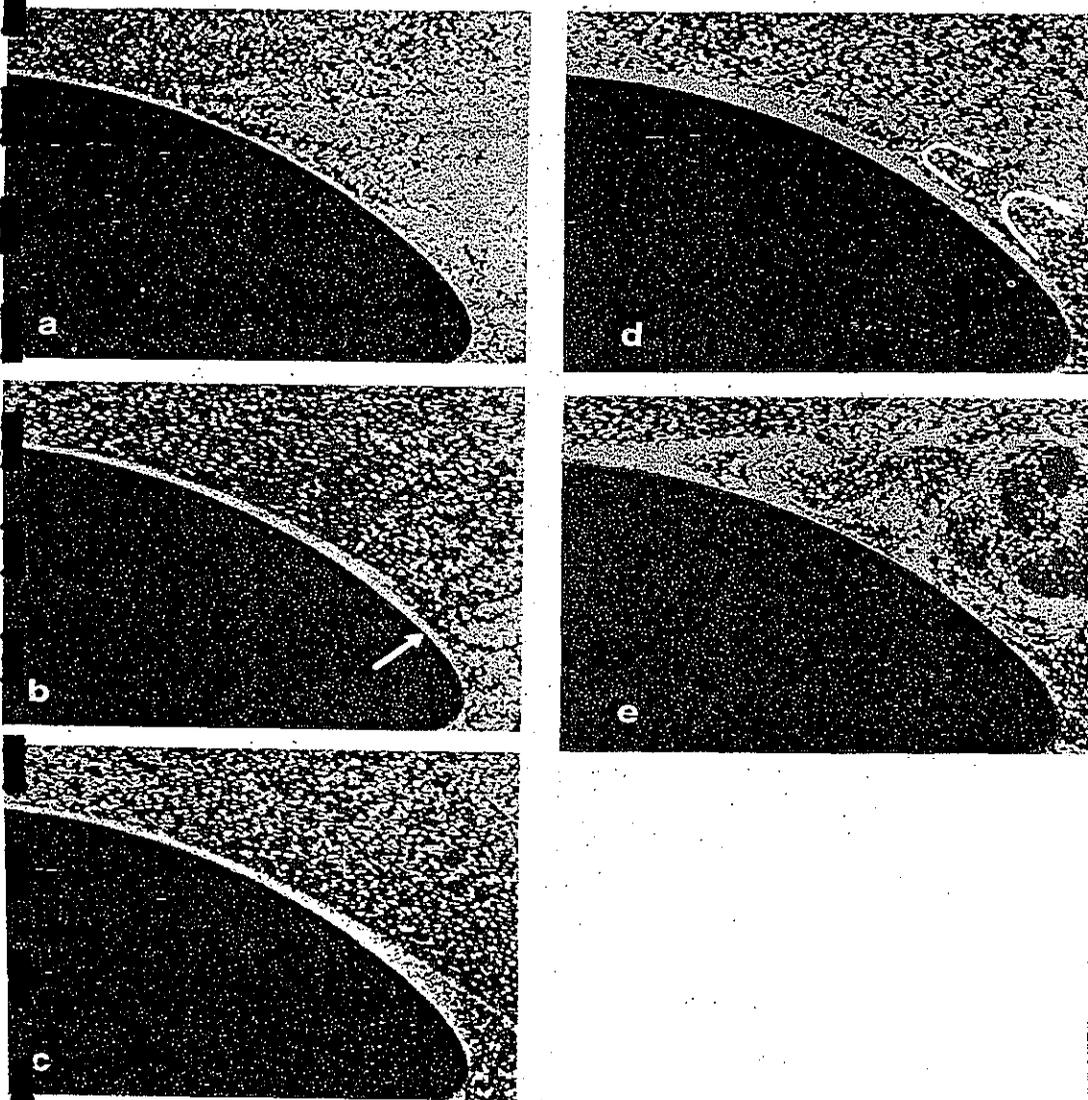


Fig. 79. Fotogrammi tratti da un film che mostrano il meccanismo del distacco dello strato limite nella fase in cui la corrente si va formando intorno a un oggetto con un forte gradiente di pressione avverso (L. Prandtl, Göttingen).

si vede il fluido in quiete: sulla superficie dell'acqua sono particelle di alluminio, che servono a renderne visibili i movimenti. Nella figura 79b la corrente ha avuto appena inizio: lo strato limite si ispessirà col tempo. Vicino alla freccia il fluido dello strato limite è rallentato, fino ad arrestarsi, dal gradiente di pressione avverso determinato dalla corrente generale. Questo fluido morto dello strato limite si accumula in una regione che diventa sempre più spessa (fig. 79c). Poi questa regione di fluido ristagnante è spinta indietro dal campo di pressione e si vede il grosso del fluido *distaccarsi* dalla superficie e scorrere sopra una regione dove la corrente dello strato limite si inverte e gira su se stessa, come indicano le frecce ricurve della figura 79d. L'ultimo fotogramma (fig. 79e) mostra lo stallo completamente sviluppato: potete vedere che lo stallo porta come conseguenza un violento distacco della corrente principale e il formarsi di abbondanti mulinelli nella regione in cui lo strato limite inverte il suo moto.

Si può capire meglio in che consiste lo stallo ricorrendo a un'analogia: immaginate che una pallina posta sull'orlo di una ciotola riceva una leggerissima spinta; rotolando giù, lungo la parete della ciotola, accelera e, dopo aver raggiunto il fondo, rallenta risalendo dall'altra parte. Se non vi fosse attrito lo scambio tra energia potenziale ed energia cinetica avverrebbe senza perdite e la pallina giungerebbe sull'orlo opposto della ciotola proprio nel momento in cui si esaurisce l'ultimo residuo della sua quantità di moto. Ma se è presente anche la più piccola traccia di attrito la pallina « stalla » prima di arrivare in cima e rotola di nuovo in fondo alla ciotola. La particella fluida di uno strato limite si comporta pressappoco allo stesso modo, scendendo prima da una montagna di pressione — dal bordo d'attacco alla spalla — e scalando poi una montagna di pressione — dalla spalla al bordo di fuga.

Fortunatamente, però, l'analogia non è esatta: se lo fosse ci sarebbe sempre nello strato limite qualche inversione di corrente e ci sarebbe quindi sempre un distacco della corrente principale. Ma proprio il fatto che lo strato limite si muova molto più lentamente della corrente esterna fa sì che il fluido esterno più veloce eserciti sul fluido più lento dello strato limite una forza di viscosità in direzione tale da

aiutare effettivamente lo strato limite a procedere nel senso della corrente. La situazione è abbastanza complicata perché abbiamo ora a che fare con un equilibrio di tre forze: Resta da vedere se la forza viscosa di rincalzo applicata dalla corrente esterna è abbastanza grande da controbilanciare le opposte forze combinate dovute all'attrito della parete e all'aumento di pressione dal bordo d'attacco al bordo di fuga.

Resistenza di forme aerodinamiche e non aerodinamiche.

In un corpo sottile con un lungo e affilato bordo di fuga, come un profilo alare, l'aumento della pressione dalla spalla al bordo di fuga è tanto lento e graduale che lo strato limite fa quasi tutto il percorso verso il bordo di fuga senza stallare. La corrente esterna principale è allora praticamente uguale a quella che si avrebbe se non ci fosse affatto viscosità. La distribuzione delle pressioni che agiscono sulla superficie del corpo è press'a poco quella che si avrebbe in una corrente non viscosa e non provoca dunque nessuna resistenza di pressione.

Giunti a questo punto possiamo finalmente essere più precisi su ciò che intendiamo con l'espressione « aerodinamico »: per definizione una forma si dice aerodinamica se non dà luogo a distacco dello strato limite. Ad alti valori del Numero di Reynolds un oggetto aerodinamico non incontra quasi resistenze dovute alla pressione, perché la pressione media sull'estremità di poppa è esattamente uguale alla pressione media sull'estremità di prua.

