

## ESTUDIO DE LA CAPA LIMITE PARA DIFERENTES CONDICIONES DE SUPERFICIE

Pablo Mantelli, Mariano Martínez, Juan Sebastián Delnero

UIDET LaCLyFA, Dpto. Aeronáutica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, Calle 1 y 47 (B1900TAG) La Plata, Argentina. <http://www.laclyfa.ing.unlp.edu.ar/>

### INTRODUCCIÓN

Entender el comportamiento de la capa límite para diferentes condiciones de rugosidad tiene una gran importancia en las aplicaciones de ingeniería. La rugosidad superficial puede llegar a tener un efecto significativo en la pérdida por fricción tanto en ductos cerrados como en las superficies aerodinámicas. Además de comprender el impacto de la rugosidad en la pérdida por fricción es deseable lograr un mejor entendimiento sobre la alteración global que sufre la capa límite. La capa límite desarrollada sobre una superficie plana podemos dividirlos en una subcapa interna y otra externa. La interna se encuentra en las inmediaciones de la pared y posee un espesor muy delgado en comparación al espesor de la capa límite mientras que la subcapa externa abarca la zona restante. Estudios experimentales y computacionales muestran que la estructura del flujo en la subcapa externa no sufre alteraciones al modificar la condición de superficie. Según la "hipótesis de similitud" de Townsend a una determinada distancia desde la pared la estructura turbulenta del flujo no se ve alterada por el tipo de rugosidad que posea la superficie. Para que se cumpla esta hipótesis es necesario un alto número de  $Re$  donde el espesor de la capa límite sea muy grande en comparación de la altura de rugosidad  $k$ . Esto implica que tanto para la placa plana lisa y la placa plana rugosa los perfiles de velocidad media y el de tensiones, ambos normalizados por sus respectivas variables, colapsan fuera de la subcapa externa cuando se los grafica en función de la distancia a la placa plana normalizada por el espesor de capa límite  $\delta/y$ . Varias investigaciones concuerdan que la subcapa externa comienza a partir de una distancia que ronda 5 veces la rugosidad de la superficie.

El presente trabajo de carácter experimental apunta al estudio de la capa límite desarrollada en superficies con diferente rugosidad superficial. Los experimentos se realizan para una placa plana de superficie lisa y para superficies rugosas de diferentes alturas. Tales superficies están dadas por papel de lija de diferente tamaño de grano que permiten definir la variable de rugosidad  $k$ . Entender el comportamiento de la rugosidad sobre la capa límite brinda valiosa información para el estudio o diseño de diferentes cuerpos que actúen en campos fluido dinámicos.

### Marco teórico:

L. Prandtl definió un trayecto de mezcla  $l$ , el cual representa la distancia en dirección transversal que una partícula dotada con velocidad media en su punto de origen, ha de recorrer para que la diferencia entre su velocidad propia y la que corresponde a su nuevo lugar sea igual a la fluctuación media longitudinal de la corriente turbulenta.

Karman estableció que el mecanismo de la corriente turbulenta es tal que las corrientes secundarias son semejantes en todos los puntos del campo, es decir, solo se diferencian en un factor de escala. Este razonamiento se lo conoce como la hipótesis de semejanza de Karman introduciendo una constante universal  $\chi$  sin dimensiones válida para cualquier corriente turbulenta. Esta constante se relaciona con  $l$  mediante .

$$l = \chi \left| \frac{d\bar{u}/dy}{\frac{d^2\bar{u}}{dy^2}} \right|$$

Considerando la corriente turbulenta deslizándose sobre una pared plana lisa. Siendo  $y$  la distancia de un punto a la pared. Se realiza la suposición de que el trayecto de mezcla es proporcional a  $y$ .

$$l = \chi \cdot y$$

A partir de estos parámetros del flujo turbulento y aceptando la hipótesis de L. Prandtl que las tensiones de corte cerca de la pared son constante  $\tau_0$  se llega a la ley universal de la distribución de velocidad escrita en forma adimensional

$$\frac{U-u}{U_{\tau_0}} = f\left(\frac{y}{\delta}\right)$$

la cual afirma que las curvas de distribución de velocidad se superponen tanto para superficies lisas como rugosas. Esto es de esperar fuera de la subcapa interna donde los esfuerzos de la corriente turbulenta predominan sobre los esfuerzos laminares. Experimentalmente J. Nikuradse demostró que la ley universal de distribución de velocidades muestra una muy buena concordancia también en la zona alejada de la pared.

