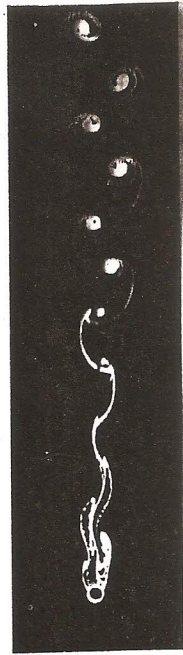


R = 73



R = 102



R = 161



R = 32



R = 55



R = 65

Figure 4.12.6. Streak lines in the wake behind a circular cylinder in a stream of oil. (From Homann 1936a.)

19



R = 9.15



R = 17.9



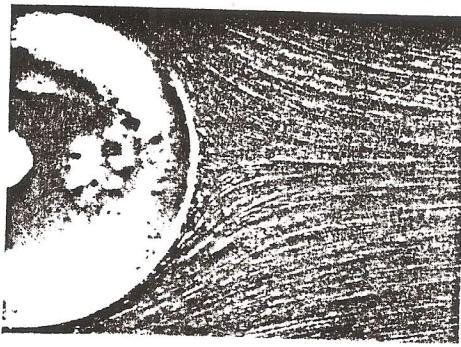
R = 25.5



R = 26.8

Fi

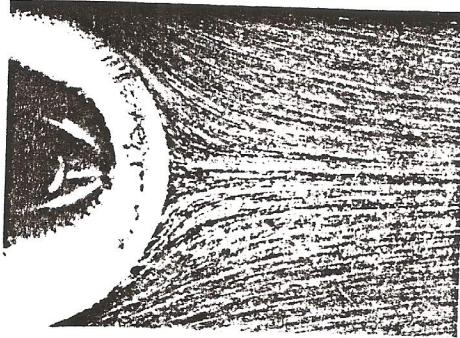




$R = 9.15$



$R = 37.7$



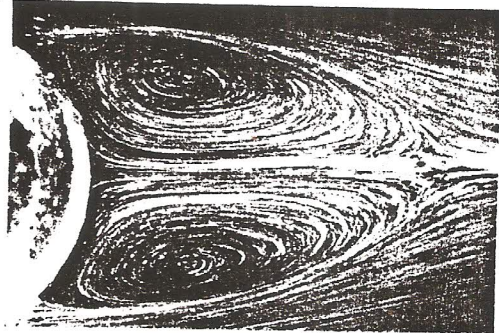
$R = 17.9$



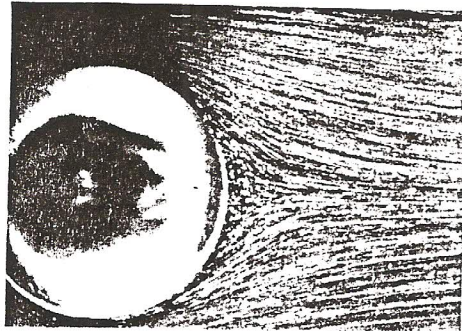
$R = 73.6$



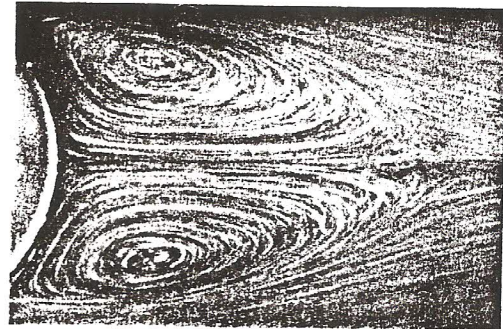
$R = 25.5$



$R = 118$

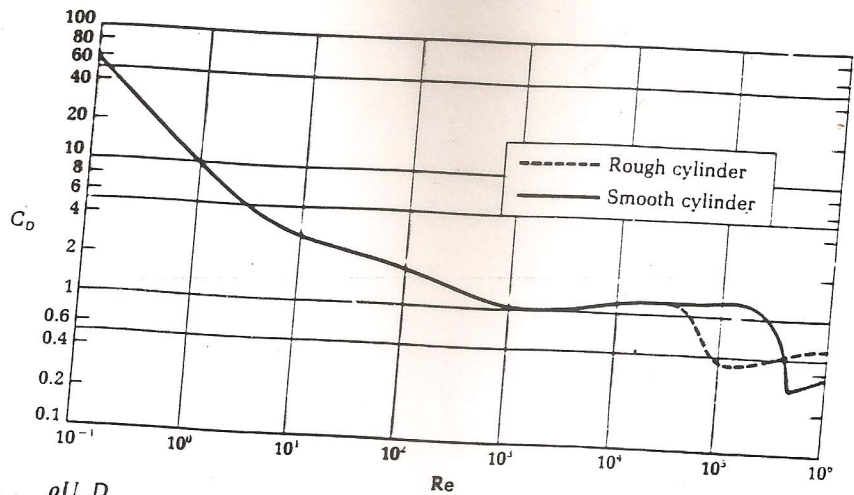


$R = 26.8$



$R = 133$





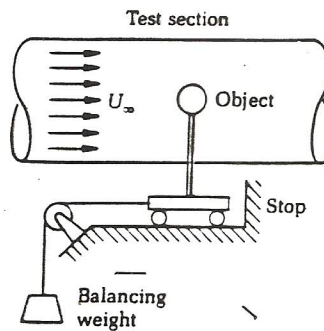