Ma cosa accade con le forme non aerodinamiche come un anello o una sfera? Chiamiamo « ottusi » questi oggetti perché non hanno bordi di fuga lunghi e affilati. Negli oggetti ottusi, la pressione aumenta dalla spalla al bordo di fuga così rapidamente che lo strato limite stalla molto presto, proprio vicino alla spalla stessa. Una larga scia vorticosa si forma a valle del distacco (fig. 80), una scia molto più larga di quella lasciata in un fluido viscoso dalle forme affusolate. Inoltre, per l'arresto della corrente principale contro lo spazio occupato dalla scia vorticosa, la configurazione della corrente cambia e con essa cambia la distribuzione della



Fig. 80. Configurazione della corrente con alto Numero di Reynolds intorno a un corpo di forma non aerodinamica. La minima traccia di viscosità produce una larga scia staccata, e un completo cambiamento nella distribuzione della pressione e nelle caratteristiche della corrente principale.

pressione: la pressione sulla parte posteriore del corpo non è più uguale a quella sulla parte anteriore, ma ha un valore intermedio fra la pressione bassa della spalla e la pressione alta del bordo d'attacco. Poiché ora la pressione media sopra la metà anteriore del corpo supera la pressione media sopra la metà posteriore, compare una risultante delle resistenze di pressione. Con oggetti ottusi questa risultante delle resistenze di pressione connessa con il distacco della corrente è di solito molte volte maggiore della resistenza viscosa dovuta all'attrito sopra la superficie del corpo, e rende conto della resistenza relativamente grande presentata dalle forme non aerodinamiche.

Tuttavia perfino un oggetto di quelli chiamati aerodinamici, come un profilo alare ben progettato, può prestarsi allo stallo se è situato in modo da formare un angolo sfavorevole rispetto alla corrente: è esattamente quello che accade quando si accresce l'angolo di incidenza nel tentativo di ottenere una portanza maggiore da un profilo alare: una variazione nell'angolo di incidenza altera la distribuzione della pressione, specialmente sulla superficie superiore (o « estradosso »), da cui dipende in massima parte la portanza; se l'angolo di incidenza supera un certo valore critico lo strato limite stalla

sulla superficie superiore e la corrente principale si distacca da essa (fig. 81); la resistenza cresce allora notevolmente e, cosa ancor più importante, la portanza diminuisce di colpo. Se questo capita a un aeroplano che sta cercando di atterrare, l'aeroplano atterra bruscamente « di piatto » e il carrello di atterraggio può andargli in pezzi. Se lo stallo avviene in pieno volo l'aeroplano può scivolare in vite. Per produrre una portanza elevata durante l'atterraggio e il decollo senza un angolo di incidenza eccessivo, che potrebbe portare alla catastrofe dello stallo, gli aeroplani sono muniti di ipersostentatori allungabili che aumentano la superficie alare.

Lo strato limite: visualizzazione del fenomeno.

Possiamo illustrare sperimentalmente i fenomeni connessi con lo strato limite introducendo in una corrente d'aria un po' di tetracloruro di titanio liquido; il tetracloruro si combina col vapore acqueo contenuto nell'aria e forma una densa nuvola di fumo sottilissimo. (Nell'eseguire questi esperimenti si devono prendere adeguate precauzioni perché il fumo è molto tossico).

Nella figura 82a una goccia di tetracloruro di titanio viene posta sul bordo d'attacco di una sfera. Dalla figura 82b potete vedere che lo strato limite resta sottile e aderente fin subito prima del punto di massimo spessore della sfera; di là da questo, lo strato limite si distacca e la corrente principale, anziché richiudersi sulla sfera, è dirottata tutt'intorno a una regione approssimativamente cilindrica occupata dalla scia.

Nella figura 83 la goccia di tetracloruro di titanio è stata versata nel punto opposto della sfera: il fumo che si forma

Fig. 81. (a) Profilo alare con basso angolo di incidenza: lo strato limite resta sottile e aderente. (b) Profilo alare con angolo di incidenza eccessivo: lo strato limite si distacca provocando lo stallo del profilo alare (per gentile concessione del Professor F. N. Brown, dell'Università di Notre Dame).

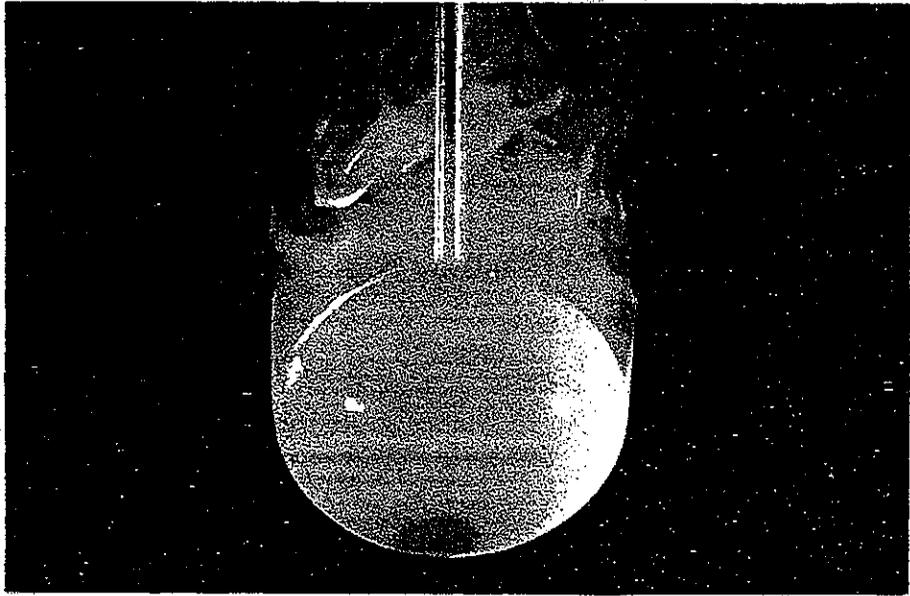
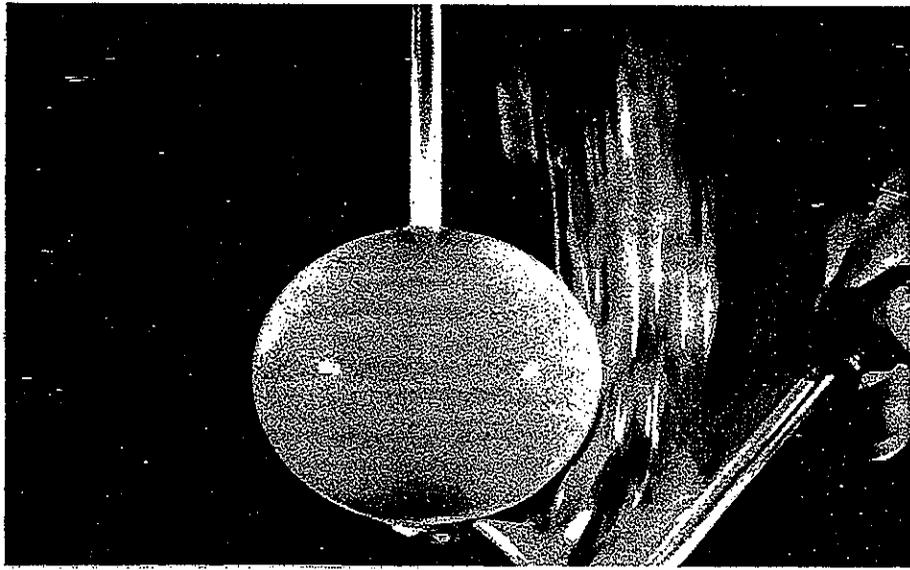


Fig. 82. Strato limite di una corrente che fluisce verso l'alto intorno a una sfera. (a) Viene posta sul bordo d'attacco una goccia di tetracloruro di titanio. (b) Nella corrente formatasi lo strato limite sulla metà anteriore è così sottile da essere a mala pena visibile; vi è però un distacco netto subito prima della spalla; a valle si ha una scia larga, discontinua, piena di vortici.

qui si muove dalla regione di alta pressione esistente intorno a questo punto sul bordo di fuga della sfera verso la regione di bassa pressione vicino alla spalla, e poi torna su se stesso avvolgendosi in spire e riempiendo tutto lo spazio a valle della spalla.