El valor de velocidad de corte en la pared se obtiene mediante la ecuación

$$U_{\tau_0} = \left[ \nu \cdot \frac{\partial U}{\partial y} - \overline{u'v'} \right]^{\frac{1}{2}}$$

Como muestra la ecuación es necesario saber el valor de la fluctuación del flujo en dirección transversal dato con el cual no se cuenta. Se optó por calcular este valor a partir de los coeficientes de resistencia local para placa plana. Las ecuaciones de estos coeficientes se obtienen a partir de datos empíricos.

Para la placa plana lisa se utilizó la expresión de J. Nikuradse aplicable a un dominio de  $Re$  entre  **$1,7 \cdot 10^5$  a  $18 \cdot 10^6$** .

$$c_f' = 0,02296 Re_x^{-0,139}$$

Para la placa con rugosidad se utilizó la ecuación empírica que da el coeficiente de resistencia local en función de la rugosidad relativa que tiene validez para

$$10^2 < \frac{l}{kS} < 10^6$$

$$c_f' = \left( 2,87 + 1,58 \log\left(\frac{x}{kS}\right) \right)^{-2,5}$$

A partir del coeficiente de resistencia local se puede obtener el valor de tensión de corte en la pared

$$\tau_0 = \frac{c_f' \rho}{2} U^2$$

Finalmente la velocidad de corte se calcula

$$U_{\tau_0} = \left( \frac{\tau_0}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}}$$

## PARTE EXPERIMENTAL

Las mediciones fueron realizadas en túnel de viento de circuito abierto con una sección de prueba de 40cm x 40cm. El mismo posee una intensidad de turbulencia de 0,5%. Los experimentos se realizaron a 10m/s y 20m/s correspondientes a un Re de  $2,3 \cdot 10^6$  y otro Re de  $4,6 \cdot 10^6$ . Para el cálculo del Re se tomó como longitud característica la distancia entre el borde anterior de la placa y el punto de medición. El esquema del arreglo experimental puede observarse en la figura 1a.

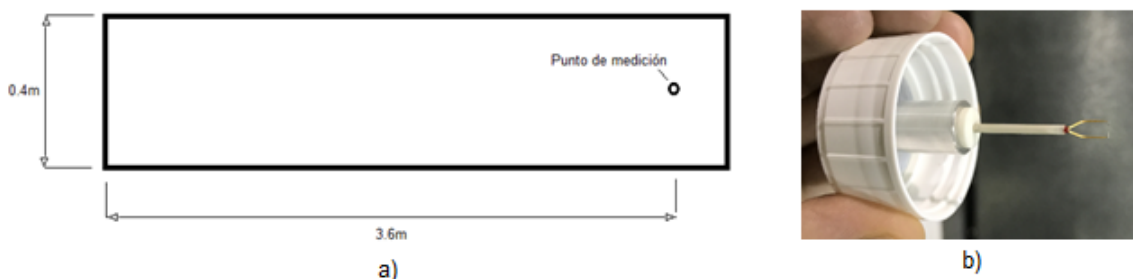


Figura 1: a) Esquema experimental, b) Sensor de capa límite

Se midió velocidades a lo largo de una línea perpendicular a la placa plana. Las mediciones se realizaron mediante anemometría de hilo caliente. Se adquirió durante 8 segundos a 2000Hz filtrando a 1000Hz. Se utilizó un sensor especial de capa límite que permitía medir a una distancia de 0.6mm desde la pared, figura 1b. Este sensor solo adquiere en dirección longitudinal. Para el movimiento del sensor se utilizó un sistema mecánico mediante un motor paso a paso logrando buena resolución en desplazamiento vertical.

