SEPARACIÓN DE LA CAPA LIMITE

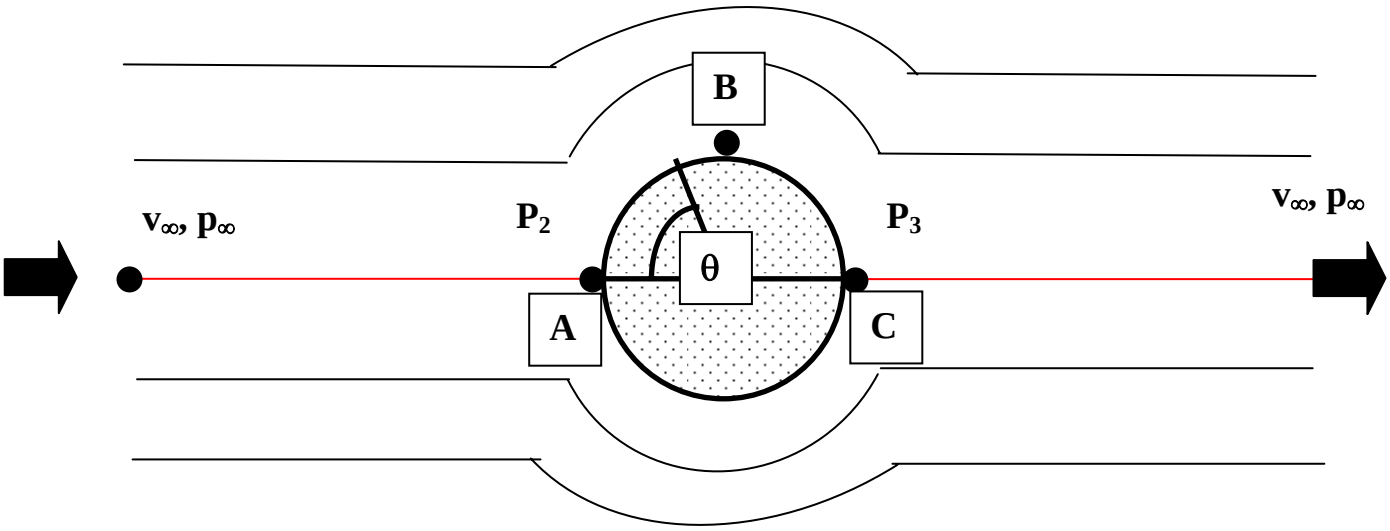
-Al analizar el flujo reptante alrededor de una esfera vimos que el arrastre tiene dos contribuciones: el arrastre de forma y la fricción de piel.

-La fricción de piel siempre estará presente ya que todos los fluidos tienen una cierta viscosidad y la única manera de reducirla es disminuir la superficie mojada del sólido.

-En cambio, el arrastre de forma depende fuertemente de la forma del sólido y puede disminuirse sustancialmente cambiándola.

-Para entender la influencia de la forma sobre el arrastre es necesario analizar el fenómeno de la separación de la capa límite.

-Para ello consideremos el flujo de un fluido alrededor de un cilindro:



-Analicemos un elemento de volumen que circula en una línea de corriente cercana al cilindro.

-En la interfase fluido-sólido se formará una capa límite análoga a la analizada en la placa plana. Fuera de la capa límite debe existir la distribución de presión de un flujo inviscido: una distribución simétrica con valores máximos en "A" y "C" y mínimo en "B".

-De acuerdo con el modelo de la capa límite dentro de ésta existirá la misma distribución de presión.

-Para $0^0<\theta<90^0$ el elemento de volumen que circula dentro de la capa límite, muy próximo al sólido, tiene las fuerzas viscosas en contra y las de presión favorables. En consecuencia alcanza el punto "B" acelerándose.