La figura 84 mostra cosa accade quando mettiamo una gocciolina di tetracloruro di titanio sul bordo d'attacco di una forma affusolata: il sottile strato limite resta aderente all'oggetto molto oltre la spalla. Osservate inoltre come è stretta la scia. In questo caso la pressione viene recuperata quasi completamente al bordo di fuga e la resistenza di pressione è piccola.

Spiegazione degli esperimenti sull'affusolamento.

Con quel che sappiamo sul comportamento dello strato limite con gradienti di pressione favorevoli e avversi, possiamo ora ritornare ai nostri esperimenti di confronto tra forme diverse e vedere perché il profilo alare incontra meno resistenza quando è sistemato nella posizione giusta che quando è rivolto con l'estremità affilata controvento; in quest'ultima posizione la forma a valle della spalla provoca un rapido aumento della pressione. Ne conseguono il distacco quasi immediato dello strato limite, una pressione bassa nella scia e, quindi, un'alta resistenza di pressione. Anche le altre forme — il sostegno rettangolare, il bastoncino cilindrico e il filo di ferro — hanno forti gradienti di pressione avversi che danno luogo al distacco della corrente e a notevoli resistenze di pressione.

Fig. 83. Sequenza tratta da un film: i fotogrammi mostrano l'inversione della corrente nello strato limite stallato; l'aria fluisce verso l'alto in senso verticale intorno alla sfera. (a) Una goccia di tetracloruro di titanio viene posta vicino all'asticciola del supporto per mezzo di un nettapipe: si osservi che il fumo comincia a muoversi controcorrente (cioè verso il basso nella fotografia) fino alla spalla e poi si avvolge su se stesso. (b) Provenendo dalla parte posteriore della sfera il fumo ha raggiunto la spalla e, a sinistra, scorre verso valle nell'interfacies tra la corrente principale e la scia. (c) Tutto il fumo che vediamo qui nella scia proviene inizialmente dalla posizione più arretrata della sfera: prova così l'esistenza di una corrente che fluisce a ritroso e mostra che nella scia vi è un intenso rimescolio.

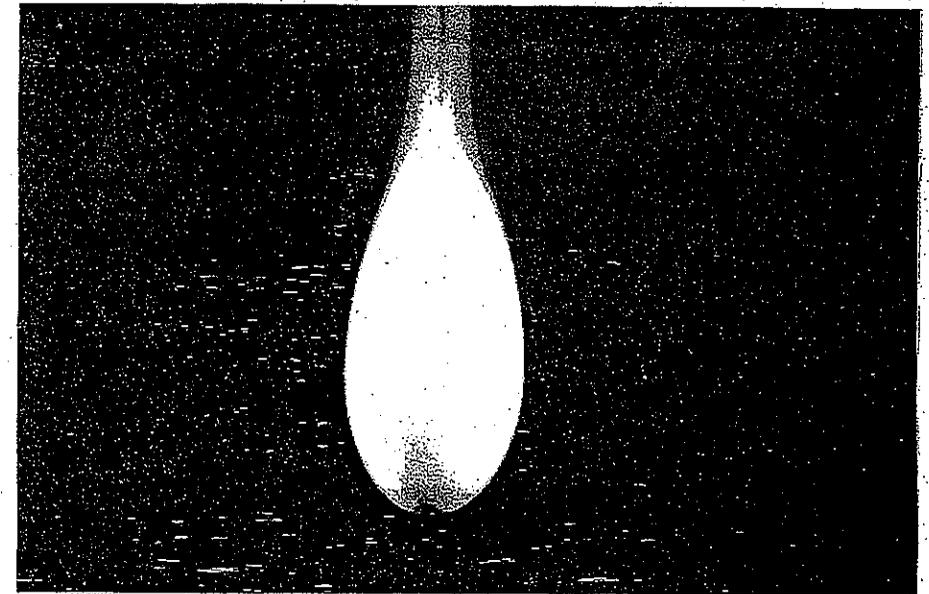
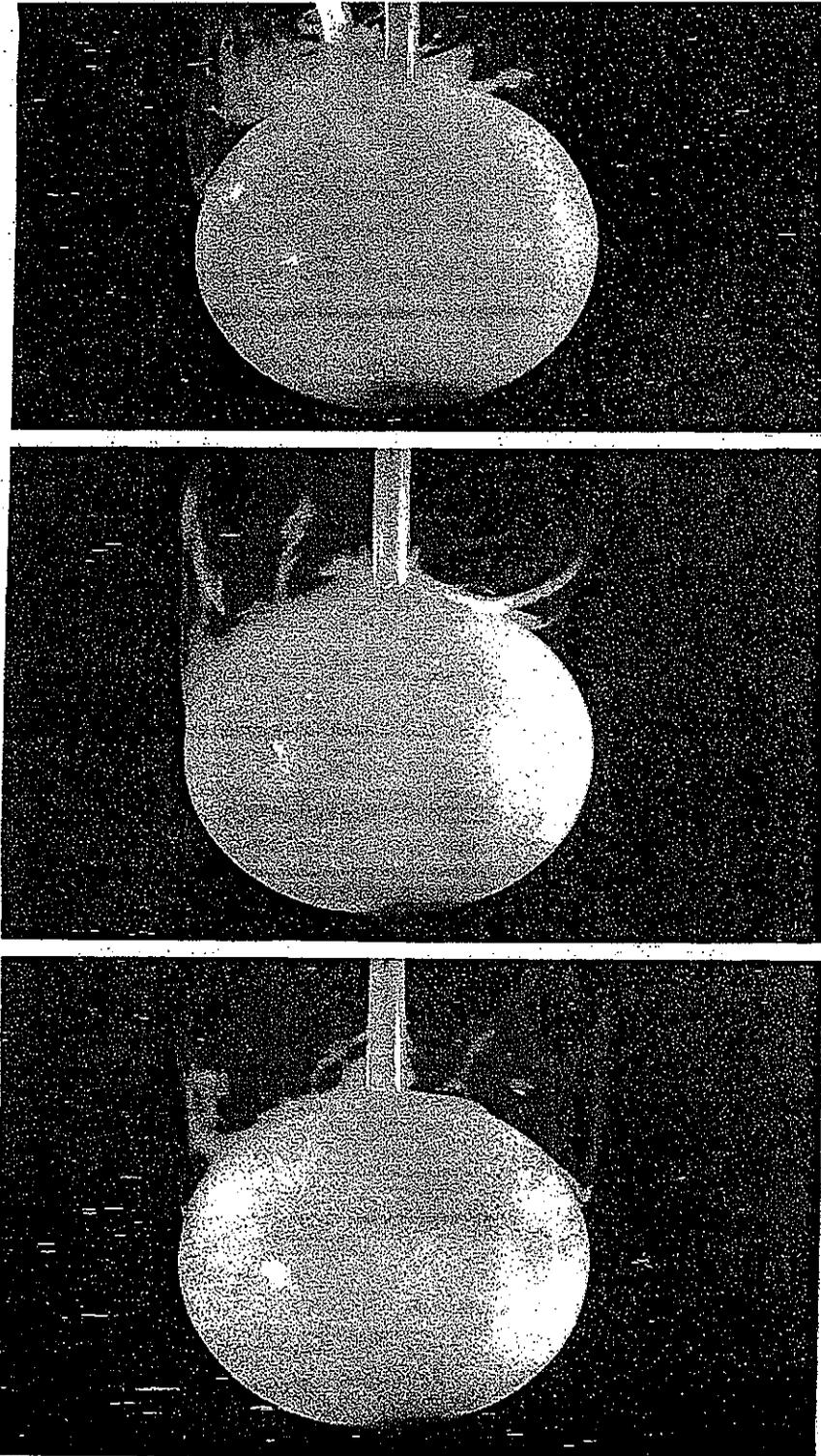


Fig. 84. Corrente diretta verso l'alto intorno a una forma aerodinamica.



