

Artículo publicado en el Repositorio Institucional del IMTA

<i>Título</i>	Análisis del flujo en un canal de laboratorio con formas de fondo fijas.
<i>Autor / Adscripción</i>	Joselina Espinoza Ayala Polioptro F. Martínez Austria Instituto Mexicano de Tecnología del Agua Jorge Rojas Menéndez Francisco Ávila Segura Centro de Investigación en Energía. UNAM
<i>Publicación</i>	Ingeniería Hidráulica en México, 15(2): 75-84
<i>Fecha de publicación</i>	2000
<i>Resumen</i>	Se presentan resultados experimentales sobre las características del flujo en un canal con formas de fondo fijas, triangulares y bidimensionales. Se utilizó la técnica de visualización de flujo, con inyección de tinta y con generación de burbujas de hidrógeno, para describir cualitativamente los diferentes tipos de macroestructuras turbulentas-coherentes detrás de una de las formas de fondo. Las principales estructuras encontradas fueron del tipo de ondas de Kelvin-Helmholz, en la capa cortante generada entre el flujo principal y el flujo estancado detrás de la forma; boils o eyecciones de flujo de mayor intensidad, aguas abajo de la cresta de la forma; vórtices verticales semejantes a pequeños tornados, en la línea de inicio de la nueva forma de fondo; vórtice tipo cono (funnel), en dirección el flujo y vórtices transversales, en la región de separación.
<i>Identificador</i>	http://hdl.handle.net/123456789/1281

Análisis del flujo en un canal de laboratorio con formas de fondo fijas

Joselina Espinoza Ayala
Poliopetro Martínez-Austria

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Jorge Rojas Menéndez
Francisco Ávila Segura

Centro de Investigación en Energía-UNAM

Se presentan resultados experimentales sobre las características del flujo en un canal con formas de fondo fijas, triangulares y bidimensionales. El canal usado tiene 20 m de longitud, 1.0 m de ancho y 0.5 m de alto, con un flujo de agua en estado permanente y para números de Reynolds ($Re = U_o H/\nu$) entre 12,000 y 28,000. Se utilizó la técnica de visualización de flujo, con inyección de tinta y con generación de burbujas de hidrógeno, para describir cualitativamente los diferentes tipos de macro-estructuras turbulentas-coherentes detrás de una de las formas de fondo. Las principales estructuras encontradas fueron del tipo de ondas de Kelvin-Helmholz, en la capa cortante generada entre el flujo principal y el flujo estancado detrás de la forma; boils o eyecciones de flujo de mayor intensidad, aguas abajo de la cresta de la forma; vórtices verticales semejantes a pequeños tornados, en la línea de inicio de la nueva forma de fondo; vórtice tipo cono (funnel), en dirección del flujo y vórtices transversales, en la región de separación. Una vez identificadas las zonas de mayor relevancia para la descripción del flujo se hicieron mediciones de una o dos componentes del vector velocidad mediante la técnica de anemometría de película caliente. Se analizaron los perfiles de velocidad media, la intensidad de turbulencia y los esfuerzos de Reynolds. Los perfiles de velocidad indicaron, entre otras cosas, que el punto donde termina la zona de recirculación varió intermitentemente oscilando en un valor cercano a $5h$, donde h es la altura de la forma de fondo. Estos resultados concordaron con los valores reportados para flujo detrás de un escalón (Nakagawa y Nezu, 1987). Los perfiles mostraron que aún para distancias de $10h$, donde h es la altura de las formas, los perfiles de velocidad no alcanzaron la uniformidad después de la separación. Las características turbulentas u'/u_ y v'/u_* fueron del orden de magnitud y estructura semejante a las reportadas por Lyn (1993). Los perfiles de los esfuerzos de Reynolds resultaron semejantes a los presentados por Nelson et al. (1993), mostrando valores máximos en la región de recirculación. El análisis conjunto del campo de flujo con las técnicas mencionadas contribuyó al conocimiento de las macro-estructuras turbulentas y sus implicaciones en los procesos de transporte de sedimentos en canales con formas de fondo.*

Palabras clave: formas de fondo, dunas, estructuras coherentes, visualización de flujo, flujo turbulento en canales, técnicas experimentales, turbulencia, transporte de sedimentos.

Introducción

El conocimiento sobre el flujo turbulento en canales se ha incrementado sustancialmente durante los últimos cincuenta años; ahora se tiene la certeza de que existen estructuras organizadas cerca del fondo que interactúan con el flujo medio modificando sus característi-

cas. Según Robinson (1991), una estructura originada en la capa límite, en donde cualquiera de las variables fundamentales del flujo (componentes de la velocidad, presión, temperatura, etc.) exhiba una correlación significativa consigo misma o con otra variable y que esta relación se dé en un tiempo significativamente más grande que la mayoría de las escalas locales del flujo,

constituye lo que se conoce con el nombre de movimiento o estructura turbulenta coherente. A esta clase de estructuras se le atribuyen los cambios que se presentan en el lecho de algunos tipos de ríos dando lugar a diferentes configuraciones de fondo como son, por ejemplo, las dunas. Estas formas inducen la separación local del flujo y por lo tanto incrementan la resistencia y el transporte de sedimentos. La compleja geometría de las formas de fondo, su movimiento en dirección del flujo y la presencia de material en suspensión en el flujo hace difícil su estudio (Espinoza et al. 1995). Para entender el fenómeno se han hecho simplificaciones tales como el análisis del flujo detrás de un escalón o algún otro tipo de formas fijas. Con algunas de estas geometrías más sencillas se logra la bidimensionalidad del flujo, se facilita la medición y el análisis de las características turbulentas (Nakagawa y Nezu, 1987). Ruck y Makiola (1987) investigaron la influencia de la geometría del escalón en las características turbulentas del flujo para ángulos del escalón α entre 10° y 90° . Los estudios más recientes sobre las características del flujo y la turbulencia sobre formas de fondo fijas son los de Lyn (1993), Nelson (1993), y Bennett y Best (1996); sin embargo, la interacción entre el flujo-formas de fondo-transporte de sedimentos no queda clara. Evidencias experimentales y de estudios de campo muestran que la macroturbulencia generada detrás de las formas de fondo es muy importante para comprender la dinámica del transporte de sedimento y los procesos de evolución y desarrollo de formas de fondo. Las estructuras macroturbulentas más conocidas en el caso de formas de fondo son las denominadas *kolks* o *boils* que han sido discutidas por Jackson (1976), Itakura y Kishi (1980), Nezu et al. (1980). Jackson (1976) obtuvo empíricamente la periodicidad adimensional de los *boils*, T_b , como: $T_b = TU/\gamma$

$\sim 3 - 7$, donde T es el periodo del *boil*, U la velocidad media aguas abajo. Según Rao et al. (1971) este periodo es muy parecido al de los *burst* en la capa límite turbulenta. Jackson (1976) y Yalin (1977) relacionaron el origen de los *boils*, con los eventos de la capa límite y a su vez con el origen de las formas de fondo.

