

CRECIMIENTO DE LA CAPA LIMITE INTERNA ORIGINADA POR UN CAMBIO DE CONTORNO RUGOSO A LISO EN CANALES

Isabel FLOREZ, Maritza RAMIREZ y Julián AGUIRRE Pe
Laboratorio de Hidráulica
Escuela de Ingeniería Civil
Universidad de Los Andes
Mérida, Venezuela

RESUMEN

En este trabajo se establece una ecuación que define el crecimiento de la capa límite interna por un cambio rugoso a liso, en condiciones de flujo torrencial en canales. También se define una ley de similitud para la distribución de velocidades de la capa límite y se cuantifica la variación del esfuerzo cortante aguas abajo del cambio de rugosidad.

ABSTRACT

Internal boundary layer growth due to a change on roughness from rough to smooth in channels. In this paper an equation is established which defines the internal boundary layer growth due to a change on the roughness from rough to smooth, under conditions of torrential flow in channels. Also a similitude law is defined for the velocity distribution inside the boundary layer and the shear stress downstream of the roughness change is evaluated.

INTRODUCCION

Se han hecho pocas investigaciones experimentales sobre el campo de flujo aguas abajo de un cambio brusco en la rugosidad superficial, de rugoso a liso, en túneles de viento, y menos en canales.

Jacobs (1939) en uno de los escasos trabajos realizados en canales, midió perfiles medios de velocidad aguas abajo del cambio de rugosidad y calculó las distribuciones de esfuerzos cortantes, encontrando que el esfuerzo cortante en el contorno alcanza su nuevo valor de equilibrio en forma casi inmediata mientras que en la parte externa el reajuste es mucho más lento. Makita (1968) estableció, también en canales, que la tasa de ajuste de los esfuerzos cortantes era básicamente semejante a la

que se producía después de un cambio de liso a rugoso. Por el contrario, las mediciones realizadas por Bradley (1965) en placa de arrastre en la atmósfera, indicaban que se requiere una distancia mayor para que el esfuerzo cortante alcance su nuevo valor de equilibrio, cuando el cambio de rugosidad superficial es de rugoso a liso.

En los ensayos realizados por Taylor (1962) <1> en túnel de viento, se encontró que los perfiles de velocidad medidos en la inmediata vecindad del cambio de contorno cumplían con la distribución logarítmica universal de velocidad para una capa límite de equilibrio sobre un contorno liso, lo que sugeriría que el flujo alcanza el estado de equilibrio casi inmediatamente aguas abajo del cambio.

Antonia y Luxton <2>, <3>, <4>, en uno de los trabajos más completos desarrollados en el túnel de viento, concluyeron que el ajuste de la capa límite turbulenta a la nueva condición era considerablemente lento. También, y aunque se observó un claro ajuste a una distribución logarítmica de velocidad en la región cercana al contorno aguas abajo del cambio, se encontró que la constante de dicha distribución era considerablemente mayor que la que se espera usualmente para contorno liso. Para estos autores, en el caso de un cambio de rugoso a liso, la alta turbulencia en la capa límite interna trata de compensar la falla en la producción de energía cerca del contorno, resultando en consecuencia que la tasa de crecimiento de la capa interna depende tanto de las condiciones dentro de la misma como fuera de ella. Y, aunque el estado de respuesta inicial ante un cambio de rugoso a liso parece estar dominado por la advección de energía desde la capa límite sobre el contorno rugoso de aguas arriba, se presentan dudas sobre si al aumentar la distancia respecto al cambio de rugosidad el contorno empieza a ser de creciente importancia en el control de la estructura de turbulencia en la capa interna. El lento desarrollo observado en las distribuciones de velocidad y de intensidad de turbulencia podría explicarse por el hecho de que la mayor parte de la energía de turbulencia se localiza en la parte externa de la capa.

ESTUDIO EXPERIMENTAL

Se realizaron 30 ensayos diferentes de laboratorio en un canal de 0,5 x 0,5 x 8,5 m. de pendiente variable y bajo condiciones de flujo torrencial. El primer tramo del canal se recubrió con sedimentos de 1,1 cm., 2 cm. y 3 cm. de diámetro medio, y en el resto se colocó un fondo falso liso, de forma que quedara alineado con la cresta de las rugosidades. La pendiente se varió desde 0,5% hasta 4% y los caudales de 10 lts/seg. a 100 lts/seg.

Las mediciones de velocidad se hicieron mediante un tubo de Pitot. Se levantaron perfiles de velocidad a distancias de 10, 20, 40, 60, 80, 100 y 140 cm. aguas abajo del cambio de rugosidad. En la dirección vertical, y, las velocidades se midieron a intervalos de 0,5 cm. desde una distancia de 0,6 cm. del fondo hasta la superficie libre.