Chi è piú abile costruttore di forme aerodinamiche: la Natura o l'Uomo?

La forma aerodinamica non è una novità: già da molto tempo la Natura ha messo a punto forme con bassa resistenza: la figura 85a mostra una trota vista dall'alto, con i

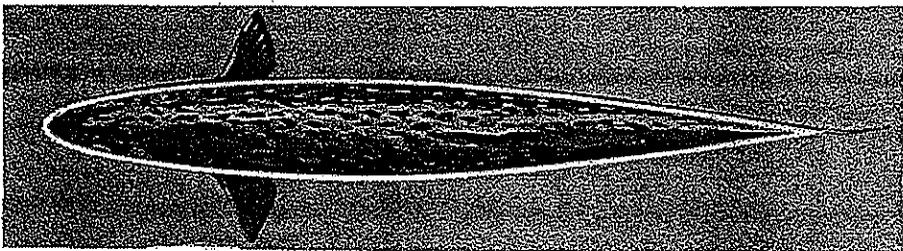
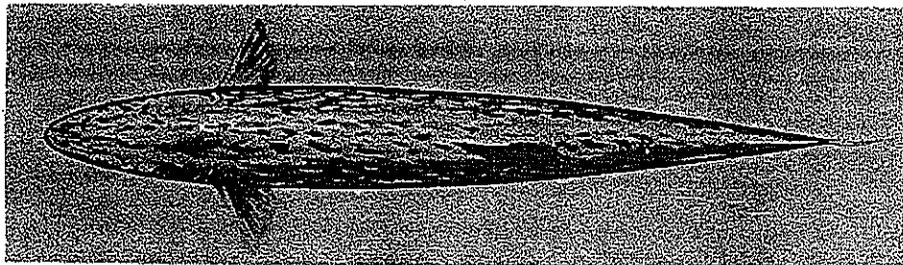


Fig. 85. Non soltanto la mente razionale dell'uomo può progettare forme con bassa resistenza, ma anche la Natura irrazionale e può farlo attraverso il meccanismo delle mutazioni genetiche e della selezione naturale. In alto una trota; in basso la sagoma di un profilo alare a bassa resistenza sovrapposto alla trota.

contorni tracciati in nero; nella figura 85b abbiamo sovrapposto alla trota la sagoma di un moderno profilo alare a bassa resistenza, e ne abbiamo tracciato in bianco i contorni. Quel che stupisce veramente in questa coincidenza, che non è meramente casuale, sono i metodi diversi attraverso i quali si è giunti a due forme tanto simili. In un caso la Natura ha eseguito miliardi di esperimenti di vita e di morte, per milioni di anni, provando innumerevoli forme; nell'altro l'in-

telligenza umana, ricercando e scoprendo l'ordine nel mondo della natura, in poche decine d'anni è stata in grado di raggiungere una capacità che in tempi piú antichi sarebbe stata ritenuta divina, quella di creare progetti dalle caratteristiche ottimali.

9 Spiegazione dei paradossi

Perché, quando il Numero di Reynolds è basso, l'affusolamento accresce la resistenza.

Gli esperimenti che mostravano la drastica riduzione della resistenza dovuta alle forme aerodinamiche sono stati eseguiti tutti a Numeri di Reynolds abbastanza alti. Ma nel secondo capitolo avevamo visto che per valori molto bassi del Numero di Reynolds la forma aerodinamica *aumenta* in realtà la resistenza. Siamo ora in grado di spiegare perché si ha questo effetto opposto.

Ricordiamo, per cominciare, che a mano a mano che il Numero di Reynolds diminuisce lo strato limite diventa più spesso; per un valore estremamente basso del Numero di Reynolds la regione viscosa si estende molto lontano dal corpo e occupa praticamente tutta la regione della corrente: diventa allora addirittura priva di senso anche l'espressione « strato limite ».

L'esperimento della figura 86 mostra la grande differenza che esiste nella corrente vicino a un corpo ottuso se il Numero di Reynolds ha un valore molto alto o molto basso. Quando una pesante pallina d'acciaio, ricoperta di uno strato di colore, viene lasciata cadere in una colonna d'acqua (fig. 86b) si muove con un Numero di Reynolds alto: lo strato limite si distacca e produce una spessa scia vorticoso come nell'esperimento con la corrente di fumo.

Quando invece una sfera ricoperta di glicerina colorata viene lasciata cadere in una colonna di glicerina (fig. 86c) si muove con un Numero di Reynolds molto basso: non si ha assolutamente distacco; il fluido colorato vicino alla superficie della sfera scorre regolarmente confluendo in un'unica linea di corrente. Possiamo così riassumere l'esperimento: a valori alti del Numero di Reynolds *vi* è distacco; a valori bassi del Numero di Reynolds *non vi* è distacco.

Abbiamo visto prima che il distacco dello strato limite a Numeri di Reynolds alti è causato dal modo particolare in

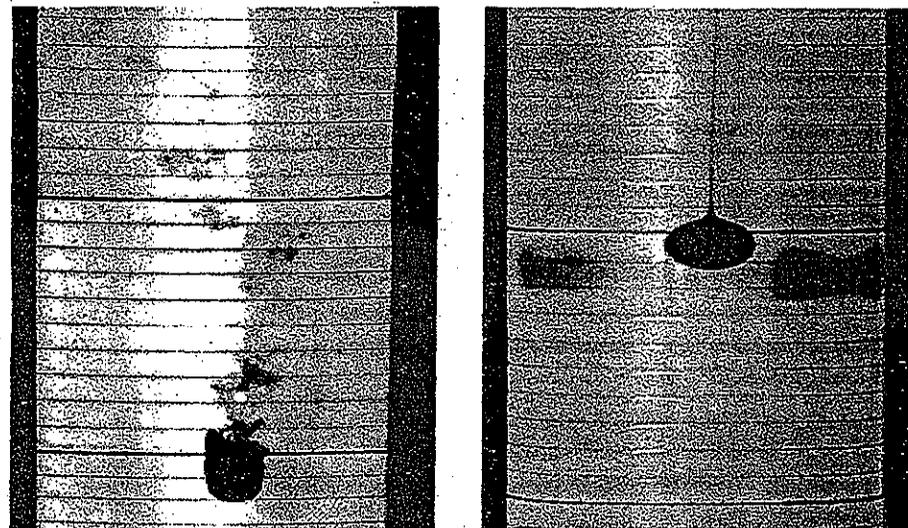
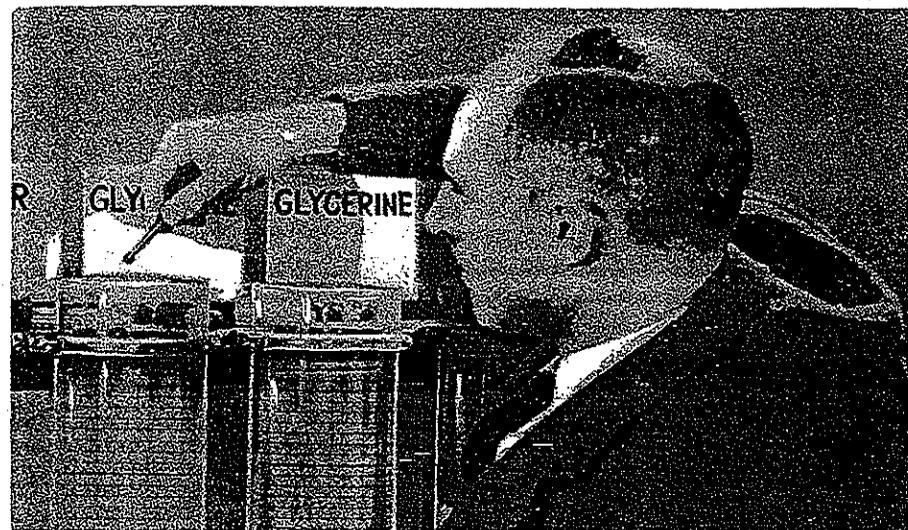