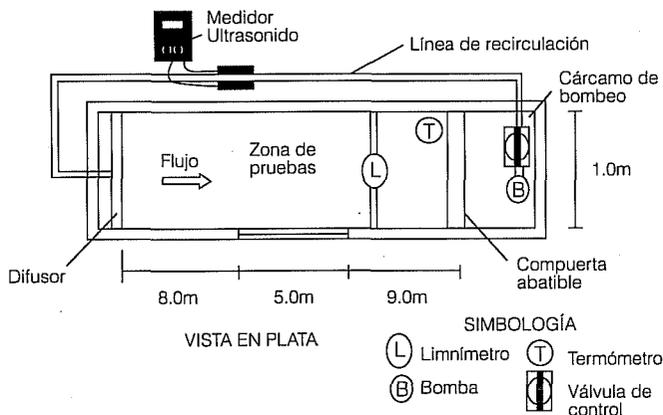
Los objetivos de este trabajo son analizar los resultados de mediciones con anemometría y la visualización de flujo en dos planos, así como discutir los aspectos claves en la influencia de las formas de fondo en la estructura del flujo y sus implicaciones en el transporte de sedimentos.

Instalación y procedimiento experimental

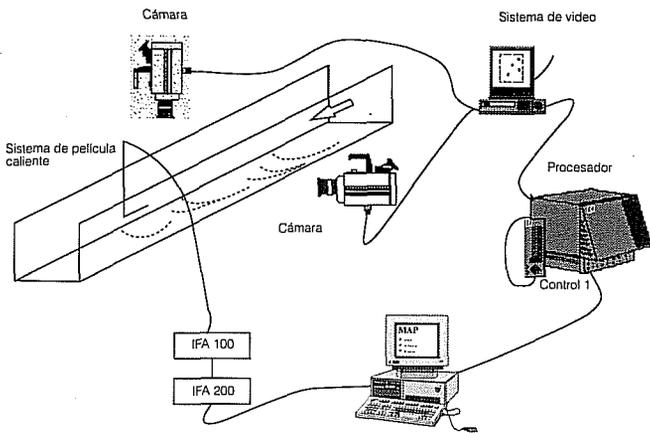
La instalación experimental consta de un canal de 20 m de largo, 1 m de ancho y 0.5 m de alto, con sistema de recirculación del flujo como se muestra en la ilustración 1. Al final del canal se colocó una compuerta abatible para controlar el tirante. La zona de pruebas, de 1.0 m de largo con ventanas laterales de vidrio, se encontró localizada a 15 m aguas abajo de la entrada. Se colocaron formas de fondo consistentes en una serie de elementos triangulares-bidimensionales, con la finalidad de lograr una semejanza con las dunas que se presentan en los ríos y para ello se siguieron los criterios de Vanoni y Hwang (1967), quienes establecieron la relación entre la amplitud (altura de la duna h) y longitud de onda de la duna (L) del orden de $h/L = 0.1$. Fredsoe (1982), basándose en predicciones teóricas estableció un valor máximo de ($h/L = 0.06$) en acuerdo con evidencia experimental de Yalin (1977). En la presente investigación se propuso $h/L = 0.08$, relación usada también por Lyn (1993). Las formas de fondo se construyeron en acrílico y se fijaron a 5 m de la entrada con una extensión de 10 m (68 formas en total), cubriendo todo el ancho.

Para el análisis de las estructuras del flujo se usaron técnicas de visualización y de anemometría de película caliente. En la visualización del flujo se usaron la inyección de tinta y la generación de burbujas de hidrógeno. Como trazador se empleó azul de metileno diluido en agua, inyectado por medio de una aguja hipodérmica colocada en la frontera inferior del canal. Los puntos de inyección se seleccionaron estratégicamente para la detección de las estructuras del flujo. Las imágenes se tomaron con dos cámaras de video a color, profesionales (Sony DXC 325P), con una velocidad de 30 cuadros por segundo, sincronizadas con un sistema de efectos especiales (Sony SEG-2000A) para obtener simultáneamente en cada cuadro las vistas en planta y lateral. La información se almacenó en cintas U-matic a través de una videogradora (Sony VO-9850).

1. Esquema de la instalación experimental



2. Esquema de los sistemas de visualización y medición



Las burbujas de hidrógeno se generaron por electrólisis, aplicando voltaje a un circuito donde el ánodo consistió de un alambre muy fino, dividido en intervalos conductores y no conductores, y el cátodo fue una placa de cobre, ambos localizados en el flujo de agua. En el caso de la investigación se diseñó y construyó un circuito con una fuente de 13 volts, con pulsos de voltaje. Para mejorar la visualización se agregó sulfato de sodio en una concentración de 0.075 g/l. La trayectoria de las burbujas se determinó mediante un equipo de video Kodak Ektapro de alta velocidad y el software MAW (del inglés, *motion analysis workstation*). A partir de las trayectorias se estimaron las velocidades en el plano formado por la dirección de la corriente y la vertical.

Con la técnica de anemometría de película caliente se midieron las componentes de velocidad puntual e instantánea del fluido. Los sensores, por sus pequeñas dimensiones y su buena respuesta en frecuencia son, especialmente, adecuados para estudiar flujos turbulentos. La forma más común de operar los sensores térmicos es manteniéndolos a una temperatura constante usando un circuito electrónico con un puente de Wheatstone. En este trabajo se usó un equipo TSI que contiene una unidad IFA 100 para la adquisición de velocidades y una unidad IFA200 para conversión de la señal de analógica a digital. Los sistemas de visualización y medición de velocidades utilizados se muestran esquemáticamente en la ilustración 2.

Las mediciones con anemometría de película caliente se hicieron a lo largo de una de las formas ubicada a 10 m de la entrada, para diferentes alturas. Las secciones de medición fueron ocho, como se indica en la ilustración 3, cuatro secciones aguas abajo de la cresta espaciadas cada 4 mm y cuatro en la pendiente

aguas arriba de la cresta espaciadas cada 30 mm. En cada sección se obtuvo un perfil vertical de velocidades con 30 puntos. El primer punto de medición se localizó a 3mm del fondo. En la región cercana a la pared se tomaron mediciones a cada milímetro hasta el punto 22 y del punto 22 al 30 cada 5 mm. La información sobre una forma completa se obtuvo en una malla de 30 x 8 puntos, en total 240 puntos. Las distancias verticales se midieron a partir del nivel medio de la forma. En estas coordenadas, el pico de la forma de fondo se localizó a $y/H=0.15$, donde H es el tirante del flujo.