Para la medición de la velocidad de corriente libre se utilizó un tubo pitot y un manómetro digital marca.

Las condiciones de superficies utilizadas fueron 3, una para la placa plana de acero sin generadores de rugosidad y otras dos donde la rugosidad se creó mediante papel de lija brindando una rugosidad arenística aproximada de 0.5mm y 0.1mm. En las figuras 2 y 3 se pueden observar las mismas.

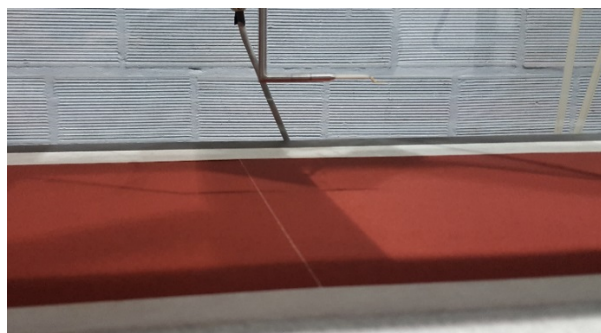


Figura 2: Rugosidad 1, 0.1mm

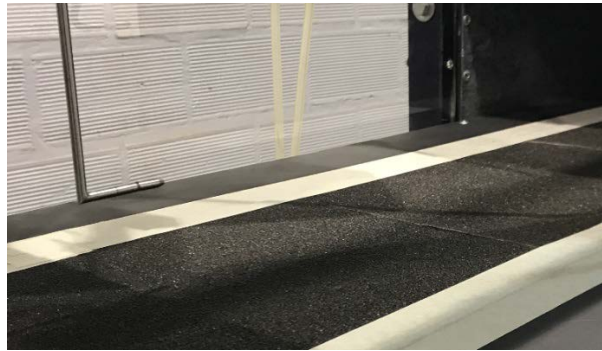


Figura 3: Rugosidad 2, 0.2mm

## RESULTADOS

Para una  $U = 10$  m/s se obtuvieron las siguientes gráficas.