Fig. 86. Una pallina d'acciaio coperta di uno strato di colore lasciata cadere in una colonna di liquido.

cui si distribuisce la pressione dovuta al grosso della corrente non viscosa: una diminuzione di pressione dal bordo d'attacco alla spalla e un aumento di pressione dalla spalla al bordo di fuga. Questo tipo di distribuzione della pressione è connesso con il fatto che le particelle fluide all'esterno dello strato limite sono rette dinamicamente da un equilibrio tra pressioni e forze d'inerzia. Ma in una corrente a Numero di Reynolds molto basso le forze d'inerzia sono praticamente trascurabili, e il moto del fluido è retto piuttosto da un equilibrio statico tra pressioni e forze di viscosità: la conseguente distribuzione delle pressioni sul corpo è completamente diversa da quella che si ha in un fluido non viscoso. In un fluido molto viscoso, a basso Numero di Reynolds, la pressione non soltanto diminuisce dal bordo d'attacco alla spalla, ma *continua a diminuire* dalla spalla al bordo di fuga. Questa pressione continuamente decrescente spinge indietro il fluido più lento che scorre vicino alla superficie del corpo; non vi è così inversione della corrente né, di conseguenza, distacco: lo si può vedere chiaramente dalla figura 86c.

Possiamo ora spiegare finalmente il paradosso per cui l'affusolamento accresce la resistenza, quando il Numero di Reynolds è molto basso. Poiché a Numeri di Reynolds molto bassi non v'è distacco, la forma aerodinamica non cambia molto la resistenza di pressione. L'affusolamento accresce invece considerevolmente la resistenza viscosa alla superficie (resistenza che è naturalmente abbastanza grande a Numeri di Reynolds molto bassi, a causa del carattere viscoso delle correnti), semplicemente per l'aumento della superficie su cui agiscono le sollecitazioni d'attrito. Così, poiché l'affusolamento accresce la superficie bagnata, la resistenza complessiva è di fatto maggiore nelle forme aerodinamiche, a Numeri di Reynolds molto bassi.

Perché un aumento di velocità riduce talvolta la resistenza.

Siamo ora quasi in grado di spiegare un altro paradosso descritto prima. Ricorderete che quando osservavamo la resistenza in una sfera leggermente ruvida, in un vento di velocità crescente, la resistenza dapprima aumentava, ma oltre una certa velocità cadeva, sebbene la velocità continuasse

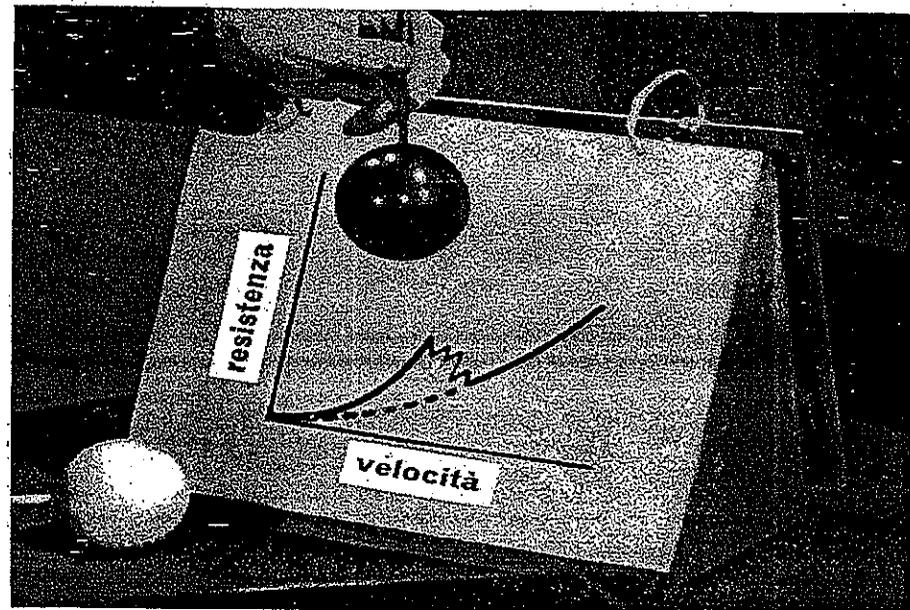


Fig. 87. Rappresentazione grafica dell'esperimento sulla relazione tra resistenza e velocità eseguito con una sfera nella galleria del vento.

ad aumentare; dopo di che la resistenza aumentava di nuovo al crescere della velocità. Il salto da un andamento regolare della curva resistenza-velocità a un nuovo andamento, regolare anch'esso, ma diverso (fig. 87) fa pensare che si tratti di due fenomeni di natura sostanzialmente diversa, e infatti è così: una delle due curve si riferisce allo strato limite laminare, mentre l'altra si riferisce allo strato limite turbolento.

La sfera è un oggetto ottuso, così che ad alto Numero di Reynolds la maggior parte della resistenza è resistenza di pressione. A velocità relativamente basse lo strato limite è laminare e il distacco dello strato limite avviene un pochino *a monte* del punto di massimo spessore della sfera; ciò provoca una scia distaccata molto ampia in cui la pressione è bassa: a questo è dovuta la resistenza di pressione relativamente alta. Se ora aumentiamo la velocità della corrente abbiamo pressappoco la stessa situazione che si presenta con l'acqua che esce da un rubinetto o con il getto di fumo che si muove nell'aria: lo strato limite diventa turbolento.

L'importanza di questa trasformazione, da strato limite laminare a strato limite turbolento, risulta dalla figura 88. L'acqua scorre da destra a sinistra in un canale attraverso una strozzatura seguita da una sezione divergente. Il grosso della corrente, essenzialmente non viscosa, genera una pressione relativamente bassa alla spalla della strozzatura e una pressione più alta a valle, proprio come nel caso del profilo alare. La distribuzione delle pressioni sulla parete divergente che segue la spalla è perciò tale da tendere a respingere a monte il fluido dello strato limite, dotato di scarsa energia, ed è così possibile che si producano lo stallo e il distacco. All'inizio il moto dello strato limite è laminare (fig. 88a) e la corrente principale si distacca infatti vicino alla spalla: a valle della spalla si crea una regione dove la corrente si

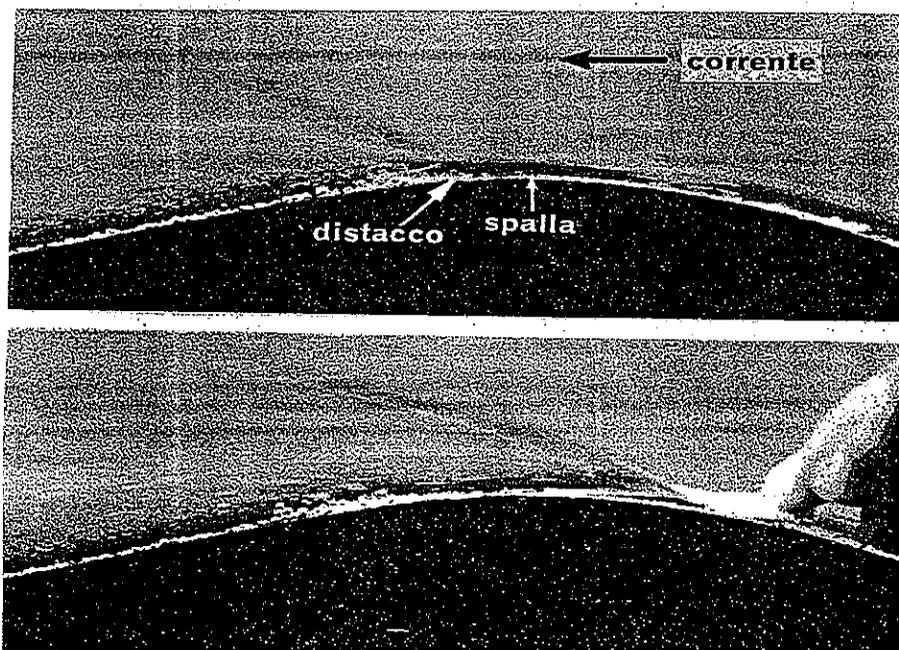


Fig. 88. Corrente d'acqua che fluisce da destra a sinistra in un canale. La regione nera è un confine solido di forma tale da produrre vicino alla spalla un aumento di velocità della corrente principale, seguito da una diminuzione di velocità nella sezione divergente. La pressione è minima alla spalla.