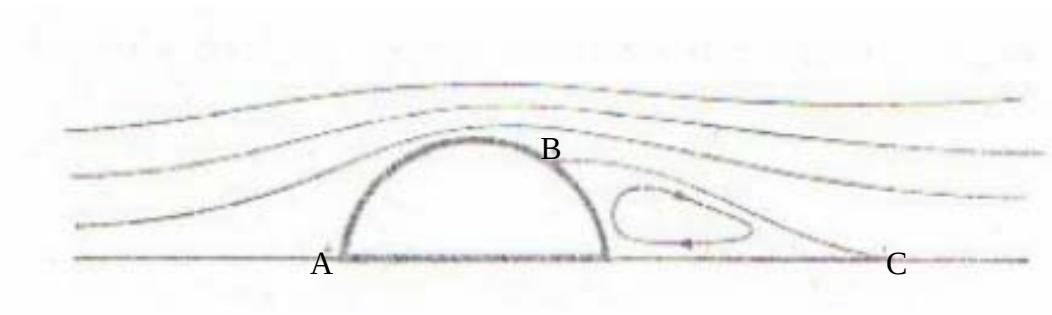
-Para $90^0<\theta<180^0$ este elemento de volumen tiene las fuerzas viscosas y las de presión en contra. En consecuencia se desacelera.

-En cambio el elemento de volumen que está mas cerca del borde externo de la capa límite sólo necesita vencer el gradiente de presión adverso, pues el efecto del roce es mucho menor.

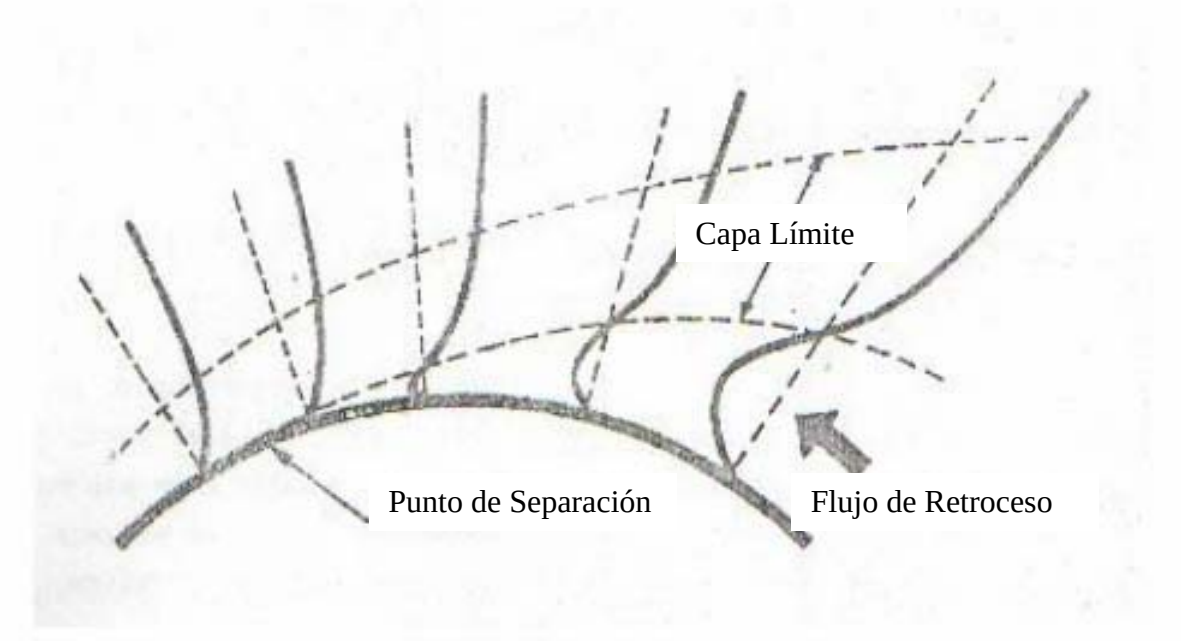
-En consecuencia, los elementos de volumen mas cercanos a la pared se desaceleran mas rápidamente, pudiendo ser forzados a retroceder por el gradiente adverso de presión.