En cada sección y para cada uno de los puntos se midieron las componentes longitudinal y vertical de la velocidad instantánea. A partir de estos valores se calcularon las velocidades medias U (en dirección de la corriente) y V (en la dirección vertical). Las intensidades de la turbulencia de cada componente (u' , v'), se calcularon con las fórmulas:

$$u' = [1/n \sum (u_i - U)^2]^{1/2} \tag{1}$$

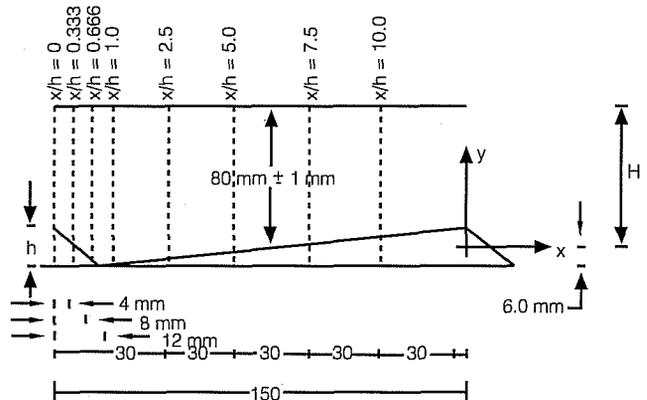
$$v' = [1/n \sum (v_i - V)^2]^{1/2} \tag{2}$$

donde n es el número total de mediciones, u_i y v_i son las velocidades instantáneas longitudinales y verticales respectivamente. Los esfuerzos de Reynolds $\tau_R = -\rho u'v'$, se determinaron usando:

$$u'v' = 1/n \sum (u_i - U)(v_i - V) \tag{3}$$

Se realizaron seis experimentos para números de Reynolds entre 12,400 y 28,000; sin embargo, sólo se presentan los resultados de la visualización y anemometría de película caliente para el caso de número de Reynolds de 18,400, con un tirante de 0.08 m y una velocidad media de 0.23 m/s.

3. Localización de las secciones de medición sobre una forma de fondo



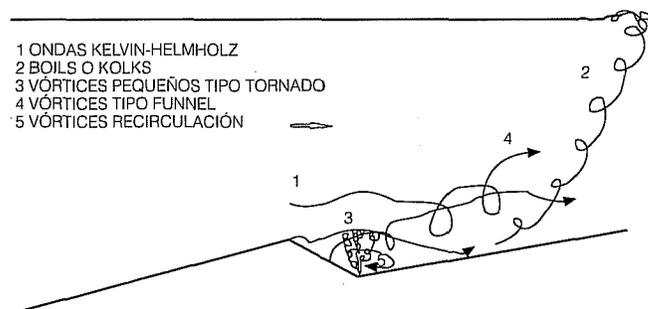
Resultados

Visualización de flujo y clasificación de las estructuras turbulentas

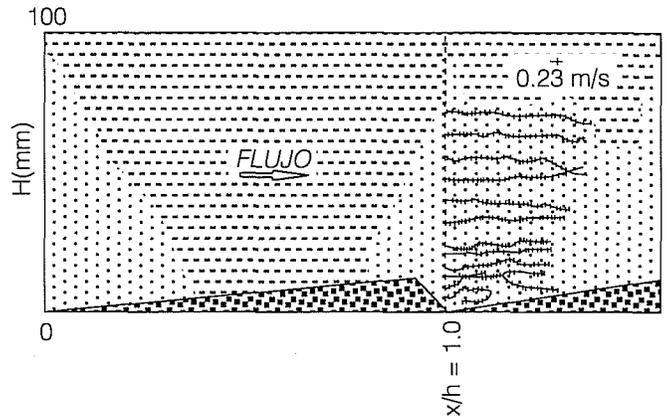
Con la técnica de inyección de tinta fue posible identificar y analizar las estructuras turbulentas en el flujo y su relación con las formas de fondo fijas. El colorante se introdujo en dos puntos; uno en la cresta de la forma ($x/h = 0$), y el otro en la base de la misma ($x/h = 1.0$), donde x es la distancia en la dirección de la corriente, medida a partir de la cresta de la duna, (ilustración 3). Las imágenes en dos vistas (planta y lateral) permitieron una concepción casi tridimensional de las estructuras y de las interacciones entre diferentes tipos de vórtices presentes en el flujo. Las estructuras coherentes se analizaron de acuerdo con sus dimensiones y su tiempo de duración. Las estructuras del flujo observadas en las grabaciones, se muestran esquemáticamente en la ilustración 4 y sus características se describen a continuación.

1) *Ondas de Kelvin-Helmholz*. Se generan en la capa cortante entre el flujo principal y el flujo estancao detrás de la cresta de la duna. Estas ondas fueron identificadas en condiciones semejantes a las de este experimento por Müller (1985), por Simpson (1989), y más recientemente por Bennett y Best (1996). En los experimentos se observó que al incrementarse la velocidad del flujo estas estructuras aumentaron su frecuencia. De una serie de imágenes de video se encontraron valores promedio de longitud de onda de $\lambda \approx 0.015 \pm 0.002$ m. Estas observaciones son consistentes con la aproximación de una capa delgada de cortante estudiada por Michalke (1964), quien reportó $\lambda = 7d$ ($d =$ espesor de vorticidad ≈ 0.0016 m). Es muy probable que este tipo de ondulaciones casi periódicas produzcan cambios en la longitud de la región de

4. Representación esquemática de los diferentes tipos de estructuras turbulentas generadas detrás de una forma de fondo en un canal de laboratorio



5. Perfiles de velocidad instantáneos generados con la técnica de burbujas de hidrógeno en la sección $x/h=1.0$, para $H=0.08$ m, $U = 0.23$ m/s y $Re = 18,400$



separación y en el caso de fondo móvil sean responsables del crecimiento de las formas de fondo.

2) *Boils o Kolks*. Se originan por la interacción del flujo acelerado que proviene de la pendiente ascendente de la duna, y las inestabilidades producidas por la deceleración del flujo, en la zona de separación detrás de la misma. Los *boils* observados aparecieron aguas abajo del punto donde se cierra la recirculación en la zona de separación, lo cual concuerda con observaciones de Nezu *et al.* (1997). En este trabajo también se encontraron estructuras de este tipo en dos puntos más sobre la pendiente descendente aguas abajo de la forma. Otros autores reportan que conforme se incrementó el tamaño de las formas de fondo, la magnitud y la frecuencia de las eyecciones relacionadas con los *boils* se incrementa penetrando en la región externa y algunas veces llega a interactuar con la superficie libre del agua. Esto a su vez pudo inducir un aumento en la velocidad del fluido hacia la pared. En este punto es importante hacer notar que en los perfiles de velocidad media, que se presentan más adelante, muestran una inflexión para $y/H \approx 0.6$ que se podría relacionar con el fenómeno de los *boils*.