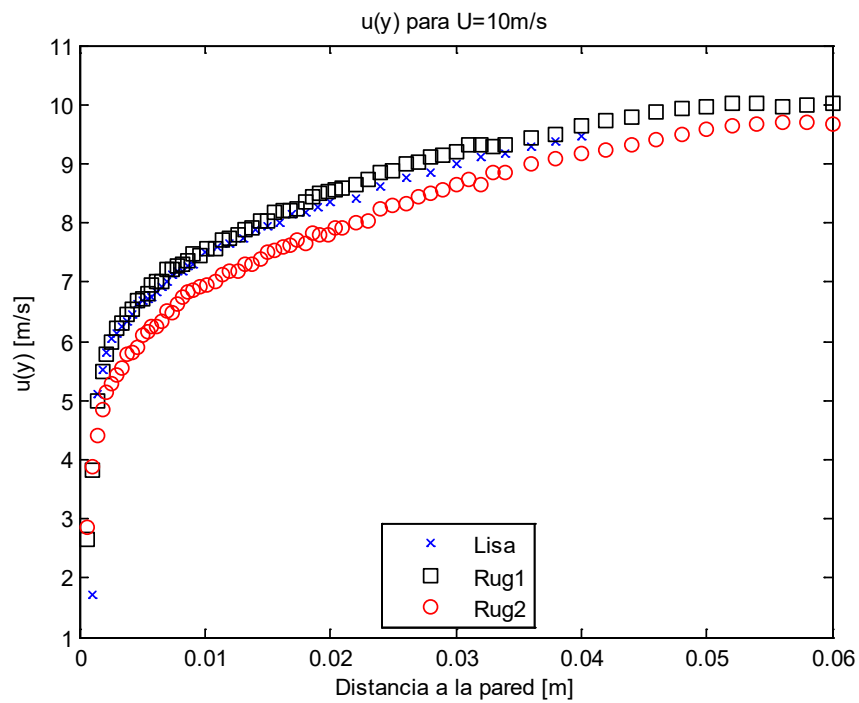


Figura 4: Perfil de velocidades medias  $U=10$ m/s

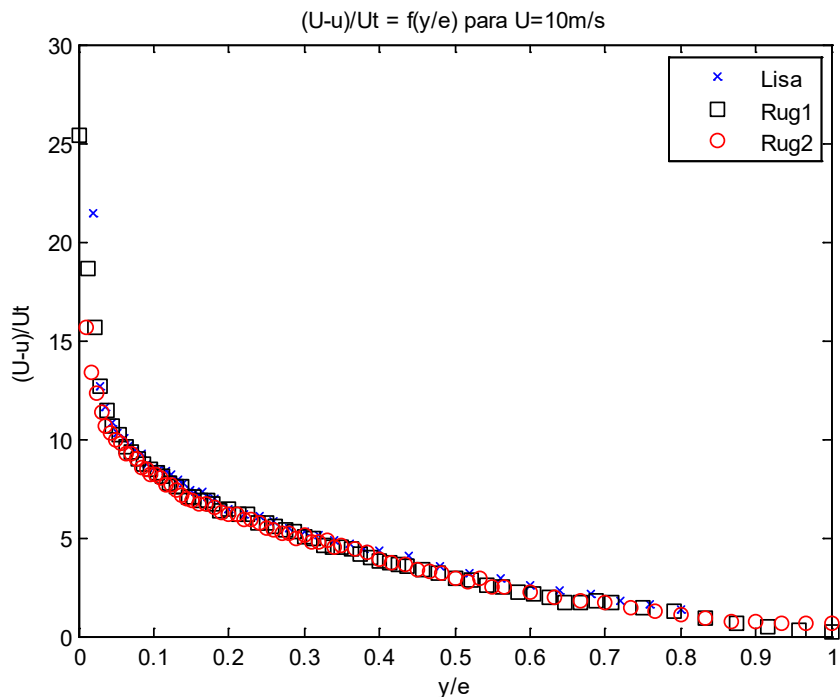


Figura 5: Perfil de velocidad media adimensionalizados U=10m/s

Para una U = 20 m/s se obtuvieron las siguientes gráficas.