inverte e forma grandi vortici. La figura 88b mostra cosa accade quando un pezzettino di legno viene tenuto fermo nello strato limite laminare subito a monte della spalla: l'ostacolo agita il fluido dello strato limite e rende la corrente turbolenta. Lo strato limite turbolento resta attaccato alla parete per un tratto molto maggiore a valle della spalla, e l'area di distacco si riduce considerevolmente. Il motivo di questa modificazione nel comportamento è che, in confronto a quel che avviene nello strato limite laminare, nello strato limite turbolento c'è molto rimescolio. Questo rimescolio provoca uno scambio di quantità di moto grazie al quale il fluido dello strato limite a bassa velocità può, per così dire, prendere in prestito quantità di moto dal fluido ad alta velocità fuori dello strato limite: così, con l'aiuto dell'energia cinetica infusa in esso dalla corrente esterna, lo strato limite turbolento può scorrere contro un gradiente di pressione avverso più lungamente di quanto possa fare lo strato limite laminare.

L'effetto di trazione degli scambi di massa in una corrente turbolenta può essere spiegato per mezzo di un'analogia. Supponiamo che due binari corrano paralleli uno accanto all'altro: su ognuno c'è un treno, senza locomotiva, che procede senza incontrare attrito del suolo o resistenza dell'aria; si può prevedere che ognuno di questi treni vada avanti per sempre a velocità costante. Supponiamo ora che queste velocità siano diverse e che in ogni treno vi siano dei soldati che sparino pallottole di piombo da feritoie perpendicolari alla propria direzione di marcia. Le pallottole sparate dal treno A (quello che va più in fretta) penetrano nei bersagli in B (il treno che va più lentamente), da dove sono rimosse e sparate di nuovo contro bersagli in A. Il numero di palle sparate al secondo da A e da B è uguale, così che non v'è in totale alcuno scambio di massa. Ma il treno A rallenterà e il treno B accelererà: l'accelerazione e la decelerazione sono in pratica la conseguenza di uno scambio di quantità di moto, ma il risultato complessivo è equivalente a quello che si avrebbe in una situazione in cui A esercitasse una forza di trazione in avanti su B e B un'uguale forza frenante su A. Similmente gli scambi di massa e di quantità di moto nello strato limite turbolento hanno lo stesso effetto che si avrebbe se il fluido più veloce esercitasse una trazione in avanti sul fluido più lento.

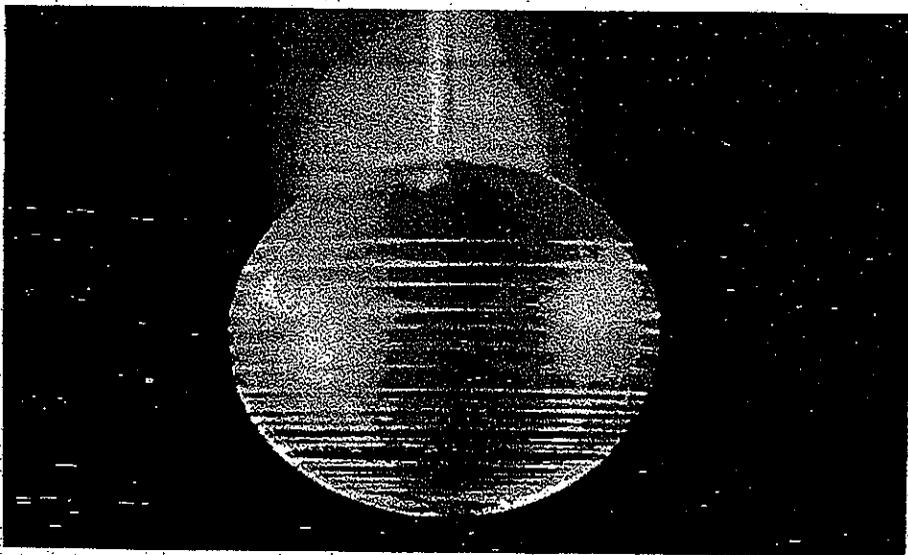


Fig. 89. Una corrente diretta verso l'alto fluisce intorno alla sfera; il fumo è prodotto da una goccia di tetracloruro di titanio posta sul bordo d'attacco (in basso).

Le fotografie della corrente di fumo della figura 89 mostrano come questa modificazione nel comportamento dello strato limite incida sulla corrente intorno alla sfera. A velocità basse lo strato limite è laminare, il distacco avviene presto e la scia è larga (fig. 89a). Man mano che la velocità aumenta il Numero di Reynolds diventa più grande, e corrispondentemente lo strato limite passa da laminare a turbolento. Lo strato limite turbolento può spingersi più lontano contro un gradiente di pressione avverso e resta perciò attaccato alla sfera molto oltre il punto di massimo spessore (fig. 89b). Questo fatto ha due conseguenze importanti: primo, la regione di pressione bassa sulla parte a valle della sfera è ora più sottile di prima; secondo, la pressione sulla parte a valle non è altrettanto bassa. Per entrambi questi motivi la resistenza di pressione diminuisce.

Ricordiamoci però che la resistenza che abbiamo effettivamente misurato nell'esperimento è la somma della resistenza di pressione e della resistenza viscosa e dobbiamo quindi prendere adesso in esame entrambe queste componenti, sia per il caso della corrente laminare sia per quello della corrente turbolenta. Nella figura 90 il rettangolo di sinistra rappresenta la resistenza complessiva per la corrente laminare. Con un oggetto ottuso come una sfera la maggior parte della resistenza in una corrente laminare è resistenza di pressione (P) e solo una piccola parte è resistenza viscosa (V), come appare dalla suddivisione del rettangolo nei riquadri P e V . Con uno strato limite turbolento la resistenza viscosa V è maggiore di quella che si ha con uno strato limite laminare: ma, come abbiamo visto, la resistenza di pressione P è notevolmente inferiore; e i valori di queste diverse resistenze sono tali che la resistenza complessiva, $P+V$, si riduce effettivamente di molto nel passaggio da uno strato laminare a uno strato turbolento. La caduta della resistenza visibile nella figura 87 è appunto il risultato di questo passaggio da una corrente laminare a una corrente turbolenta.