3) *Vórtices verticales semejantes a pequeños tornados*. Se formaron en un número que varió en el tiempo y aparecieron y desaparecieron intermitentemente. Estos crecieron hasta el nivel de la cresta de la forma, y a partir de esa altura fueron barridos por el flujo exterior. Se considera que el mecanismo de generación de estos vórtices es semejante al descrito por Levi (1972) para la generación de vórtices, huracanes y tornados; se requieren dos elementos para generar vórtices: una masa de fluido estática y una corriente sobre ésta. Una característica de este tipo de vórtices es que su eje es normal a la interfaz, y aparecen en condiciones de

inestabilidad de flujo. En dicho modelo se propuso que existe una relación entre la cantidad de movimiento de la corriente y la fuerza centrífuga de los vórtices.

4) *Vórtices en embudo o cono (funnel)*. Estos vórtices se presentan sobre la pendiente descendente aguas abajo de la cresta en un cierto punto. Se abrieron en espiral conforme se separaron de la duna y se movieron en la dirección de la corriente principal. Este tipo de vórtices es semejante a los descritos por Kafatori *et al.* (1994), visualizados en la región de la pared sobre fondo plano.

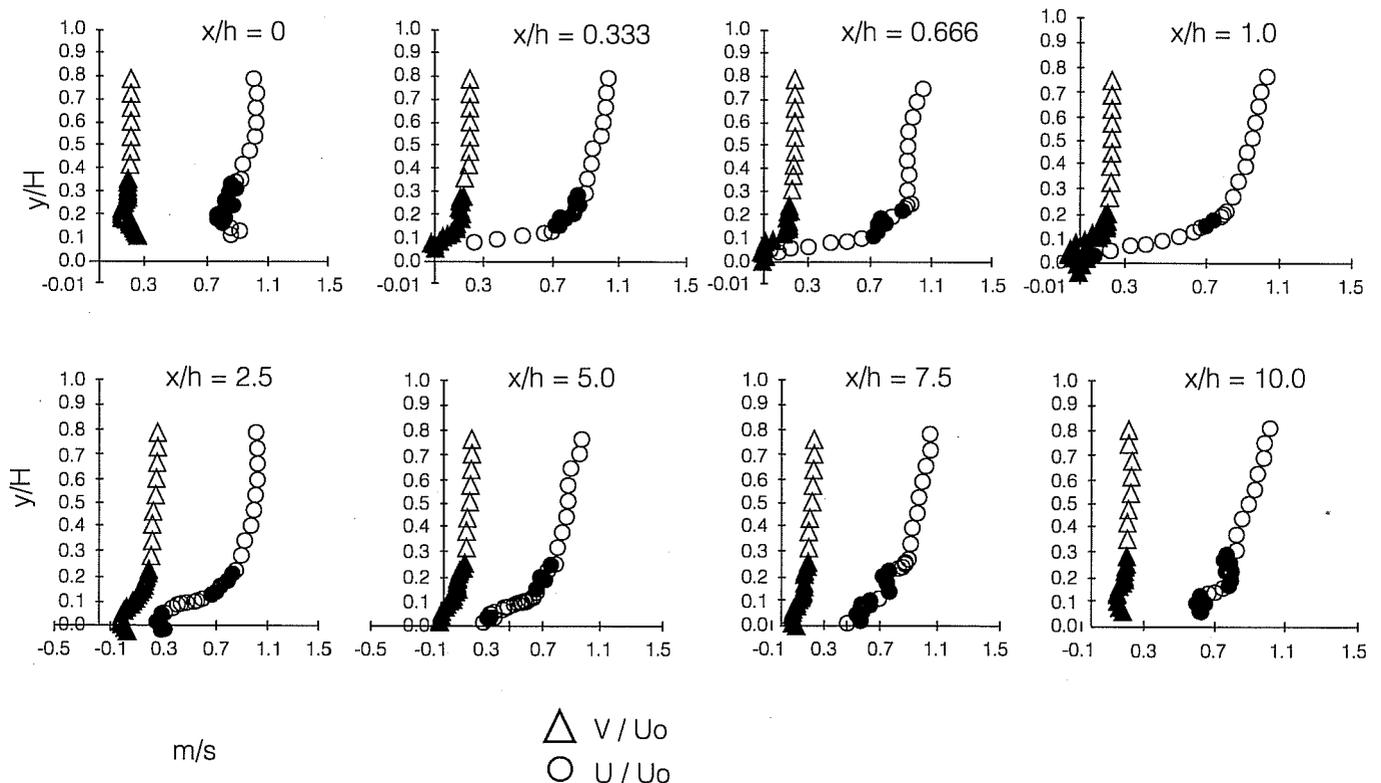
5) *Vórtices en forma de ojo*. Vórtices transversales a la dirección del flujo, en la zona de separación. Se observó que su tamaño fue variable y su máximo abarcó toda la zona de recirculación. Estos vórtices se rompieron intermitentemente formándose remolinos de escalas menores.

Para estimar la velocidad del flujo a partir de las trayectorias de las burbujas de hidrógeno se colocó un hilo en la sección $x/h = 1$. En la ilustración 5 se presentan los vectores de velocidad que resultaron del seguimiento del frente de burbujas en doce líneas, desde que se desprendieron del hilo hasta su desaparición, lo que llevó 0.24 s. El intervalo entre dos puntos con-