-En el punto en el cual ocurre este flujo inverso por primera vez la pendiente del perfil de velocidad en la pared del sólido es cero. Este punto se denomina punto de separación de la capa límite.

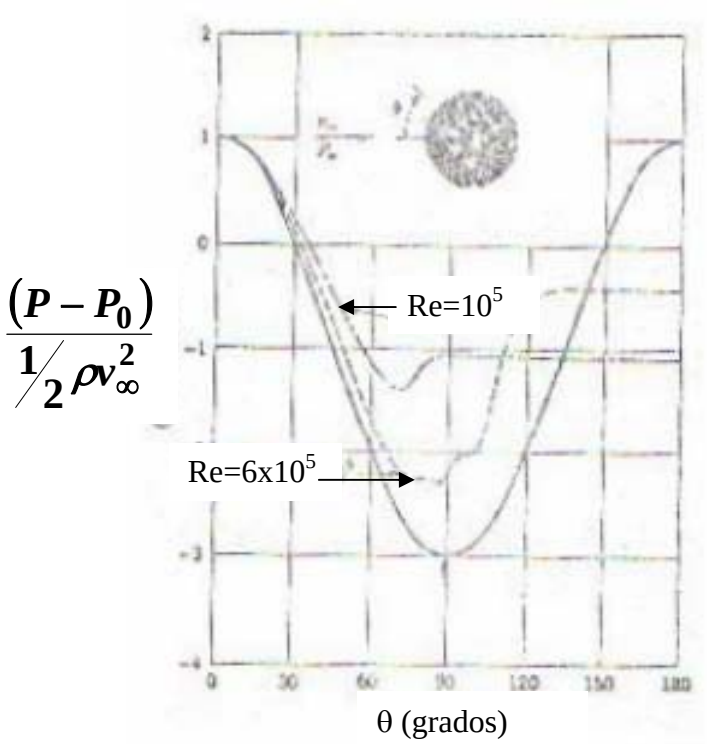
-La presión del punto de estancamiento "A" recién se recupera en "C".



-Como en el punto "C" la presión es mayor que en "B" y el elemento de volumen no posee inercia para vencer este gradiente de presión adverso se genera un flujo de retroceso hacia el punto "B".



-La separación de capa límite origina torbellinos en la parte posterior del objeto.



-El desprendimiento de la capa límite es un fenómeno no deseado desde el punto de vista del arrastre, ya que detrás del cilindro aparece una zona de menor presión que en el punto de estancamiento "A" aumentando el arrastre.

-Cuando la velocidad de circulación del fluido v_∞ aumenta (lo que implica un aumento en el número de Re) el punto de separación de la capa límite se desplaza hacia menores valores de θ hasta alcanzar un valor mínimo en $\theta \cong 80^0$.

-Cuando mas alejado está el punto de separación del punto de estancamiento posterior mayor será el arrastre.

-Los torbellinos inicialmente son estacionarios pero a medida que crecen cambian en el tiempo apareciendo a uno y otro lado del cilindro, generando los llamados vórtices de Von Karman. Cuando sopla viento alrededor de cables de luz se escucha un zumbido proveniente de estos vórtices.

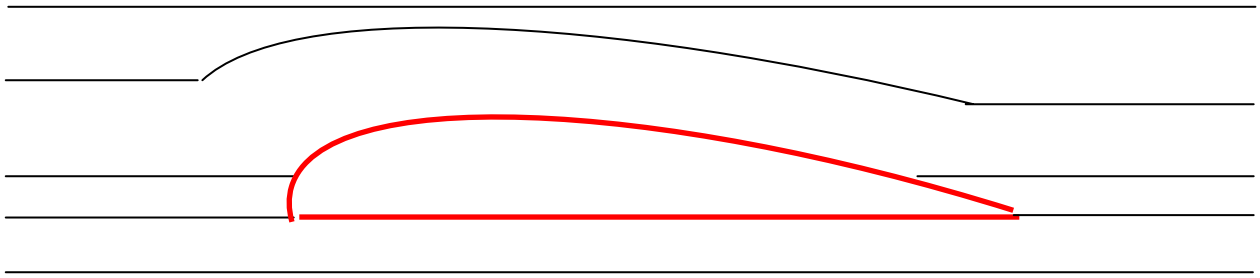
-El desprendimiento de capa límite es un fenómeno característico de sistemas en los cuales el fluido circula con un gradiente de presión adverso. Por este motivo, cuando el fluido circula sobre una placa plana no ocurre, pues la presión fuera de la capa límite no varía en la dirección del flujo.