La resistenza complessiva di un oggetto ottuso è notevolmente minore quando una corrente è turbolenta che quando è laminare, così che se vogliamo mantenere piccola la resistenza cerchiamo di rendere turbolento lo strato limite. Con oggetti affusolati, invece, non vi è resistenza di pres-

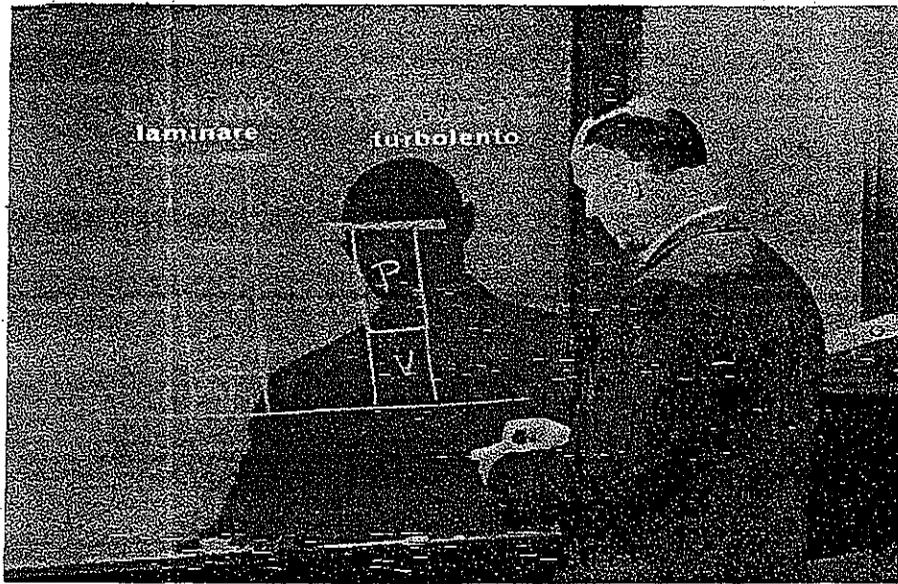


Fig. 90. Proporzioni relative della resistenza di pressione (P) e della resistenza d'attrito di superficie (V) per la corrente laminare e la corrente turbolenta intorno a un corpo di forma non aerodinamica a valori alti del Numero di Reynolds.

sione e la resistenza viscosa costituisce la resistenza totale. Se si vuole mantenere piccola la resistenza di un oggetto aerodinamico è importante mantenere laminare lo strato limite.

Intorno al 1940, in tutto il mondo si è cominciato a studiare attentamente la possibilità di costruire un profilo alare la cui forma permetta alla corrente di restare laminare su quasi tutta la sua lunghezza. Si è trovato che certe forme danno luogo a distribuzioni di pressione particolarmente favorevoli da questo punto di vista, e oggi sono comuni profili alari « a bassa resistenza » che vengono chiamati talvolta profili « a corrente laminare ». Tuttavia quando uno strato limite laminare si ispessisce diventa instabile ed estremamente sensibile alle più lievi perturbazioni che possono farlo degenerare in corrente turbolenta: perfino insetti minuscoli spiaccicati sopra un'ala possono compromettere gli intenti del progettista, e questo è uno dei problemi pratici di queste ali a bassa resistenza.

Perché la rugosità talvolta riduce la resistenza.

Tutti questi dati sul comportamento dello strato limite ci permettono ora di spiegare un altro paradosso che abbiamo incontrato nel secondo capitolo. Avevamo confrontato la resistenza di una sfera levigata con quella di una sfera leggermente ruvida, per velocità dell'aria esattamente uguali. A velocità bassa la sfera levigata incontrava minore resistenza, mentre a velocità elevata era la sfera ruvida che incontrava minore resistenza. Le due sfere sembrano quasi identiche ma è importante tener presente che perfino lo spessore di un capello è un ostacolo piuttosto grande per uno strato limite sottile appena come carta velina (fig. 91). Così anche una lievissima rugosità può far diventare turbolento lo strato limite prima di quanto avrebbe fatto altrimenti.

Alle velocità più basse prodotte in questo esperimento lo

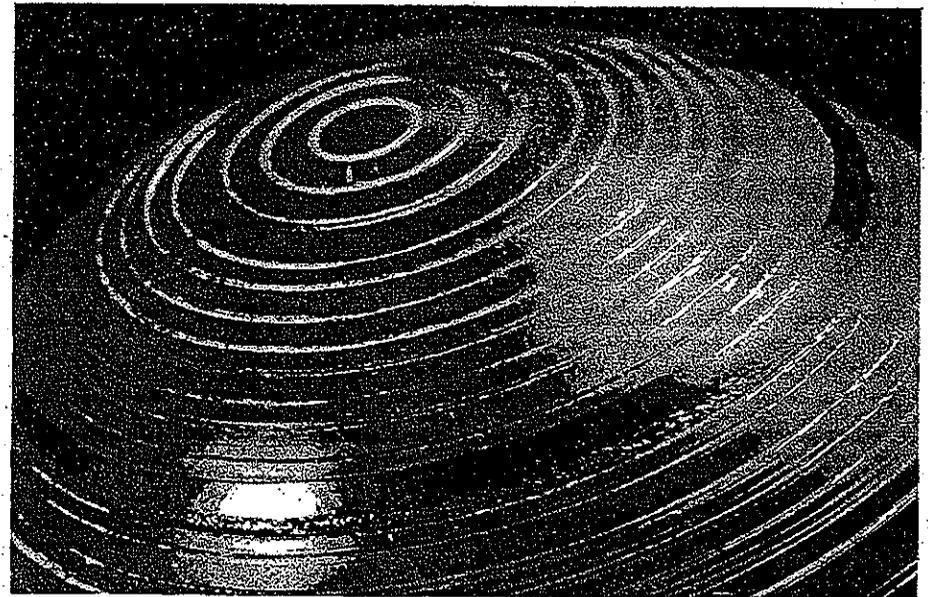


Fig. 91. Le lievi scalfitture e il sottile nastro adesivo, sulla superficie della sfera equivalgono a montagne per lo strato limite, così come la superficie terrestre è accidentata per l'uomo, anche se vista a grande distanza apparirebbe levigata quanto questa sfera.

strato limite era laminare per entrambe le sfere: di conseguenza il punto di distacco era pressappoco lo stesso per entrambe e tutte e due avevano all'incirca la stessa resistenza di pressione. Ma la rugosità aumenta la resistenza d'attrito, perciò la resistenza totale era un po' più alta per la sfera ruvida che per quella levigata.

Che accadeva quando aumentavamo la velocità dell'aria? Lo

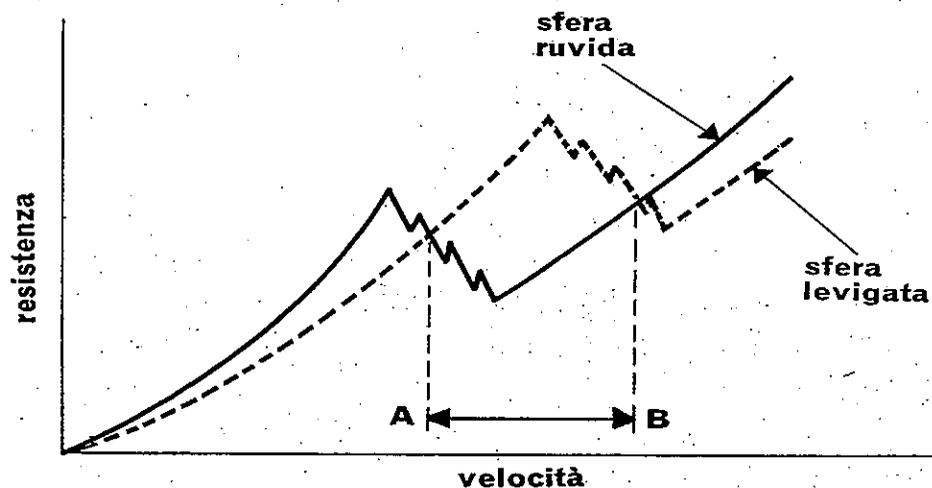


Fig. 92. Per valori della velocità compresi tra A e B la sfera ruvida offre minore resistenza di quella levigata.

strato limite diventava turbolento per la sfera ruvida prima che per quella levigata. Come abbiamo visto, uno strato limite turbolento resta attaccato più a lungo e produce una scia più piccola, quindi la resistenza di pressione della sfera ruvida era notevolmente ridotta dalla presenza della rugosità: era infatti tanto ridotta che a questo punto la sfera ruvida offriva minore resistenza. A certe velocità la resistenza di una sfera ruvida è soltanto un quinto circa della resistenza di una sfera levigata. Questo è riassunto nel grafico della figura 92.