**FIGURE 6.12**  
 Drag coefficient as a function of Reynolds number for long circular cylinders. (Adapted from *Boundary Layer Theory* (7th ed.), by H. Schlichting. Copyright © 1979 by McGraw-Hill, Inc. Reprinted by permission.)

$$Re = \frac{\rho U_\infty D}{\mu}$$

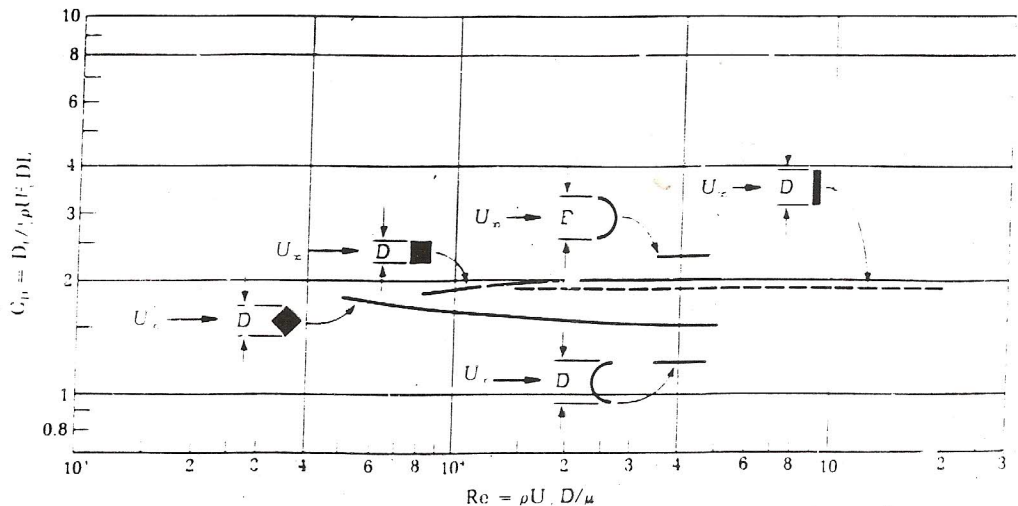
$\rho$  = density of fluid ( $M/L^3$ )  
 $U_\infty$  = free-stream fluid velocity ( $L/T$ )  
 $D$  = diameter of cylinder ( $L$ )  
 $\mu$  = viscosity of fluid ( $T/L^2$ )

$$C_D = \frac{D_f}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 A}$$

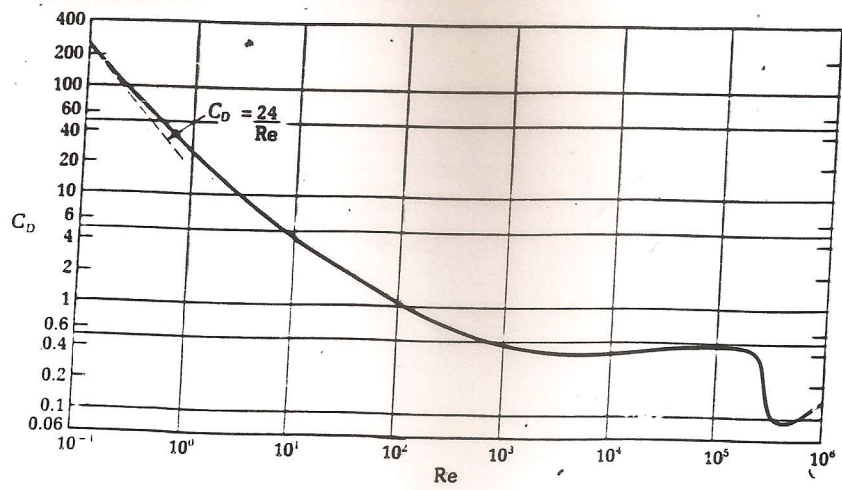
$D_f$  = drag force exerted on cylinder ( $F$ )  
 $A$  = projected frontal area (cylinder diameter  $\times$  length) ( $L^2$ )



**FIGURE 6.13**  
 An experimental setup for measuring drag on an object immersed in a uniform flow of velocity  $U_\infty$ .



