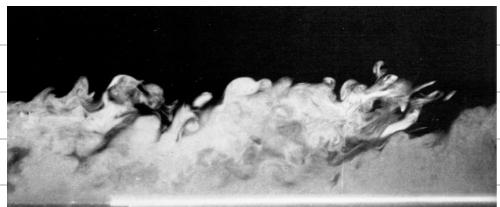
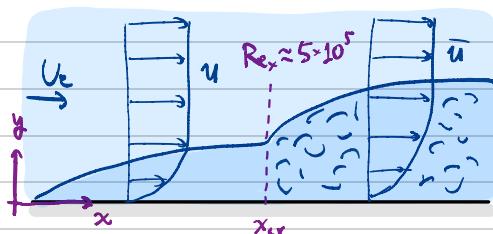


## Capa límite turbulenta



Al aumentar el número de Reynolds, eventualmente, todo flujo se vuelve turbulento. Más adelante profundizaremos en una definición más precisa de la turbulencia, pero por ahora lo importante es que el flujo se vuelve impermanente y exhibe un movimiento caótico que promueve el mezclado y afecta drásticamente el transporte de momenstum.

Cuando el flujo es turbulento, el borde instantáneo de la capa límite varía continuamente en el tiempo y se vuelve corrugado e inconstante. Por esto, generalmente se prefiere trabajar con cantidades promediadas en el tiempo.

La transición a la turbulencia es un proceso gradual que, en una capa límite, puede ocurrir desde  $Reynolds$  mayores a  $Re_x > 1 \times 10^5$ . Sin embargo, el valor exacto depende de muchos factores como la rugosidad de la superficie, vibraciones, perturbaciones en el flujo libre y la historia del gradiente de presión. Para cálculos de ingeniería se suele usar  $Re_x > 5 \times 10^5$  como un umbral establecido para el cambio de régimen.

$$\Rightarrow x_{cr}/l_h = 5 \times 10^5 / Re_x$$

No existen soluciones analíticas para la distribución de velocidad en una capa límite turbulenta, por lo que debemos recurrir a experimentos. El perfil de velocidad promedio se puede aproximar mediante una ley de potencias

$$\frac{\bar{u}}{U_\infty} \approx \left(\frac{y}{\delta}\right)^{1/n},$$

donde el exponente  $n$  varía con el número de Reynolds. Para un  $Re_x \approx 5 \times 10^5$  usamos  $n = 7$ , y para Reynolds mayores puede aumentar hasta  $n = 9$ .

De mediciones experimentales para una placa plana con cero gradiente de presión, tenemos los siguientes resultados

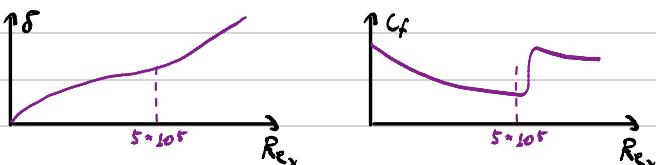
Coefficiente de fricción  $C_f = \frac{2 T_w}{\rho U_\infty^2} = 0.0592 (Re_x)^{-1/5}$

Coefficiente de arresto  $C_D = \frac{2 D}{\rho U_\infty^2 A} = 0.0074 (Re_x)^{-1/5}$

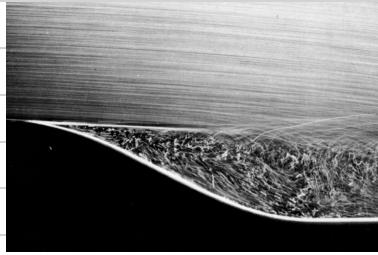
Espesor 99%  $\delta = 0.37 (Re_x)^{-1/5}$

Estas expresiones se ajustan razonablemente bien a los datos experimentales en el rango  $5 \times 10^5 < Re_x < 10^7$  para placas donde el flujo es predominantemente turbulento, esto es  $x_{ur}/L < 0.2$ .

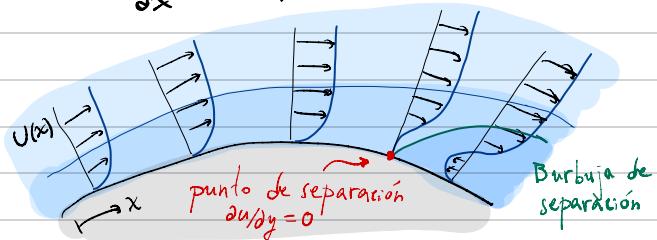
Las curvas típicas de  $\delta$ ,  $C_f$  vs  $x$  son de la forma



# Separación y turbulencia

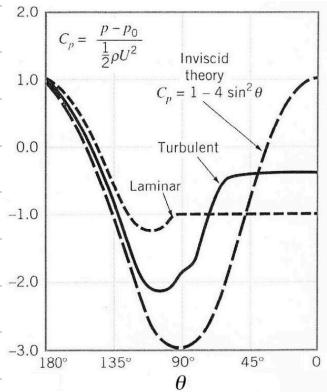
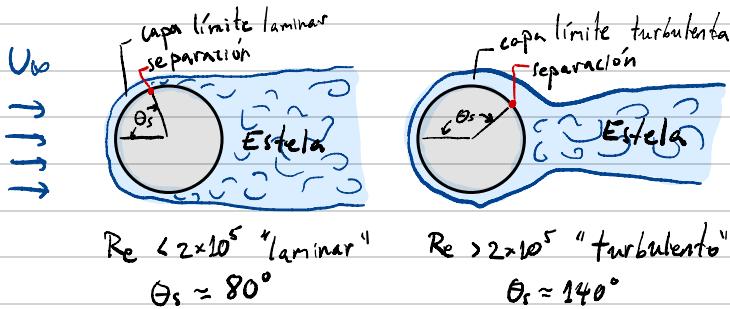


$$\frac{dp}{dx} > 0 \text{ persistente}$$



La separación de la capa límite juega un rol muy importante en las cargas aerodinámicas y en la transferencia de calor y masa.

Por ejemplo, en el flujo sobre un cilindro



La transición a la turbulencia de la capa límite retrasa la separación.

En un cuerpo romo (bluff body), el punto de separación es determinado por la geometría y se genera una presión de succión en la estela que induce arrastre aerodinámico (pressure drag)

Esta contribución suele dominar sobre el arrastre viscoso.



La rugosidad de la superficie juega un papel importante en la transición a la turbulencia y en ocasiones se aprovecha para "tropezar" la capa límite, forzando la transición para retardar o incluso suprimir la separación del flujo.

