

## Estructuras coherentes turbulentas en canales abiertos con fondo liso

Fabián López  
Yarko Niño  
Marcelo García

Universidad de Illinois en Urbana-Champaign, EUA

*Se reportan resultados de un estudio experimental orientado a la caracterización de estructuras coherentes turbulentas cerca del lecho en flujo en canales abiertos hidráulicamente lisos. La técnica empleada permitió la sincronización de imágenes de video y datos de velocidad y esfuerzos de corte a frecuencias elevadas (500Hz) medidos con anemómetros de película caliente, lo que condujo a la obtención de datos, tanto visual como cuantitativamente, sin precedentes en el campo de la investigación de estructuras coherentes. El análisis de la información posibilitó la identificación y caracterización tanto geométrica como cinemática de las estructuras observadas, así como la determinación del campo de flujo asociado a estos eventos. Los resultados revelan la naturaleza intermitente de las estructuras coherentes y su estrecha relación con el mecanismo de transferencia de energía, desde el flujo medio hacia las fluctuaciones turbulentas de mayor escala.*

**Palabras clave:** canales abiertos, turbulencia, estructuras coherentes, superficies de corte, sincronización, video de alta velocidad, anemómetros.

### Introducción

En flujos estacionarios, la estructura general de la turbulencia se refleja en el balance local entre producción, transporte y disipación de energía cinética, procesos que a su vez ocurren a diferentes escalas turbulentas. En capas límite el rol principal lo representa la producción, responsable del mantenimiento de la turbulencia, que convierte energía del flujo medio en energía de las fluctuaciones y, por lo tanto, contrarresta los efectos de disipación y transporte. Desde los primeros trabajos experimentales del grupo de Stanford (Kline *et al.*, 1967), se han desarrollado numerosas investigaciones, tanto de laboratorio como numéricas, que han contribuido a la definición del concepto de una estructura coherente de la turbulencia en capas límites (Robinson, 1991). No obstante es menester destacar que, salvo contadas excepciones, la mayoría de los estudios han sido desarrollados para el caso de capas límite en túneles de viento y flujos en ductos cerrados, con pocas investigaciones en el área del escurrimiento en canales abiertos.

Los mencionados estudios demuestran que la coherencia se manifiesta en la aparición cuasi-periódica de eventos de similares características, los más estudiados se relacionan con las estrías de baja y alta velocidad en subcapas viscosas, los vórtices de horquilla, las superficies de corte inclinadas, los eventos conocidos como eyecciones y barrido, etc. El calificativo de *bursting* es usualmente empleado para designar el mecanismo asociado a la eyección de estrías de baja velocidad desde regiones cercanas a la pared, hacia zonas de mayor cantidad de movimiento.

Hoy en día, existe consenso en describir al fenómeno de *bursting* mediante un modelo de vórtice de horquilla, cuya validez ha sido establecida tanto de visualizaciones experimentales como de promedios condicionales de campos de flujo, obtenidos de simulaciones numéricas. En resumen este modelo consiste en la oscilación de un vórtice transversal en la subcapa viscosa debido a perturbaciones tridimensionales, y en el crecimiento del mismo con la formación de una cabeza que, debido a un flujo autoinducido, se levanta gradualmente, alejándose del lecho (Nezu y Nakagawa, 1993).

Una gran cantidad de modelos han sido propuestos para describir conceptualmente las diferentes etapas en el desarrollo de estructuras coherentes. Uno de los más difundidos es el de Smith (1984), quien, basándose en resultados de observaciones visuales en capas límites, principalmente, propuso un modelo idealizado de la evolución del fenómeno de *bursting* para flujos en paredes lisas, que contempla una doble estructura de la turbulencia en donde los vórtices de horquilla se presentan tanto individual (con inclinaciones cercanas a los 45°), como aglomeradamente, formando una estructura de mayor escala, inclinada aproximadamente 20° respecto de la pared.