**FIGURE 6.14**  
 Drag coefficient of various two-dimensional bodies. (Data from several sources; see references at end of text.)



**FIGURE 6.15**  
 Drag coefficient as a function of Reynolds number for spheres. (Adapted from *Boundary Layer Theory* (7th ed.), by H. Schlichting. Copyright ©1979 by McGraw-Hill, Inc. Reprinted by permission.)

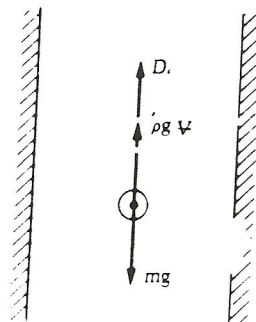
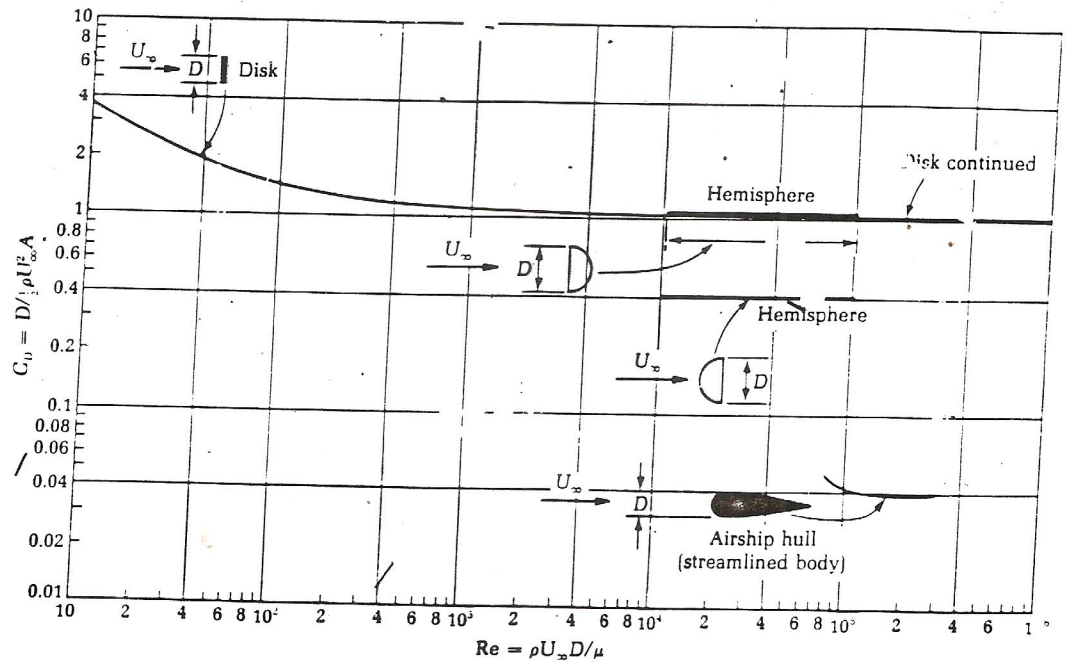
$$Re = \frac{\rho U_\infty D}{\mu}$$

$\rho$  = density of fluid ( $M/L^3$ )  
 $U_\infty$  = free-stream fluid velocity ( $L/T$ )  
 $D$  = diameter of sphere ( $L$ )  
 $\mu$  = viscosity of fluid ( $F \cdot T/L^2$ )

$$C_D = \frac{D_f}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 A}$$

$D_f$  = drag force exerted on sphere ( $F$ )  
 $A$  = projected frontal area ( $L^2$ )

**FIGURE 6.16**  
 Drag coefficient versus Reynolds number for various three-dimensional bodies. (Data from various sources; see references at end of text.)