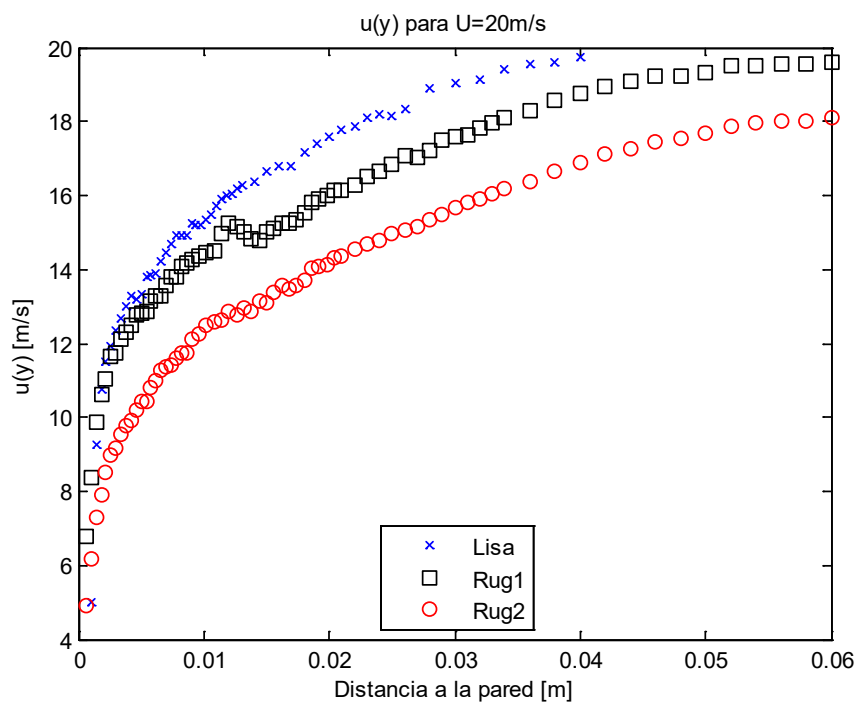


Figura 6: Perfil de velocidades medias U=20m/s

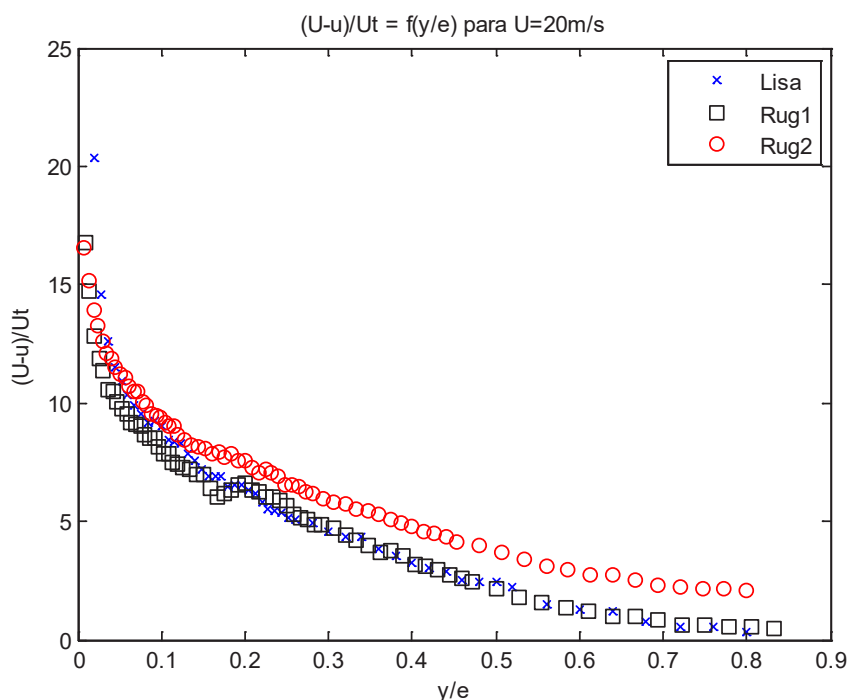


Figura 7: Perfil de velocidad media adimensionalizados  $U=20\text{m/s}$

## CONCLUSIONES

Los resultados otorgados por las gráficas de los perfiles de velocidad adimensionalizados revelan en gran porcentaje una superposición entre la placa lisa y las rugosas, siendo esta mayor para la condición de  $U=10\text{m/s}$ . Basados en esto se concluye que los parámetros de trayecto de mezcla y la constante de Karman, para la zona de la subcapa exterior, no se alteran en las diferentes condiciones de superficie. Esto podría implicar que la estructura de la corriente turbulenta no difiere entre los distintos casos siendo consistente con la hipótesis de similitud de Townsend. Para el caso de  $U=20\text{m/s}$  se observan algunas desviaciones con respecto a la placa plana. Esto puede deberse a que no se pudo determinar con precisión el espesor de capa límite para las superficies rugosas debido a que la altura final de la grilla de medición no llegó a medir el 99,5% de  $U$ . Como se mencionó antes el valor de  $U_{\tau,0}$  se obtuvo mediante ecuaciones empíricas de los coeficientes de roce locales y no de forma directa con los datos del experimento. Esto también puede presentar desviaciones con los valores reales.

## BIBLIOGRAFÍA

- 1) Townsendt A. A. (1976) The structure of turbulent shear flow. 2nd ed. Cambridge University Press.
- 2) Di Cicca G. M., Ferrari A., Onorato M. (2014) PIV investigation of a turbulent boundary layer over a three-dimensional rough wall. Memorie della Accademiadelle Scienze di Torino. Classe di Scienze Fisiche, Matematiche e Naturali 38.
- 3) Di Cicca G. M., Onorato M. (2015) Roughness sub-layer investigation of a turbulent boundary layer.
- 4) J.S. Connelly, M.P. Schultz, K.A. Flack. (2005) Velocity-defect scaling for turbulent boundary layers with a range of relative roughness.
- 5) Hermann Schlichting. Teoría de la capa límite.