

in cui

$$\overline{\tau_w} = \frac{1}{L} \int_0^L \tau_w(x) dx = 0.332 \rho V^2 \left[\frac{V}{\sqrt{V}} \frac{1}{L} \int_0^L \frac{dx}{\sqrt{x}} \right] = 0.664 \rho V^2 Re_L^{-1/2} = 2\tau_w(L),$$

dove $Re_L = VL/\nu$. Dunque, possiamo definire un fattore di attrito medio,

$$\overline{f} = \frac{\overline{\tau_w}}{\frac{1}{2} \rho V^2} = \frac{1.328}{Re_L^{1/2}} = 2f(L), \quad (7.2.15)$$

che mostra che l'attrito, ovviamente, non diverge.

7.3 Distacco dello strato limite

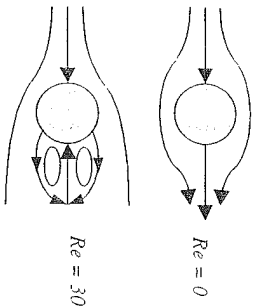


Figura 7.3.1

linee (due punti nel caso bidimensionale della figura). A valle di questi punti, detti punti di scollamento⁴, c'è una regione in cui il flusso è invertito, cioè va da destra a sinistra, creando

dunque una coppia di vortici (detti vortici di von Karman), che in questo caso sono stazionari e ruotano in senso opposto tra loro. Quando $Re > 44$, i due vortici cessano di stare fermi e cominciano a distaccarsi, prima l'uno e poi l'altro, per poi riformarsi e crescere, periodicamente nel tempo, creando una scia a valle del cilindro. Dalle simulazioni numeriche si è visto che la frequenza $\nu = l/\tau$ con cui questi vortici si distaccano dal cilindro è tale che il numero di Strouhal, $St = \nu l/D$, è circa uguale a 0.3, dove l e ν indicano la lunghezza tipica dell'oggetto (il diametro del cilindro, in questo caso) e la velocità imperturbata, rispettivamente. Nella figura 7.3.2 vediamo la forma della scia dovuta al distacco periodico dei vortici suddetti dalla parte posteriore di un cilindro circolare immerso in un flusso di olio molto viscoso, per $Re=73$.



Figura 7.3.2

Quando il numero di Reynolds è molto elevato, la formazione di vortici comporta il distacco dello strato limite. Questo fenomeno è di enorme importanza, perché nella regione a valle del punto di scollamento diminuiscono grandemente sia la pressione che lo sforzo di taglio, con relativa variazione delle forze di resistenza e della portanza. Ad esempio, nelle fotografie di figura 7.3.3 (fatte da Prandtl nel 1930), vediamo il profilo dell'ala di un aereo lambito da un flusso d'aria proveniente da destra. Il profilo alare è allungato e di forma tale che, in condizioni "normali" (cioè quando l'angolo di incidenza del fluido si mantiene entro certi limiti, come nella figura di sinistra), lo strato limite non si distacca. Quando l'angolo eccede tali valori massimi, tuttavia, avviene lo scollamento dello strato limite; ad esempio, nella foto di destra della figura 7.3.3, lo strato limite si distacca dalla parte superiore dell'ala, causando una situazione, cosiddetta, di stallo, caratterizzata da un forte aumento della resistenza che causa un rallentamento dell'aereo e, alla fine, una diminuzione della portanza (con relativa caduta dell'aereo). Simili considerazioni valgono anche per spiegare la resistenza e l'aderenza a terra delle autovetture.

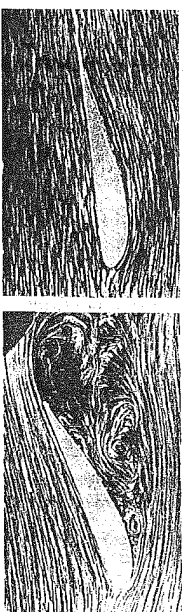


Figura 7.3.3

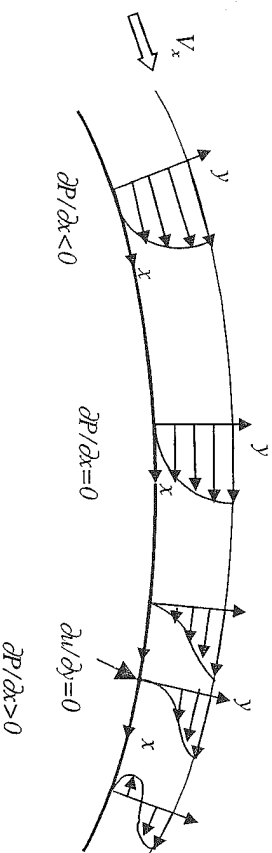


Figura 7.3.4

Il distacco dello strato limite è descritto in figura 7.3.4, in cui si descrive il profilo di velocità nello strato limite alla superficie di un corpo investito da un flusso laminare (il caso turbolento è del tutto analogo). Nella parte anteriore del corpo (a sinistra in figura), la velocità imperturbata V cresce lungo la coordinata longitudinale x , con $V_x(dV_x/dx) > 0$ e dunque dalla (7.1.5) vediamo che $\partial p/\partial x < 0$. Ciò comporta che nello strato limite il profilo di velocità risulta del tipo (6.1.3), cioè uguale alla somma di un profilo di tipo Couette, dovuto al fatto che la velocità all'estremità superiore dello strato limite è uguale a V_x e di uno di tipo Poiseuille, dovuto al gradiente di pressione negativo. Nella parte posteriore (a destra in figura), invece, la velocità imperturbata decresce e dunque si viene a generare un gradiente di pressione invertito $\partial p/\partial x > 0$, per cui il profilo di velocità risulta uguale alla differenza tra un profilo Couette e uno Poiseuille, con conseguente decelerazione del fluido. Ad un certo punto, quando nel punto di scollamento il gradiente di velocità alla parete si annulla, viene a mancare l'aderenza (lo sforzo di taglio è uguale a zero) e lo strato limite si distacca. Più avanti, con gradienti di velocità alla parete negativi, il flusso si inverte, con relativa formazione di vortici del tipo di quelli di figura 7.3.1.

⁴ In inglese si dicono "separation points". Qui abbiamo preferito la dizione francese, "décollement", scollamento, appunto, perché più chiara.