-Además del fenómeno descripto es necesario tener en cuenta que si bien un elemento de volumen es retrasado por aquellos mas cercanos al sólido también es acelerado por aquellos que se encuentran mas cerca del borde externo de la capa límite.

-Por este motivo, si el gradiente de presión adverso no es muy grande (la presión aumenta lentamente en la dirección del flujo) puede ser que los elementos de volumen reciban energía desde el borde exterior de la capa límite, pudiendo avanzar mas, evitándose el fenómeno del desprendimiento de la capa límite.

-Por este motivo es que los objetos sumergidos se alargan en su parte posterior para reducir el gradiente de presión adverso evitándose la separación de la capa límite y reduciéndose el arrastre de forma.

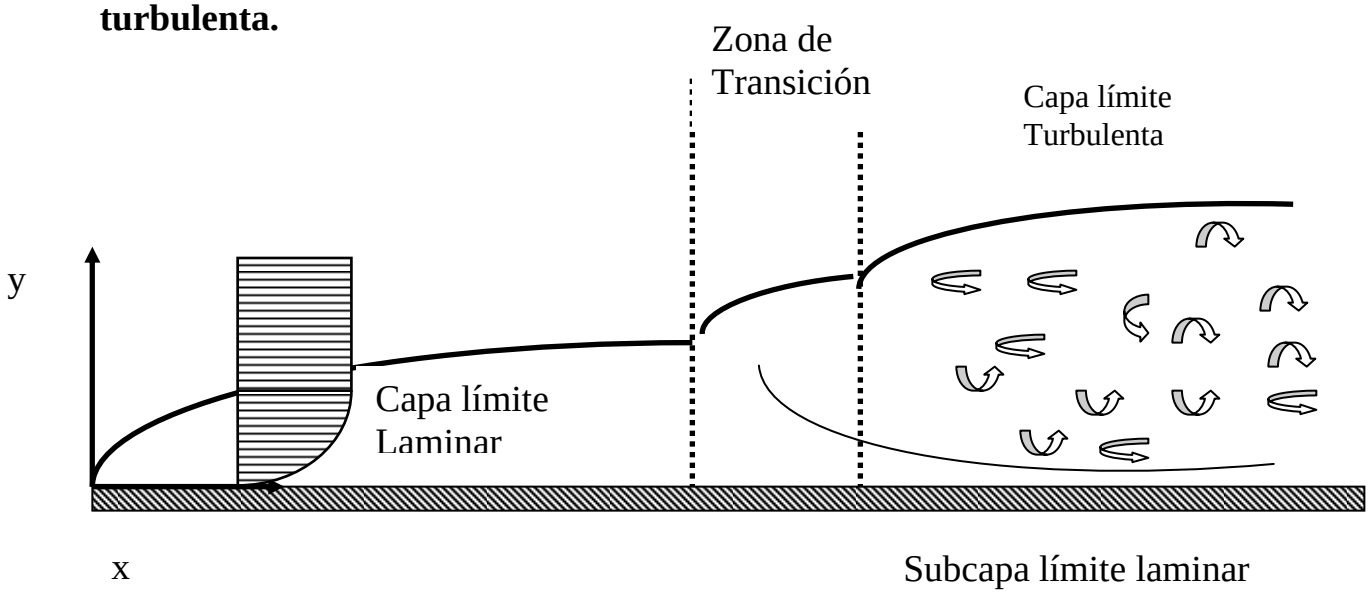
-Esto incrementa algo la fricción de piel, pero en el balance total siempre se disminuye el arrastre. Así surgieron las formas aerodinámicas como el perfil del ala de un avión.