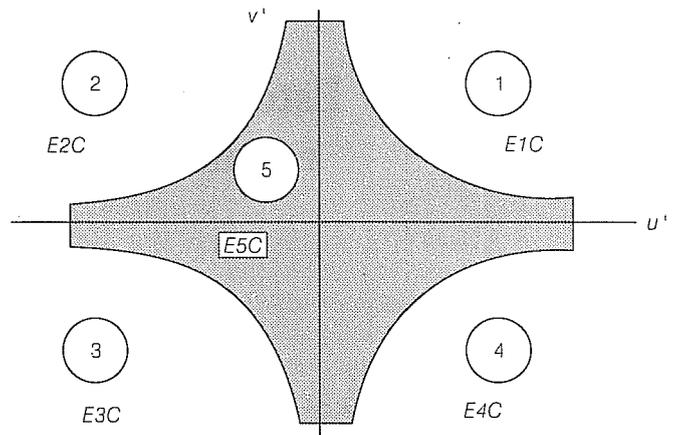
Respecto a las características más relevantes de las principales estructuras coherentes, los resultados tanto experimentales como numéricos en capas límites y canales, indican una separación transversal de aproximadamente cien unidades de pared ( $v/U_*$ , donde  $v$  representa la viscosidad cinemática del fluido y  $U_*$  la velocidad de corte media) de las estrías en la subcapa viscosa, independiente del número de Reynolds (Robinson, 1991). Por otra parte, las superficies de corte observadas, asociadas por cierto a la eyección de estrías de baja velocidad desde la pared, presentan inclinaciones entre 15 y 30°, con formas bien definidas, que persisten en el tiempo a medida que la estructura se traslada aguas abajo a velocidades convectivas medias de aproximadamente  $10U_*$  (Luchik y Tiedermann, 1987; Rajagopalan y Antonia, 1979; Thomas y Bull, 1983; Guezennec *et al.*, 1989).

Es precisamente la inclinación de estas estructuras la responsable de un retraso en el valor pico de la correlación cruzada entre fluctuaciones de velocidades longitudinales y de esfuerzos de corte en la pared (Rajagopalan y Antonia, 1979).

La ocurrencia de estos eventos coherentes guarda una estrecha relación con la dinámica de la turbulencia. En la actualidad es universalmente aceptado que la mayoría de la producción de turbulencia se encuentra concentrada en eventos intermitentes, cuasi-periódicos tanto en el espacio como en el tiempo, denominados *bursts* (o eyecciones) y *sweeps* (o eventos de barrido). Estos eventos se clasifican según cuadrantes en el plano  $u'-v'$  (donde  $u'$  y  $v'$  representan fluctuaciones longitudinales y verticales de velocidad, respectivamente, ilustración 1), las eyecciones corresponderían a eventos del segundo cuadrante ( $E2C$ ), mientras que los eventos de barrido se ubicarían en el cuarto cuadrante ( $E4C$ ).

Si bien ambos eventos contribuyen tanto al transporte turbulento de cantidad de movimiento (esfuerzos de Reynolds) como a la producción turbulenta de energía cinética, resultados experimentales demue-

### 1. Subdivisión esquemática del plano $u'-v'$



tran que los eventos de eyección son responsables de la principal contribución a estos procesos en canales abiertos con lecho hidráulicamente liso, excepto en regiones cercanas a la superficie libre (Nakagawa y Nezu, 1977). Por ejemplo, a distancias del lecho igual a 38 unidades de pared Nakagawa y Nezu (1977) encontraron que eventos  $E2C$  y  $E4C$ , presentes solo 4% del tiempo total, realizan contribuciones relativas a los esfuerzos de Reynolds del orden del 30% y 10%, respectivamente.

Lo anterior manifiesta claramente el predominio de las eyecciones y la alta intermitencia de la producción de energía y del transporte turbulento de cantidad de movimiento. En general, en capas límites turbulentas con paredes sólidas, la mayoría de la producción de turbulencia se encuentra concentrada en regiones cercanas a la pared, a menos de cien unidades viscosas.

Por otra parte, trabajos experimentales de Talmon *et al.* (1986) demostraron que el 90% de las contribuciones provenientes del segundo cuadrante de magnitud  $K u' v'$  con  $K > 2$  corresponden a eyecciones de estrías de baja velocidad, caracterizadas por violentas eyecciones de fluido desde regiones cercanas a la pared, y por lo tanto de baja cantidad de movimiento, hacia regiones de mayor velocidad.