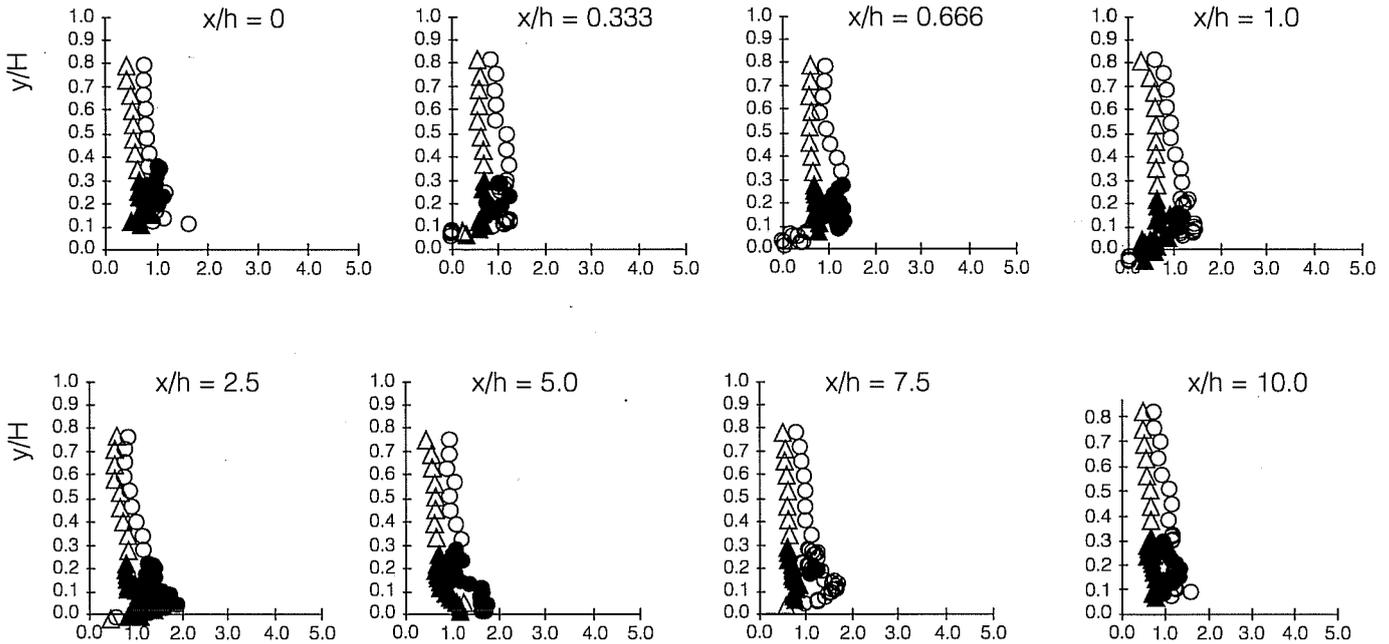
secutivos fue de 0.008 s. Con este tiempo y la distancia recorrida por la burbuja del frente se estimó la velocidad para los tiempos $t = 0.008$ s, 0.016 s, ... 0.24 s, con lo cual se obtuvieron aproximadamente 30 vectores de velocidad en cada línea. El origen de los vectores coincidió con las coordenadas de las burbujas para cada tiempo. En la parte superior, las velocidades presentaron pequeños cambios de dirección dando lugar a trayectorias en forma de ondas con pequeña amplitud. La magnitud de dichas velocidades fue del orden de dos a tres veces las correspondientes velocidades en la frontera inferior. En la parte cercana a la cresta se observó la estructura casi completa de un vórtice ojo con otro vórtice concéntrico dentro de él, similar a lo observado con la tinta. En el campo de flujo mostrado se presentó un comportamiento casi estable, donde las velocidades en un alto porcentaje del área fueron casi horizontales y en la zona de separación se observó una estructura en forma de ojo.

Los resultados obtenidos con esta técnica proporcionaron información valiosa sobre el comportamiento del flujo durante un tiempo definido, dentro de un espacio de análisis que comprendió al flujo principal y la zona de separación; sin embargo, se requirió aunar a

6. Perfiles de velocidad media adimensionales para $Re=18,400$



7. Perfiles de intensidad de turbulencia u'/u_* y v'/u_* , para $Re=18,400$



esto un análisis clásico de flujos turbulentos el cual requirió de información estadística; velocidades medias, intensidad de turbulencia y esfuerzos de Reynolds.

Perfiles de velocidad media

Para obtener la información estadística de la velocidad en cada punto de medición, se tomaron 1,024 datos por segundo (u_i). Con los valores medios de la velocidad se construyeron los perfiles normalizados con la velocidad media de la sección U_0 , U/U_0 , V/U_0 con respecto a y/H que se muestran en la ilustración 6. A partir de la sección $x/h = 0.33$ se observaron valores de cero para U/U_0 y V/U_0 cerca de la pared inferior, lo que indicó la presencia de una zona de separación de flujo. En las secciones $x/h=1$ y $x/h= 2.5$ los perfiles de velocidad V/U_0 presentaron valores negativos en la región $-0.1 \leq y/H \leq 0.1$. En la sección $x/h=5$ el perfil de U/U_0 comenzó a tener valores un poco mayores a cero en la región cercana a la pared y el perfil de V/U_0 presentó pocos valores negativos y ellos fueron muy cercanos a cero. A partir de la sección $x/h=7.5$ y hasta la $x/h=10$, los perfiles de U/U_0 se hicieron más uniformes y los perfiles de V/U_0 ya no presentaron valores negativos. En los perfiles de velocidad U/U_0 medios obtenidos en el presente estudio y también en algunos presentados por McCorquodale y Giratalla (1973) y por Müller (1985) se observaron dos puntos de inflexión, uno en la región cercana a la pared ($y/d \approx 0.25$) y otro

en la región cercana a la superficie libre del agua a ($y/d \approx 0.69$). En particular, estos puntos de inflexión se pueden relacionar con la inestabilidad del flujo producida en la parte inferior por la pared y en la parte superior debido a la interacción del aire con la superficie libre del agua. En el estudio de Grass (1971) los perfiles de velocidad instantáneos muestran puntos de inflexión a diferentes alturas y/H . Estos puntos de inflexión, Grass los relacionó con el paso de las estructuras *burst* hacia afuera de la pared. Grass observó que los *burst* se presentan para fondo liso y fondo rugoso. Bennett y Best (1996) observaron que los eventos de eyección asociados a la capa cortante sobre las dunas pueden extenderse hasta $0.6 H$ y algunas veces llegan hasta la superficie del agua, como los *boils* o estructuras turbulentas de mayor tamaño e intensidad. Como se puede ver en la sección de visualización, efectivamente, se presentan estructuras que llegan a interactuar con la superficie libre.