CONSIDERACIONES TEORICAS Y ANALISIS DE LOS RESULTADOS

Una forma convencional de expresar la ley logarítmica de distribución turbulenta de velocidades sobre un contorno liso es

$$\frac{v}{v_*} = A + \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{y}{v_*} v_*\right) \quad (1)$$

donde v es la velocidad a una altura y a partir del origen, que en este caso corresponde al fondo liso del canal, v_* es la velocidad de corte, ν es la viscosidad cinemática del fluido, κ es la constante de Von Kármán y A es una constante experimental. En base a los datos experimentales se estableció el valor medio de κ en 0,404; cifra muy próxima al valor generalmente aceptado de κ de 0,4, con un coeficiente de variación de 0,045. Para el canal utilizado la constante experimental, calculada en base al análisis estadístico de 573 datos y con un coeficiente de variación de 0,409, es 12,88.

Si en la ec. (1) se hace $v = v_{\max}$ para $y = y_m$ (y_m es del orden del 90% de la profundidad normal) y se restan ambas ecuaciones, se tiene que:

$$v - v_{\text{máx.}} = \frac{2,3 v_*}{\kappa} \log \frac{y}{y_m} \quad (2)$$

y dividiendo por $v_{\text{máx.}}$

$$\frac{v}{v_{\text{máx.}}} = 1 + \frac{2,3 v_*}{\kappa v_{\text{máx.}}} \log \frac{y}{y_m} \quad (3)$$

La respuesta de un flujo turbulento a un cambio abrupto en la rugosidad es la generación de una capa límite interna que se desarrolla hacia aguas abajo y hacia afuera del contorno. Fuera de esa capa límite interna los perfiles de velocidad son semejantes a los registrados justo antes del cambio, de tal forma que el punto en el que el perfil medio de velocidades registradas se superpone con el perfil medio del flujo de aproximación marca el límite de la capa interna y permite definir el espesor, δ_i , de dicha capa. En la Fig. 1 se presenta un ejemplo, correspondiente al ensayo N° 19, en el que el contorno rugoso corresponde a un material de 3 cm. de diámetro medio.

Si denominamos m a la pendiente de las rectas logarítmicas en la Fig. 1, se puede escribir que:

$$v_* = \frac{m \kappa v_{\text{máx.}}}{2,3} \quad (4)$$

lo que permitió calcular, en cada caso, la velocidad de corte y el esfuerzo cortante τ como $v_*^2 \rho$, siendo ρ la densidad del fluido.

Para la distribución de velocidades en el seno de la capa límite interna se usaron como parámetro de similitud el espesor de la capa límite, δ_i , y la velocidad v_i correspondiente a la intersección de las ecuaciones logarítmicas obtenidas mediante ajuste estadístico (Aguirre, 1982). Los resultados experimentales presentados en la Figura 2 permitieron llegar a la expresión,

$$\frac{v}{v_i} = 1,00 + 0,20 \log \frac{y}{\delta_i} \quad (5)$$

que, para los 732 datos correlacionados, dieron un coeficiente de 0,881.

En general, y cuando se trata de un cambio de contorno liso a rugoso, el espesor de la capa límite interna se hace adimensional empleando alguna dimensión de la rugosidad como escala de longitud (Bauer (1954)<5>, Scofield (1981)<6><7> y Aguirre (1982)<8>). Sin embargo cuando el cambio es de contorno rugoso a liso, las características de la rugosidad aguas arriba del cambio no parecen tener mayor influencia sobre el crecimiento de la capa límite interna. Encontrándose en cambio que el espesor relativo δ_r , definido como la relación entre el espesor absoluto, δ_i , y la profundidad y_m podría expresarse adecuadamente en función de un número de Reynolds del flujo de aproximación (Figura 3), según la relación:

$$\delta_r = \frac{\delta_i}{y_m} = 0,509 \log\left(\frac{x v_{*a}}{v}\right) - 1,502 \quad (6)$$

en donde v_{*a} es la velocidad de corte del flujo de aproximación y x es la distancia desde el cambio de rugosidad. La ec. 6, a la que corresponde un coeficiente de correlación de 0,855 es válida para el rango

$$893 \leq \frac{x v_{*a}}{v} \leq 83323$$

Si se sustituye el valor de v_i definido por la ec. (1) en la ec. (5) se tiene que

$$v = (1,00 + 0,20 \log \frac{y}{\delta_i}) \left(\frac{2,3 v_*}{\kappa} \log \frac{\delta_i v_*}{v} + A v_* \right)^{1/4} \quad (7)$$

sustituyendo los valores de κ y de A , queda:

$$\frac{v}{v_*} = (1,00 + 0,20 \log \frac{y}{\delta_i}) (12,9 + 5,75 \log \frac{\delta_i v_*}{v}) \quad (8)$$

en donde δ_i está definido por la ec. (6).