TURBULENCIA

-Cuando se analiza un fluido que fluye sobre una placa plana lo suficientemente larga se alcanza una posición en que se generan inestabilidades dentro de la capa límite con la aparición de torbellinos transitorios y turbulencia. En contacto inmediato con el sólido sigue existiendo una subcapa límite muy delgada que sigue siendo laminar.

-Antes de la transición de capa límite laminar en turbulenta existe una zona de transición que por momentos es laminar y por momentos turbulenta.



-La transición de capa límite laminar a turbulenta depende del denominado Reynolds "x", definido como:

$$\mathbf{Re}_{x} = \frac{\rho v_{\infty} x}{\mu}$$

-Para valores de Re_x superiores a determinados valores críticos se produce la transición. Estos valores dependen de las perturbaciones que el fluido experimenta mientras circula en la capa límite laminar.

-Si en los primeros tramos de la placa existen rugosidades o protuberancias aparecerán componentes de velocidad transversales al flujo que facilitarán la generación de turbulencias y la transición para valores menores de "x".

-Para una placa plana lisa paralela al flujo la transición tiene lugar para:

$$3\times10^{5} \langle \mathbf{Re}_{x} \langle 5\times10^{5}$$

-La presencia de torbellinos en la capa límite turbulenta provoca un gran mezclado entre los elementos de volumen lo que conduce a una mayor transferencia de cantidad de movimiento entre estos que en el caso de la capa límite laminar.

-La transición de capa límite laminar a turbulenta también ocurre cuando los objetos sumergidos son curvos.

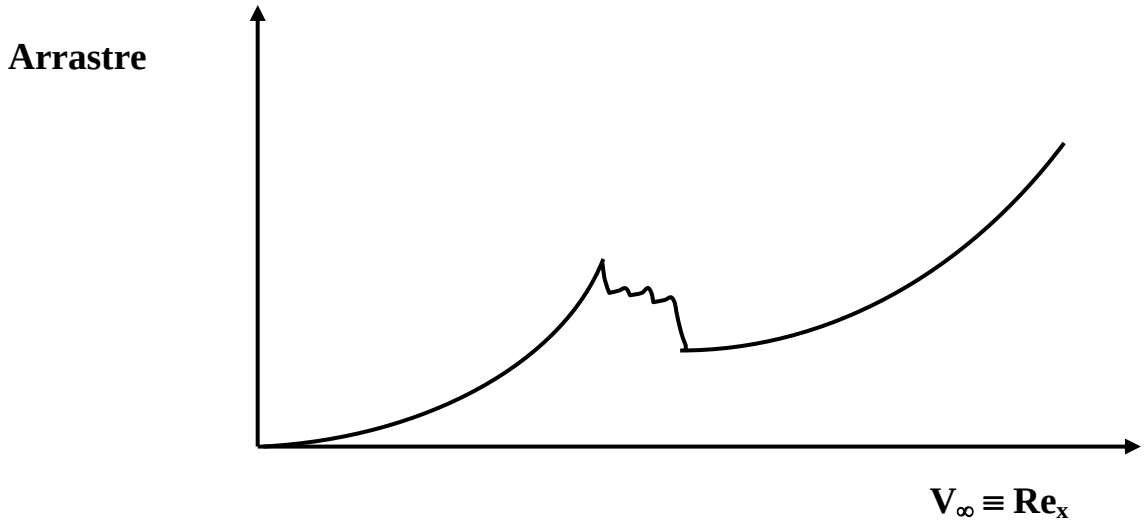
-Este fenómeno permite explicar el brusco descenso que experimenta la fuerza de arrastre que ejerce un fluido sobre un cilindro al aumentar la velocidad del fluido, o sea el Re.