Agli albori del gioco del golf si usavano palle levigate; oggi sono martellate, in modo da avere sulla superficie delle piccole fossette. La figura 93 mostra un esperimento eseguito

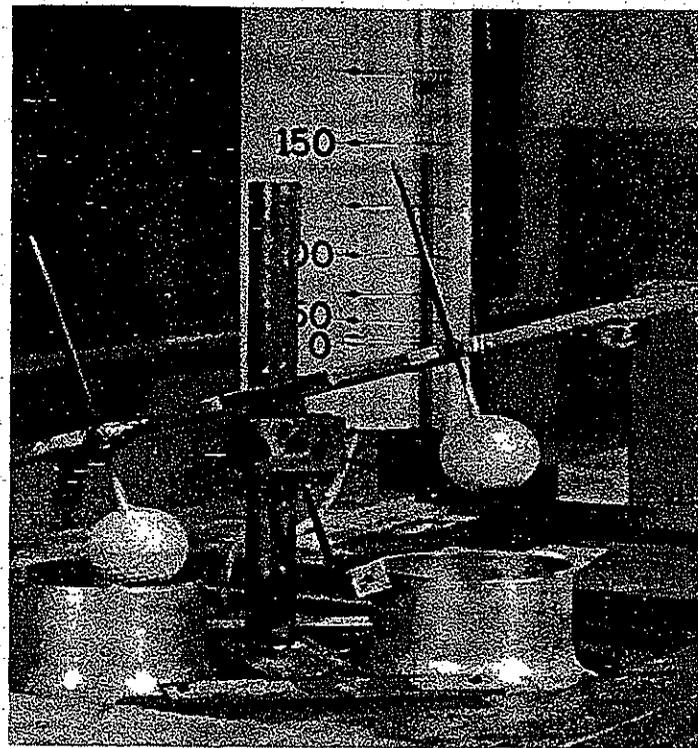


Fig. 93. L'esperimento che confronta le resistenze mostra che una palla da golf martellata (a sinistra) offre minore resistenza di una levigata (a destra).

alla galleria del vento servendosi di una bilancia a bracci uguali: in esso vengono confrontate la resistenza di un modello in scala di palla da golf martellata con la resistenza di una palla levigata avente esattamente uguale diametro. Per tutte le velocità a cui professionisti e dilettanti lanciano la palla dal tee* (confrontate in base al criterio del Numero di Reynolds) la palla martellata offre meno resistenza. La sfaccettatura delle palle da golf è il risultato finale di una serie di osservazioni che ebbe inizio quando ci si accorse per

* Tee: nel gioco del golf supporto sul quale si pone la palla per il tiro iniziale (N.d.T.).

caso che le palle levigate andavano piú lontano quando erano state corrose dall'uso. Esperimenti eseguiti su un percorso di golf mostrano che, con lo stesso *swing* * che fa fare alla palla martellata un volo di 200 metri, una palla levigata fa solamente un volo di 45 metri circa. Che colpo avrebbe fatto nel mondo dello sport chi un tempo avesse conosciuto questi aspetti della dinamica dei fluidi e avesse avuto la trovata di applicarli al golf!

La ricchezza di fenomeni che si incontra nella dinamica dei fluidi sembra inesauribile, con le sue molteplici applicazioni alla meccanica, all'edilizia e all'agricoltura, al volo, all'oceanografia, alla meteorologia e all'astrodinamica, alla magneto-idrodinamica e ai processi vitali.

* *Swing*: nel gioco del golf è il movimento ondulatorio che il giocatore fa compiere alla mazza prima di assestare il colpo (N.d.T.).

Indice analitico

- Accelerazione, 59-60
 Aeroplani, 91, 133
 ali e Numero di Reynolds, 102
 Affusolamento, 28, 113, 130
 Angolo di incidenza, 131-133
 Aria, 15, 17
 rarefatta, 73
 resistenza, 30
 viscosità, 28, 71
 Assenza di scorrimento, 46
 Atterraggio « di piatto », 133
 Attrito, 68-69
 Automobili, 88
- Batteri, 74
- Catrame, 70
 Coefficiente di resistenza, 91
 Comportamento viscoso, 74
 Curva velocità-resistenza, 21, 24
- Densità, 35, 57
 di un fluido, effetti, 79
 Dinamica dei fluidi, 11, 16
- Equazione di moto, 44, 54
 Equilibrio
 delle forze, 54
 statico, 41-42
- Fluido: (cfr. anche Densità)
 continuo, 35
 leggermente viscoso,
 sfera levigata, 28
 molto viscoso, 29
 non viscoso, 125
- Flusso
 laminare, 106
 turbolento, 106
- Forme aerodinamiche, 29, 137
 (cfr. anche Affusolamento)
- Forze
 di massa (o di campo), 37-38
 di superficie, 37, 38
 di taglio, 38
 di viscosità, 46
 normali, 40
- Galleria del vento, 18
 Glicerina, 28, 30, 47, 71, 77, 96,
 111, 140
 Gradiente di pressione, 41-42
 Gravità, 38
- Inerzia, 35
 forza, 54
- Inversione della corrente, 129,
 133, 137
 Ipersostentatori, 133
- Legge
 del moto di Newton, 52-56
 di resistenza di Stokes, 75
- Manometro a U, 43
 Materiali molto viscosi, 70-71
- Newton, Isaac, 15, 30-31
 equazione del moto, 44, 54
 Numero di Reynolds, 59, 64
 alto, 64-68, 85
 basso, 64-68, 70
- Oggetti ottusi, 130
- Palle da golf, 150-151
 Paracadute, 113
 Paradossi
 esperimenti, 18-34
 spiegazione, 140-152
 Paradosso di d'Alambert, 125

- Parallelogramma delle forze, 53
 Particelle (*ctr.* Particelle fluide)
 Particelle fluide, 36
 Pesci, 89, 110, 138
 Plancton, 89
 Polvere, 74
 Prima legge del moto di Newton,
 30
 Pressione, 40, 68-69
 distribuzione di, 126
 gradiente di, 41-42
 avverso, 127-129
 resistenza di, 69
 Principio
 di Archimede, 42
 di Bernoulli, 121-125
 Profilo alare, 113, 115
 Prove su modelli, 64, 106
 Punto di arresto, 123

 Quantità di moto, 36

 Resistenza
 del mezzo, 11, 16
 di attrito, 68, 69
 diretta viscosa, 68
 d'onda, 17
 indotta, dovuta alla portanza,
 17
 inerziale all'accelerazione, 35-
 36
 Numero di Reynolds alto, 85
 basso, 75
 onda supersonica, 17
 pressione, 69
 Ribattini, 102

 Sfera, 20
 leggermente rugosa, 24
 levigata, 24
 Similitudine dinamica, 56, 61, 90
 Sollecitazioni
 normali, 40
 tangenziali, 37, 45
 viscose tangenziali, 70, 72
 Spalla, 66-67, 68-69
 Spinta di Archimede, 42
 Stallo, 126
 Strato limite, 94
 distacco, 127
 formazione, 96-97
 laminare, 143
 sviluppo, 98, 99
 turbolento, 143
 visualizzazione, 133
 Superfici
 aerodinamicamente levigate,
 105
 aerodinamicamente ruvide, 105

 Tetracloruro di titanio, 133
 Trasformazione di Galileo, 17
 Trota, 139

 Velocità
 critica, 21
 dei fluidi, 36
 della corrente libera, 124
 distribuzione, 123
 media, 36
 terminale, 30
 Vettore accelerazione, 54
 Viscosimetro, 51
 Viscosità, 45, 46
 Vortici di uscita, 17

*Finito di stampare il 30 aprile 1968
 in Torino presso la Stamperia Artistica Nazionale*