Después de un cambio de liso a rugoso el esfuerzo cortante en el contorno se dispara antes de volver lentamente a su nuevo

estado de equilibrio (Aguirre, 1982). Por el contrario, cuando el cambio es de rugoso a liso el análisis de la variación del esfuerzo cortante aguas abajo del cambio (Figura 4), indicó que éste es mucho menor que el que podría esperarse sobre contorno liso. Y, aunque la dispersión de resultados es algo grande (coeficiente de correlación = 0,66), se encontró que dicho esfuerzo cortante crece lentamente hacia aguas abajo según la relación

$$\frac{\tau_x}{\tau_b} = 0,171 + 7,60 \cdot 10^{-3} \left(\frac{x}{y_m} \right) \quad (9)$$

en donde τ_x es el esfuerzo cortante registrado en la sección ubicada a la distancia x aguas abajo del cambio de rugosidad τ_b es el esfuerzo cortante que sería de esperar sobre el contorno liso, según la ecuación

$$\tau_b = \gamma_r S = \frac{(\gamma_m B)}{(\gamma_m + B)} S \gamma \quad (10)$$

en la que γ es el peso específico del fluido, S es la pendiente del canal y B es el ancho del mismo.

CONCLUSIONES

La distribución de velocidades dentro de la capa límite interna se ajusta muy bien a un perfil logarítmico y el valor de la constante de Von Kármán encontrado experimentalmente, 0,404, concuerda con el valor generalmente aceptado de 0,4.

El crecimiento de la capa límite puede hacerse adimensional usando la profundidad del flujo como escala de longitud y expresarse como una función de un número de Reynolds del flujo de aproximación.

El esfuerzo cortante del contorno aguas abajo del cambio de rugosidad es inferior al que podría esperarse sobre un contorno liso y crece lentamente hacia aguas abajo del cambio de rugosidad.

AGRADECIMIENTO

Los autores desean agradecer el apoyo financiero del CDCHT de la Universidad de Los Andes (Proyecto I-203) que hizo posible la realización de este estudio.

REFERENCIAS

- <1> TAYLOR, R.J. "The Structure of Turbulent Shear Flow", Journal of Fluid Mechanics. Vol 13 (1962)
- <2> ANTONIA, R.A. y LUXTON R.E.: "The Response of a Turbulent Boundary Layer to an Upstading Step Change in Surface Roughness" Journal of Basic Engineering, ASME, Vol. 93 (1971)
- <3> ANTONIA, R.A. y LUXTON R.E.: "The Response of a Turbulent Boundary Layer to a Step Change in Surface Roughness, Part. 1. Smooth to Rough, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 48 (1971)
- <4> ANTONIA, R.A. y LUXTON R.E., "The Response of a Turbulent Boundary Layer to a Step Change in Surface Roughness, Part. 2. Smooth to Rough, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 53 (1972)
- <5> BAUER, W.J.: "Turbulent Boundary Layer on Step Slopes" Transsactions ASCE, Vol. 119(1954)
- <6> SCHOFIELD, W.H: "Measurements in Adverse Pressure Gradient Turbulent Boundary Layers with a Steep Change in Surface Roughness". Journal of Fluid Mechanics, Vol. 70 (1975)
- <7> SCHOFIELD, W.H.: "Turbulent Shear Flows Over Step Change in Surface Roughness" Journal of Fluids Engineering, ASME, Vol. 103 (1981)
- <8> AGUIRRE J.: "Capa límite Interna Producida por un Cambio de Rugosidad" X Congreso Latinoamericano de Hidráulica. México, D.F. México (1982)