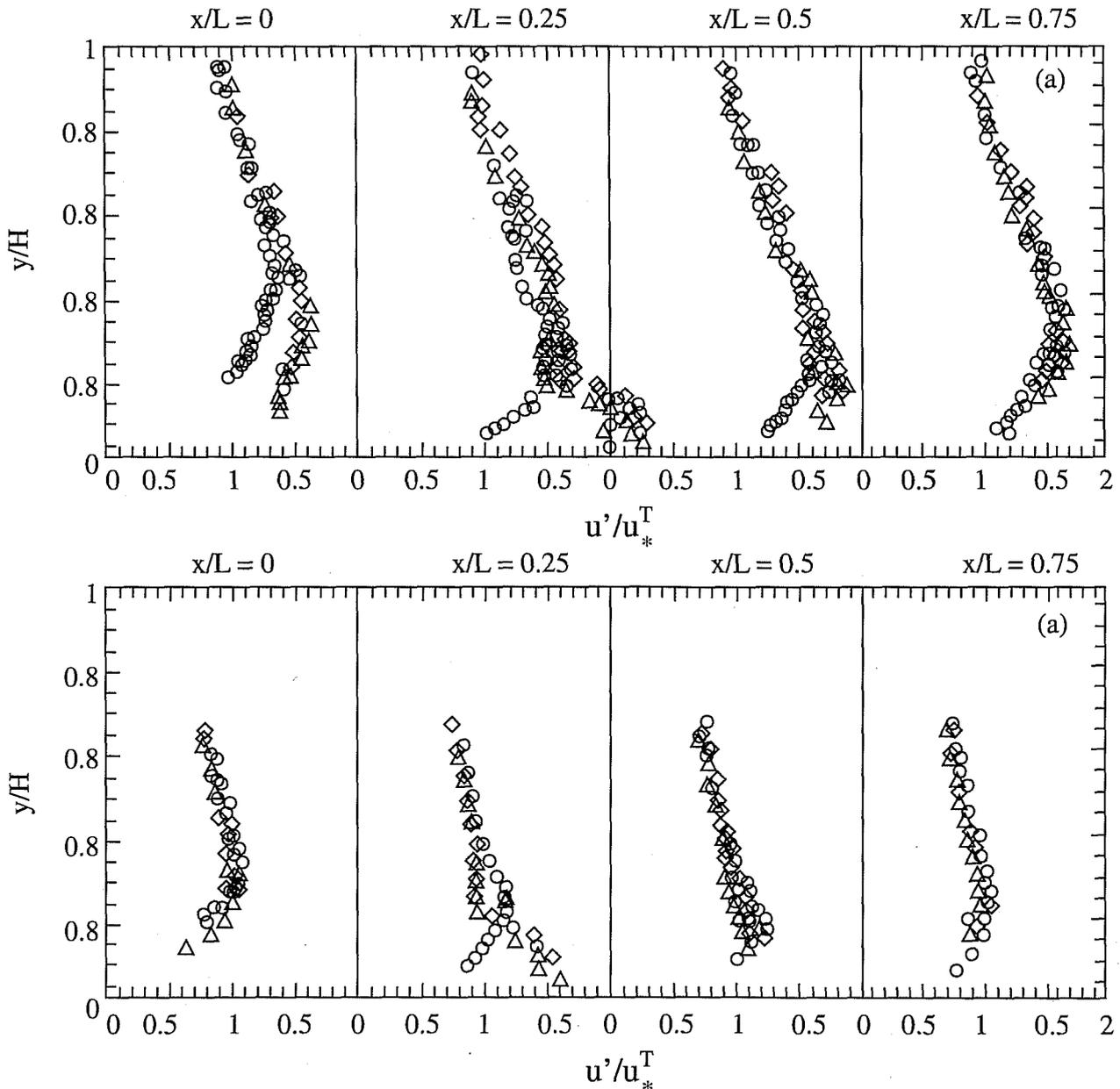
Intensidades de Turbulencia y Esfuerzos de Reynolds.

En la ilustración 7 se muestran los perfiles verticales de la raíz media cuadrada (*rms*) de las fluctuaciones de velocidad u'/u_* y v'/u_* vs. y/H . En ellos se observó que ambas componentes tienen valores semejantes en la región del flujo externo y son del orden de $u'/u_* \approx 1$ y $v'/u_* \approx 0.8$. Estos valores concuerdan con los presenta-

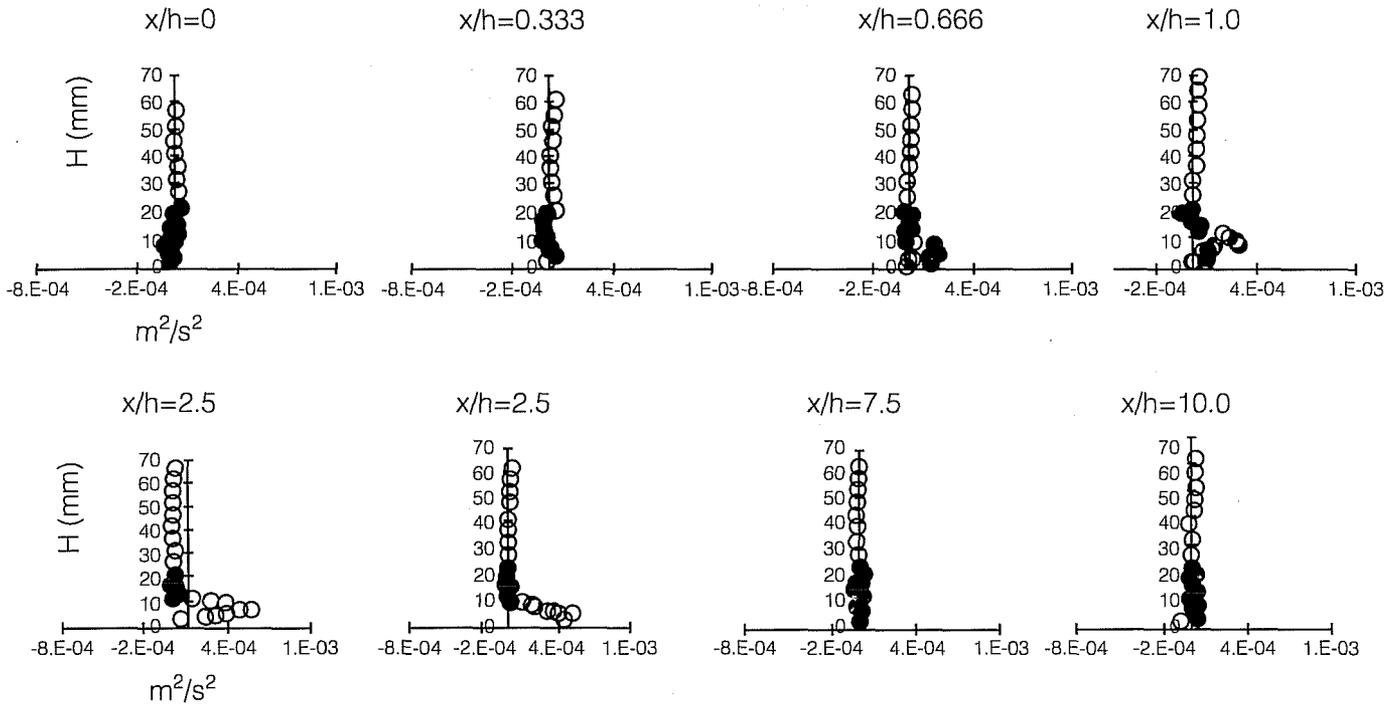
dos por otros investigadores como Lyn (1993), (ver ilustración 8). Los perfiles de u'/u_* y v'/v_* en las secciones $x/h= 2.5$ y 5 exhibieron máximos del orden de 2.0 , a una cierta distancia del fondo $y/H=0.03$ y $y/H = 0$, respectivamente. El desarrollo de la capa cortante de separación se relaciona con los máximos que se observaron aproximadamente abajo del nivel de la cresta de la duna. De estas figuras también se puede deducir que arriba de la capa cortante para $y/H > 0.2$ las relaciones u'/u_* y v'/v_* son casi constantes o varían muy