**FIGURE 6.17**  
 Forces acting on a sphere falling at terminal velocity in a fluid.



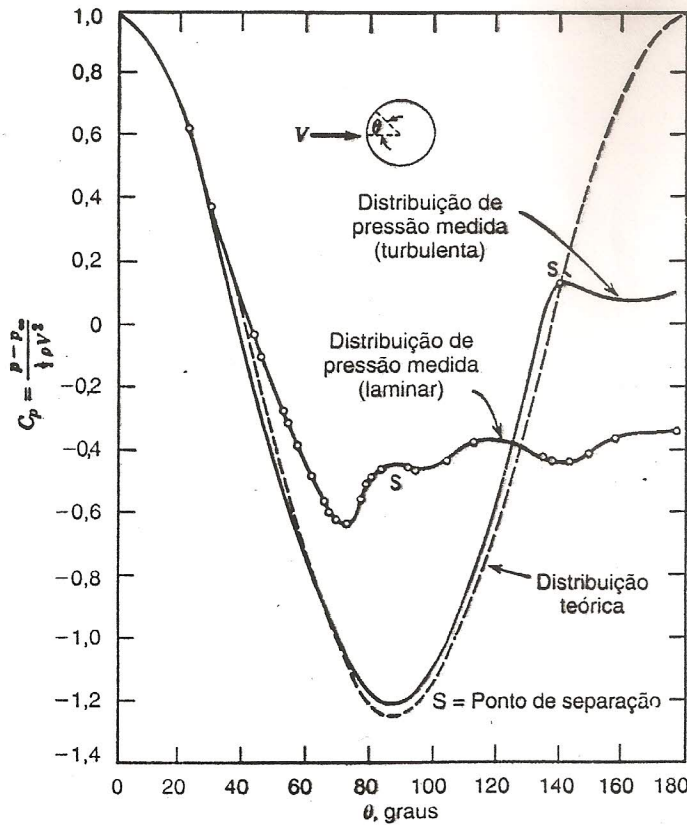


Fig. 9.12 Distribuição de pressão em volta de uma esfera lisa para escoamentos em camada-limite laminar e turbulento, comparada com o escoamento não-viscoso [16].

A transição na camada-limite é afetada pela rugosidade da superfície da esfera e pela turbulência na corrente de fluxo. Portanto, a redução de arrasto associada a uma camada-limite turbulenta não ocorre a um valor único do número de Reynolds. Experiências com esferas lisas num escoamento com baixo nível de turbulência mostram que a transição pode ser retardada para um número de Reynolds crítico,  $Re_D$ , próxima de  $4 \times 10^5$ . Para superfícies rugosas e/ou escoamento de corrente livre altamente turbulento, a transição pode ocorrer a um número de Reynolds crítico tão baixo quanto 50.000.

O coeficiente de arrasto de uma esfera com escoamento turbulento em camada-limite é cerca de cinco vezes inferior àquele para escoamento laminar perto do número de Reynolds crítico. A correspondente redução da força de arrasto pode afetar apreciavelmente a distância percorrida por uma esfera (p. ex., uma bola de golfe). As "mossas" numa bola de golfe têm a finalidade de "disparar" ou desencadear a camada-limite e, assim, garantir escoamento de camada-limite turbulento e arrasto mínimo. Para ilustrar esse efeito de modo gráfico, obtivemos amostras de bolas de golfe sem mossas há alguns anos. Um dos nossos alunos foi voluntário para dar algumas tacadas nas bolas lisas. Em 50 tentativas com cada tipo, a distância média com as bolas-padrão era 215 jardas; a média com as bolas lisas era de apenas 125 jardas!

O acréscimo de elementos de rugosidade a uma esfera também pode suprimir as oscilações locais da transição entre o escoamento laminar e turbulento na camada-limite. Essas oscilações podem conduzir a variações de arrasto e a flutuações aleatórias de sustentação (veja a Seção 9.8). No beisebol, o lançamento chamado "knuckle ball" é feito com a intenção de confundir o rebatedor pela trajetória errática da bola. Arremessando-a quase sem rotação, o lançador espera que as costuras da bola provoquem a transição de maneira imprevisível, à medida que ela se aproxima do rebatedor. Isto causa a desejada variação de trajetória.

A Fig. 9.13 mostra o coeficiente de arrasto para escoamento sobre um cilindro liso. A variação de  $C_D$  com o número de Reynolds apresenta as mesmas características observadas no caso de uma esfera lisa, mas os seus valores são cerca de duas vezes maiores.

O escoamento em torno de um cilindro circular liso pode desenvolver uma configuração regular de vórtices alternados, jusante. A trilha de vórtices provoca uma força de sustentação oscilante sobre o cilindro, perpendicular ao movimento da corrente. A geração de vórtices excita oscilações que causam o "cantar" das linhas telegráficas e as batidas irritantes das adriças nos mastros de bandeiras. Algumas vezes as oscilações estruturais podem atingir magnitudes perigosas, acarretando elevadas tensões; elas po-

nold  
número  
rugoso  
zido  
EXE  
Uma  
férica  
do à

PRC

D.

D.