-Ya se vio que al aumentar el Re la zona del desprendimiento de la capa límite se corre hacia menores valores de θ, alcanzándose un valor mínimo de $\theta \cong 80^{0}$. Esto provoca un aumento del arrastre. La capa límite se mantiene laminar.

-Si antes del desprendimiento de la capa límite ocurre la transición de laminar en turbulenta, la mayor transferencia de cantidad de movimiento entre los elementos de volumen permite que estos avancen mas venciendo el gradiente adverso de presión.

-Por lo tanto, la zona del desprendimiento se corre hacia valores mayores de θ y ocurre una brusca disminución de la fuerza de arrastre.

-Si el Re sigue aumentando la zona de desprendimiento vuelve a desplazarse hacia valores de θ menores y la fuerza de arrastre vuelve a incrementarse.



-La transición no solo es función de v_∞ (Re_x) sino que también depende de la existencia de rugosidades o protuberancias en la zona de crecimiento de la capa límite.

-Por lo tanto es posible "forzar" la transición de capa límite laminar en turbulenta y disminuir el arrastre sin cambiar la forma.

-Este efecto se utiliza por ejemplo en las pelotas de golf donde la incorporación de hoyuelos aumenta el alcance de la pelota en casi 5 veces.

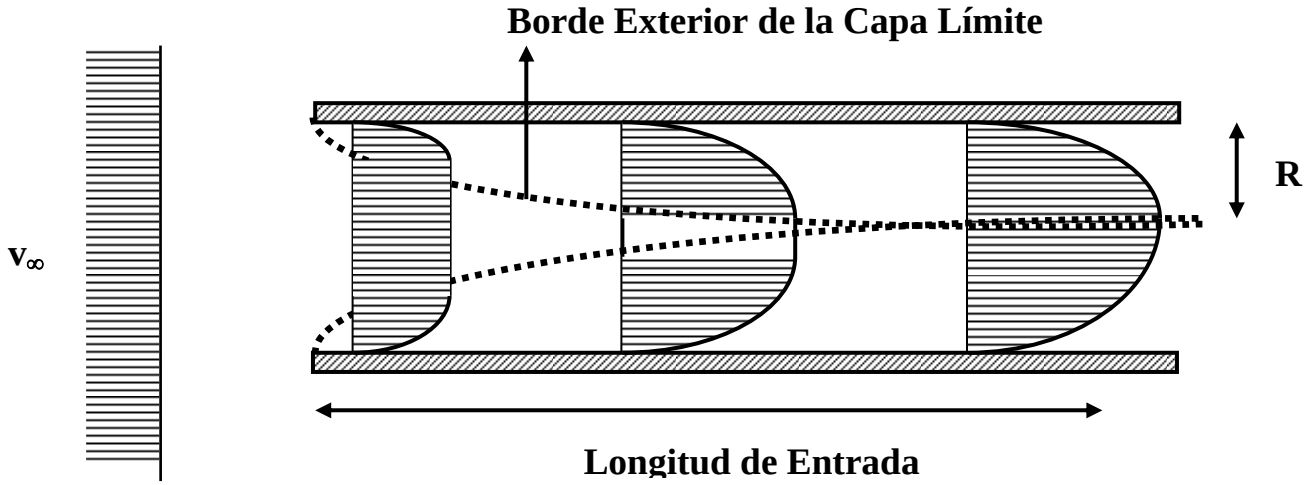
LONGITUD DE ENTRADA EN CONDUCTOS

-Cuando un fluido entra en un conducto debe recorrer una cierta longitud antes de que se alcance el flujo desarrollado (equilibrio de fuerzas).