poco. Bennett y Best (1996) observaron que los valores máximos de la intensidad de turbulencia vertical y en sentido de la corriente ocurren cerca de la cresta y a lo largo de la zona de separación, y que están restringidos a una posición cercana al 20 % del tirante. Arriba de esta región los perfiles decrecen linealmente con la distancia a partir del fondo. En la sección $x/h=10$ los perfiles se hicieron más aplanados, los valores de intensidad de turbulencia decrecieron y fueron semejantes a los perfiles observados en la sección

8. Intensidades de turbulencia adimensionales: a) u'/u_* , b) v'/u_* (\diamond = caso 2 de Lyn, 1993)



9. Esfuerzos cortantes de Reynolds $u'v'$ para $Re=18,400$



cero. En estudios previos de separación de flujo se usó la máxima velocidad media, $U_{máx}$, para adimensionalizar las intensidades de turbulencia. Por ejemplo, Nakagawa y Nezu (1987) presentaron valores máximos de $u'/U_{máx} = 0.19$ y $v'/U_{máx} = 0.16$. En el caso de la presente investigación se alcanzaron valores máximos de $u'/U_{máx} = 0.13$ y $v'/U_{máx} = 0.087$ que se observaron cerca de la capa cortante. Si se comparan las intensidades de turbulencia obtenidas en un flujo sobre formas de fondo con las intensidades de turbulencia reportadas para fondo plano (Nezu y Rodi 1986; Nezu y Nakagawa, 1993), se observa que la forma de la distribución es semejante en la vertical, aunque con valores superiores para el caso de flujo sobre formas. Otra observación importante se refiere al efecto del ángulo del escalón en la generación de mayor o menor turbulencia a lo largo de la capa cortante. Ruck y Makiola (1987) observaron, para unas mismas condiciones, que los ángulos de 25° a 30° (que son los que se pueden relacionar con la pendiente de las dunas aguas abajo de la cresta) producían máximas intensidades de turbulencia.

Los perfiles de los esfuerzos cortantes de Reynolds $-u'v'/-u'v'$ se muestran en la ilustración 9, y presentaron características semejantes a las previamente observados en u'/u_* y v'/v_* . Esto es, los esfuerzos de Reynolds

se incrementaron en la línea de separación. En la sección $x/h=2.5$ se alcanzó un máximo para $y/H=0.125$ y decrecieron a cero cerca de la superficie del agua. En la sección $x/h=0$ los valores máximos fueron aproximadamente de la misma magnitud que los observados para $x/h=7.5$ indicando la periodicidad espacial del flujo sobre un conjunto de formas de fondo. Como en el caso anterior, los máximos se localizaron al nivel de la cresta, revelando un fuerte efecto de la capa cortante.

Conclusiones

Se realizó un estudio experimental para la caracterización del flujo turbulento en un canal con formas de fondo fijas triangulares. Por medio de la visualización de flujo se identificaron cinco tipos de estructuras coherentes asociadas con el flujo sobre formas de fondo, algunas de ellas anteriormente reportadas por otros autores: 1) Ondas de Kelvin-Helmholz, en la capa cortante generada en la cresta de la duna. 2) Boils o eyecciones de flujo de mayor intensidad, aguas abajo de la cresta de la duna. 3) Generación de vórtices verticales semejantes a pequeños tornados, en la línea de inicio de la nueva forma de fondo. 4) Vórtice tipo cono (funnel), en dirección del flujo. 5) Vórtices transversales tipo ojo, en la región de separación.

Con la técnica de anemometría de película caliente se obtuvieron perfiles de velocidad media, intensidades de turbulencia y esfuerzos de Reynolds. El análisis de las mediciones del presente estudio muestra que fueron consistentes con los presentados por Lyn (1993), van Mierlo y Ruiters (1988), McCorquodale y Giratalla (1973), Nelson *et. al.* (1993), y Bennett y Best (1996). Se encontraron puntos de inflexión en los perfiles de la velocidad media, que se atribuyeron a inestabilidades del flujo producidas en la parte inferior por la pared y en la parte superior por la interacción del aire con la superficie libre del agua. Pero también, se pueden deber al paso de las estructuras *burst* hacia afuera de la pared. Las intensidades de turbulencia y los esfuerzos de Reynolds sirvieron para determinar la capa cortante de separación que se formó aproximadamente aguas abajo al nivel de la cresta de la duna.

El análisis del campo de flujo con las técnicas de visualización junto con la de anemometría de película caliente permitieron mejorar el conocimiento de las macro estructuras del flujo. La dinámica de estas estructuras es de importancia fundamental para la comprensión de los procesos de transporte de sedimento en ríos.

Recibido: 30/XI/98
Aprobado: 3/VIII/99

Reconocimientos

Los autores agradecen al CONACYT el apoyo brindado a través del Proyecto 0733PA, al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua y al Centro de Investigaciones en Energía. A Alejandro Cisneros, David Jahen y Salvador Vargas por su participación en actividades experimentales.