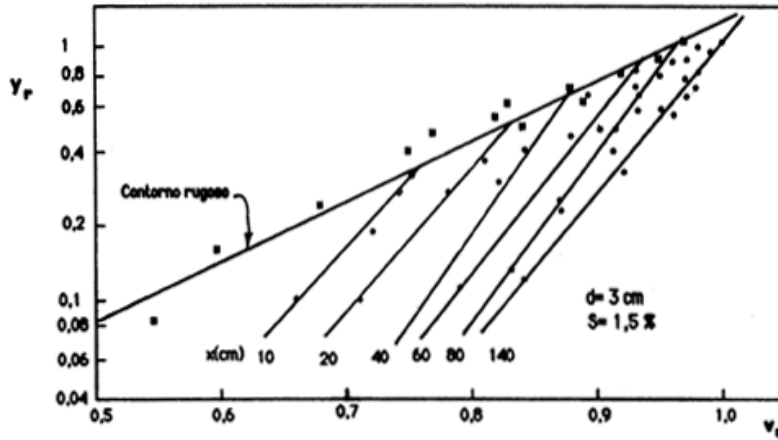


Fig. 1.-DISTRIBUCION DE VELOCIDADES SOBRE EL CONTORNO LISO. ENSAYO N° 19
DIAMETRO DE LAS RUGOSIDADES CORRESPONDIENTES AL FLUJO DE
APROXIMACION UNIAL A 3 cm.

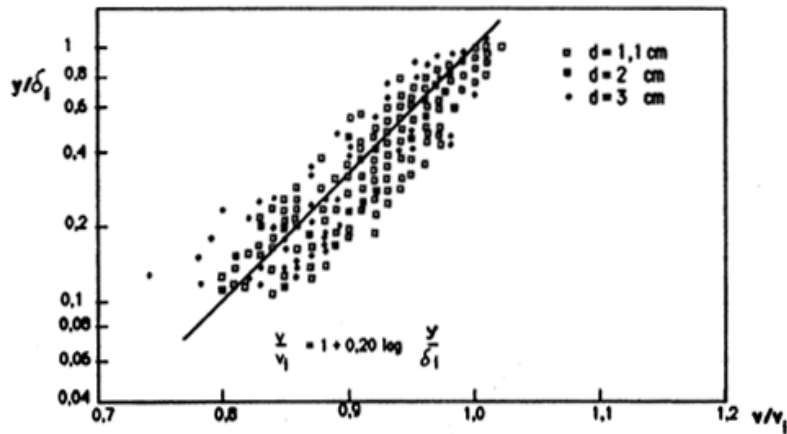


Fig. 2.-LEY DE SIMILITUD PARA LA DISTRIBUCION DE VELOCIDADES DENTRO
DE LA CAPA LIMITE INTERNA.

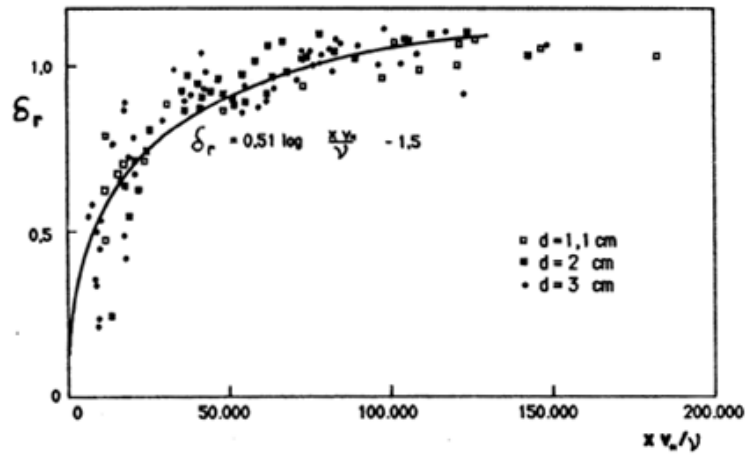


FIG.3.-ESPESOR ADIMENSIONAL DE LA CAPA LIMITE INTERNA

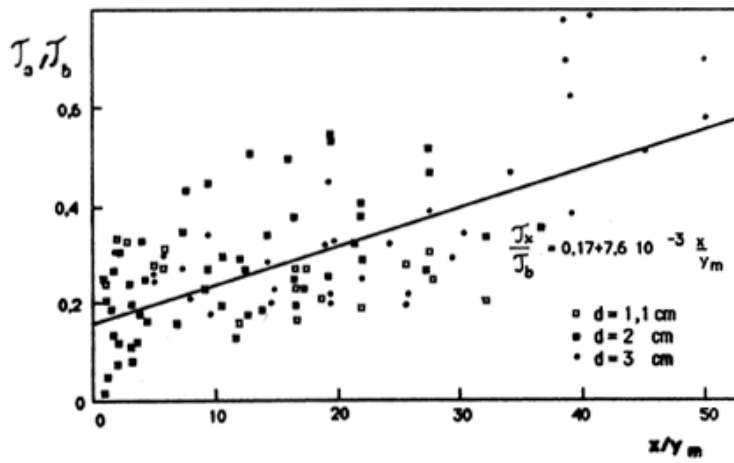


FIG.4.-VARIACION DEL ESFUERZO CORTANTE.