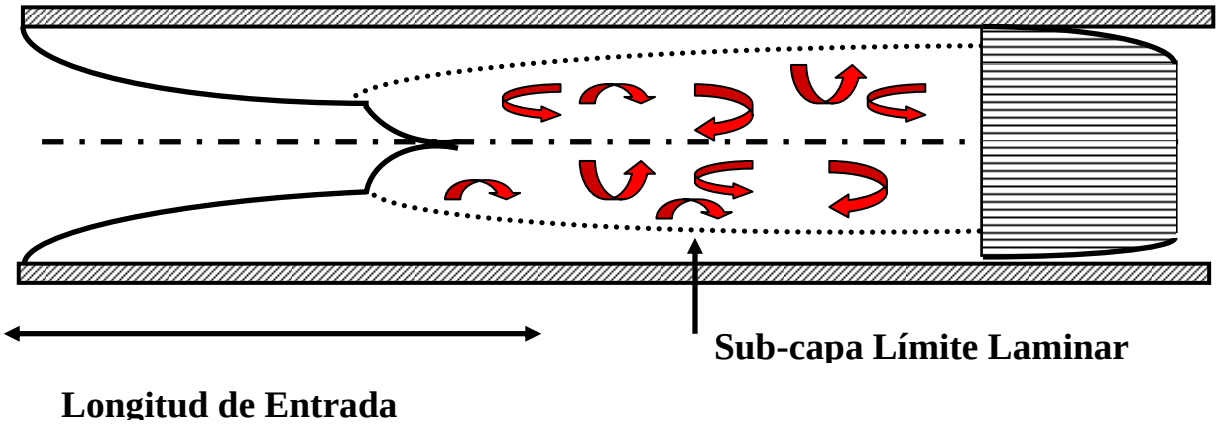
-Esta longitud se denomina "*longitud de entrada*" y en ella la distribución de velocidad cambia en la dirección del flujo.

-Si bien a los fines prácticos esta longitud es despreciable con respecto a las longitudes de las conducciones utilizadas habitualmente, su análisis es muy importante pues del comportamiento en esta zona dependerá el régimen que imperará aguas abajo.

-Imaginemos un fluido que se acerca con velocidad v_∞ a un conducto de sección circular de radio "R". Cuando el fluido penetra en el conducto en la región vecina a la pared comienza a crecer la capa límite, hasta que su espesor es igual a "R". En ese punto la capa límite ocupa todo el conducto y a partir de ese momento el flujo es desarrollado y la distancia necesaria para que eso ocurra se denomina "*longitud de entrada*".



-Si el flujo se desarrolla antes que la capa límite experimente la transición de laminar a turbulento, entonces el flujo corriente abajo será laminar.



-Si en cambio dentro de la longitud de entrada la capa límite transiciona, el flujo posterior será turbulento, habrá permanentes torbellinos y existirá una sub-capa límite laminar en contacto con la pared.

-El perfil de velocidad es casi plano debido al mayor intercambio de cantidad de movimiento que provocan los torbellinos y casi la totalidad de la caída de velocidad ocurre dentro de la sub-capa límite laminar.

-Cuando el flujo es laminar utilizando la Teoría de la Capa Límite puede establecerse que la longitud de entrada es:

$$Z_e = 0.05\,\mathrm{Re}\,D$$

donde Re es el número de Reynolds.

-No existe una expresión similar para flujo turbulento, ya que éste dependerá de las condiciones de entrada al conducto.

-Los primeros estudios sobre las condiciones que regulan la turbulencia los llevó a cabo Reynolds introduciendo filetes coloreados que le permitían discernir entre flujo laminar (ordenado) y turbulento (con alto grado de mezclado por presencia de torbellinos).

-Ensayando distintos parámetros llegó a la conclusión que el criterio para establecer la transición entre régimen laminar y turbulento es que el Re supere o no un valor de 2100.

-Sin embargo, debido a que la transición está condicionada por las condiciones de entrada al conducto, si se toman precauciones para evitar perturbaciones en la entrada es posible mantener flujo laminar aún para Re de hasta 40.000.

-El valor determinado por Reynolds establece el límite inferior de Re crítico, para valores inferiores a 2100, siempre se operará en condiciones de flujo laminar.

Separación de capa límite en una pelota lisa y una pelota de golf