Bibliografía

- Bennett, S.J., y Best, J.L. 1996. Mean Flow and Turbulence Structure over fixed ripples and the ripple-dune Transition, *Coherent Flow Structures in Open Channels*, editado por P.J. Ashworth, S.J. Bennett, J.L. Best and S.J. Mc Lelland. John Wiley & Sons Ltd.
- Espinoza, J., Caldiño, I., Figueroa, J. 1995. Construcción, pruebas y operación de módulos experimentales: Canal de fondo móvil del IMTALAB, Informe Técnico, Proyecto CH-9511, *Instituto Mexicano de Tecnología del Agua*, México.
- Fredsoe, J. 1982. Shape and dimensions of stationary dunes in rivers. *J. Hydr. Div.*, ASCE, vol. 108 (8) ,pp. 432-497.
- Grass, A. J. 1971. Structural features of turbulent flow over smooth and rough boundaries, *J. Fluid Mech.*, vol. 50, 233-255.
- Itakura, T., y Kishi, T. 1980. Open channel flow with suspended sediment on sand waves, *Proc. 3rd International Symposium on Stochastic Hydraulics* (Ed. By Kikkawa and Y. Iwasa), pp. 599-609, Int. Ass. of Hydraul. Res., Tokyo.
- Jackson, R. G. 1976. Sedimentological and fluid-dynamic implications of the turbulent bursting phenomenon in geophysical flows, *J. Fluid Mech.*, vol 77, pp 531-560.
- Kaftori, D., Hetsroni, y Banerjee. 1994. Funnel-shaped vortical structures in wall turbulence, *Phys. Fluids* 6, pp 3035.
- Levi, E. 1972. Experiments on unstable vortices, *J. Eng. Mech. Div.*, vol. 98, pp. 539-559.
- Lyn, D. A. 1993. Turbulence measurements in open-channel flow over artificial bedforms, *J. Hydraul. Engrg.*, vol. 119, 304-326.
- McCorquodale, J. A. y Giratalla, M. K.. 1973. Flow over natural and artificial ripples, *Proc. 15th Congress, Inter. Assoc. Hydraul. Res.*, Istanbul, I, A22-1-A22-6.
- Michalke, A. 1964. On the inviscid instability of the hyperbolic tangent velocity profile, *J. Fluid Mech.*, vol. 19, 543-56.
- McLean, S. R., Nelson J. M. y Wolfe, S. R. 1994. Turbulence structure over two-dimensional bedforms: implications for sediment transport, *J. Geophys. Res.*, vol. 99, pp 12727-12747.
- Müller, A. 1985. An experimental investigation of the Mixing Layer behind Dunes with combined Flow visualization and Velocity Measurement, *Proc. International Symposium on Refined Flow Modelling and Turbulence Measurements*, University of Iowa, Iowa.
- Nakagawa, H. y Nezu, I. 1987. Experimental investigation on turbulent structure of backward-facing step flow in an open channel, *J. Hydraul. Res.*, vol. 25, pp. 67-88.
- Nelson, J. M., McLean, S. R. y Wolfe, S.R. 1993. Mean flow and turbulence fields over two-dimensional bed forms, *Water Resour. Res.*, vol. 29, pp. 3935-3953.
- Nezu, I., Nakagawa, H., Tominaga, A. y Yoshikawa, M. 1980. Visual study of large-scale vortical motions in open-channel flows, *Ann. Conf. Jap. Soc. Civ. Engrs.*, Kansai-Branch, II-10.
- Nezu, I, y Rodi, W. 1986. Open Channel flow measurement with a laser Doppler anemometer, *J. Hydraul. Engrg.*, ASCE, vol.122, pp 335-355.
- Nezu, I., Nakagawa, H. (1993). Turbulence in open-channel flows, *IAHR monograph*, A. A. Balkema.
- Nezu I., Kadota A., Shinbashi H., Kurata M. 1997. Conditional Sampling Analysis on Coherent Vortices in Unsteady Open-channel Flows over dune bed., *Environmental and Coastal Hydraulics*, ASCE, pp 1207-1217.
- Rao, K. N., Narashimha, R. y Badri Narayanan, M. A. 1971. The bursting phenomenon in a turbulent boundary layer, *J. Fluid Mech.*, vol. 48, pp. 339-352.
- Robinson, S., 1991. Coherent motions in the turbulent boundary layer, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, pp 601-639.

- Raudkivi, A. J., 1963. Study of sediment ripple formation, *ASCE J. Hydraul. Div.*, vol. 89, pp. 15-33.
- Ruck, B. y Makiola, B. 1987. Flow over a single-sided backward facing step with step angle variations, Turner, J. T. Ed., *Proc. 3rd Int. Conf. Laser Anemometry*, pp 369-378.
- Simpson, R. L., 1989. Turbulent boundary-layer separation, *Ann. Rev. Fluid Mech.*, vol. 21, pp. 205-34.
- Van Mierlo, M. C. L. M., y Ruiter, J. C. C. 1988. Turbulence measurements above artificial dunes, *Delft Hydraulics, Q789*, Vols. 1 y 2, enero y marzo 1988.
- Vanoni, V. A. y Hwang, L. S. 1967. Relation between bed forms and friction in streams, *ASCE J. Hydraul. Div.*, vol. 93, pp 121-144.
- Yalin, M. S., 1977. *Mechanics of Sediment Transport*, 2nd dn., Pergamon Press, Oxford, 219 pp.

Abstract

Espinoza J.; P. Martínez-Austria; J. Rojas; F. Avila. "Fixed bed forms laboratory channel flow analysis". *Hydraulic Engineering in Mexico (in Spanish)*. Vol. XV, núm. 2, pages. 75-84, may-august, 2000.

Experimental results of the flow characteristics in an open channel with an array of triangular bidimensional fixed bed forms were obtained. The open channel was of 20 m length and 1 m width and 0.08 m depth, with permanent flow for Reynolds numbers ($Re = U_o H/\nu$) between 12,000 and 28,000. Flow visualization, with dye and hydrogen bubbles, was used for qualitative description of the different coherent macro-structures behind one of the bed forms. The main findings were structures like Kelvin-Helmholz waves in the shear layer between the main flow and the staged flow behind the bed forms; boils or ejected flow of large intensity, downstream face; vertical vortices in the starting point of a bed form; funnel vortices in the streamwise direction and transversal vortices in the separation zone. Once the more relevant flow characteristics were identified, a hot film anemometer was used to get mean velocities, turbulent intensities and Reynolds stresses. The mean velocity profiles shown that the reattachment point was oscillating around $5h$ (h is bed form high). The results were in agreement with those presented by Nakagawa y Nezu (1987) for a back step flow. The turbulence characteristics were of the same order of magnitude and similar distribution as those presented by Lyn (1993). The Reynolds stresses profiles were closed related to those of Nelson et al (1993) with a maximum value in the recirculation region. The information obtained with the techniques mentioned are relevant for the interpretation of the origin of the turbulence macro-structures in open channels with fix bed forms.

Key words: bed forms, dunes, coherent structures, flow visualization, turbulent flow in open channels, experimental techniques, turbulence, sediment transport.

Dirección institucional de autores:

Joselina Espinoza Ayala

Especialista del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Correo electrónico: jespinoz@tlaloc.imta.mx

Polioptró Martínez-Austria

Coordinador de Tecnología Hidráulica del
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Correo electrónico: polioptr@tlaloc.imta.mx

Jorge Rojas Menéndez

Especialista del Centro de Investigación de Energía-UNAM
Correo electrónico: jrm@tmazatl.uie.unam.mx