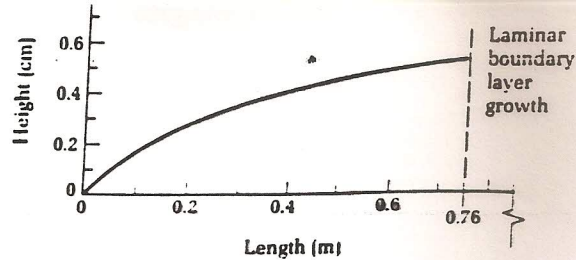
S.

O.

Un  
ch.

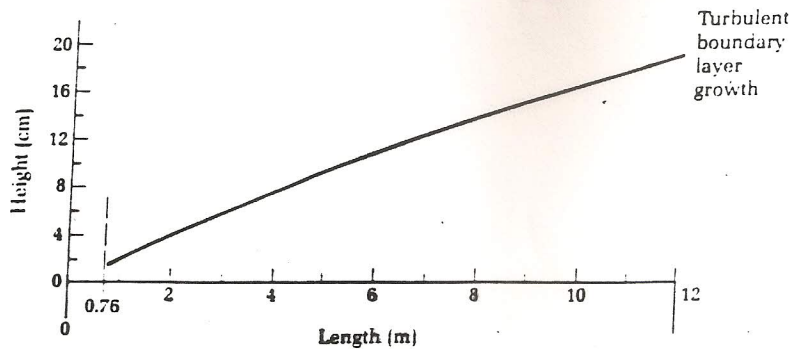
23

**FIGURE 6.4(a)**  
Plot of laminar boundary-layer growth on the plate of Example 6.1.



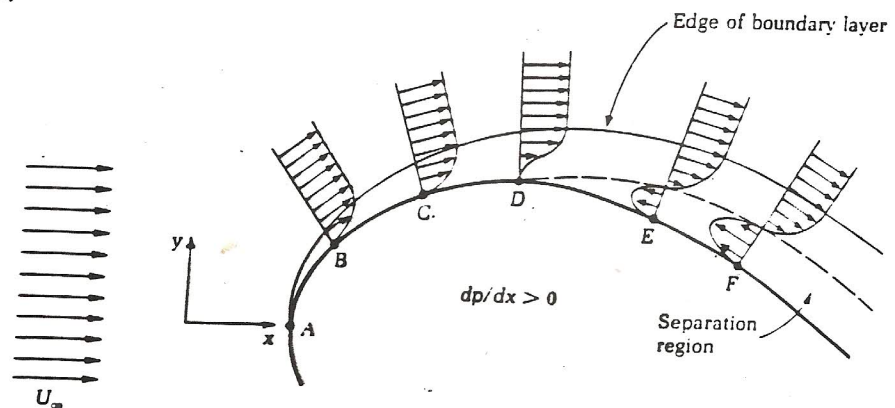
(a)

**FIGURE 6.4(b)**  
Plot of turbulent boundary-layer growth on the plate of Example 6.1.

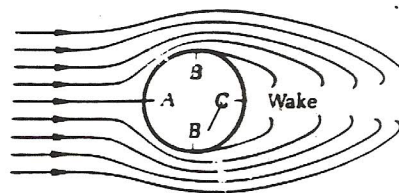


(b)

**FIGURE 6.5**  
Flow past a curved surface.

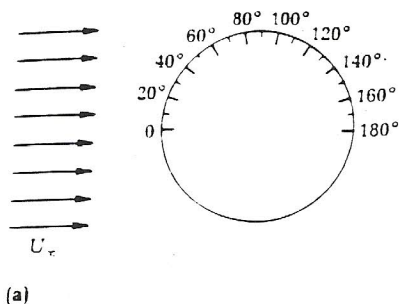


**FIGURE 6.6**  
Uniform flow past an infinitely long cylinder.

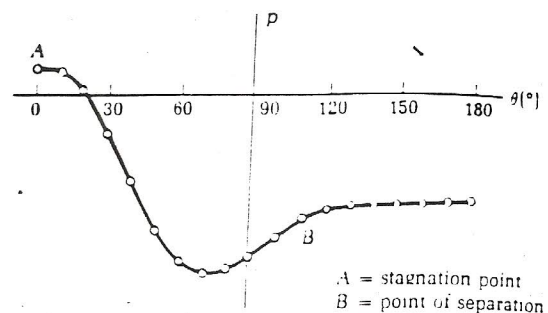


A = stagnation point  
B = point of separation

**FIGURE 6.7**  
An experimental arrangement to determine pressure distribution on the surface of a cylinder immersed in a uniform flow.  
(a) Each pressure tap is connected to a manometer. (b) Representative results.



(a)



(b)

A = stagnation point  
B = point of separation