Desde un punto de vista hidráulico, la completa caracterización de eventos coherentes, vinculados a la producción de turbulencia y al transporte turbulento de cantidad de movimiento, resulta relevante para una comprensión acabada de otros mecanismos íntimamente relacionados, como por ejemplo el transporte de sedimentos.

En particular, resulta de gran interés estudiar la relación entre la ocurrencia de estos eventos intermitentes y cuasi-periódicos y la resuspensión de sedimentos desde el lecho en canales abiertos (Niño *et al.*, 1994).

En este trabajo se presentan resultados experimentales de la aplicación de recientes tecnologías (video de alta velocidad) con el fin de conciliar resultados de visualizaciones de flujo y datos adquiridos a partir de un sensor local, de manera que se puedan identificar, estudiar y caracterizar estructuras coherentes en canales abiertos, así como el campo de flujo asociado a las mismas.

Empleando señales de sincronización por vez primera se obtuvieron registros simultáneos de alta frecuencia (500 Hz) de imágenes de video y de señales analógicas de anemómetros de película caliente que permitieron la especificación de las principales características del fenómeno de *bursting* en canales abiertos.

## Trabajo experimental

### Infraestructura experimental

Los experimentos se desarrollaron en un canal de madera de pendiente variable de 18.6 m de largo, 0.30 m de ancho y 0.18 m de alto. La pendiente se fijó en 0.0009. La sección de trabajo se encuentra ubicada 12 m aguas abajo de la entrada del canal, la longitud es de 0.90 m, con su pared lateral derecha de acrílico, para permitir la observación del flujo. Se utilizaron dos tipos de anemómetro de película caliente, un sensor hemisférico para velocidad y un sensor para esfuerzos de corte montado al ras del lecho del canal.

La adquisición de datos se realizó con una tarjeta de conversión analógico/digital (A/D), conectada a una computadora personal, y un *software* especial. El equipo empleado posee la característica de digitalizar dos canales simultáneamente con diferentes opciones de disparo para iniciar la adquisición de datos.

Para la adquisición de las imágenes se empleó un equipo de video Kodak Ektapro TR de alta velocidad, que permite la grabación de hasta mil cuadros por segundo en el modo de pantalla completa, y hasta seismil por segundo en pantalla dividida. El empleo de luz estroboscópica, sincronizada con el equipo de video, permitió la correcta exposición de las imágenes cerca del lecho del canal.

El sistema de video emite una señal sincronizada que hizo las veces de disparador para la adquisición de los datos de los sensores, simultáneamente con la filmación de las imágenes. Estas últimas fueron luego digitalizadas en una computadora personal, mediante un grabador de imágenes, *frame grabber*, y analizadas mediante un *software* de dominio público, denominado *Image*, del Instituto Nacional de Salud de los Estados Unidos de América.

### Método experimental

Las señales analógicas de los sensores y las imágenes de video se adquirieron sincronizadamente, según se explicó anteriormente. El sensor de velocidad, que permitió la medición de la componente longitudinal de la velocidad, se ubicó a 2.5 mm del fondo y a 10 mm aguas abajo del sensor de esfuerzos de corte.

Resultados preliminares mostraron que esta distancia relativa entre ambos sensores maximizaba la correlación cruzada de ambas señales para el rango de número de Reynolds del presente trabajo. Una solución de arcilla blanca en agua, empleada como trazador de las estructuras coherentes, se inyectó a través de un orificio practicado en el lecho del canal, a unos 30 mm aguas arriba del sensor de esfuerzos de corte.

La inyección del trazador se controló con el fin de minimizar las perturbaciones del flujo en el canal y permitir el desplazamiento de la solución cerca del lecho antes de que eventos turbulentos generaran la eyección del trazador. En particular, esta técnica permite la visualización de eyecciones de flujo desde el lecho (*E2C*), pero no provee información alguna respecto a la estructura del flujo en regiones alejadas de la pared, ni es eficiente tampoco en la demarcación de *sweeps*.

La serie de datos proveniente de los anemómetros, adquirida a una frecuencia de 500 Hz, permite satisfacer el criterio de Nyquist, dado que las máximas frecuencias en el espectro turbulento de las velocidades fue de aproximadamente 200 Hz, mientras que las correspondientes al esfuerzo de corte fueron del orden de 90 Hz. Cada serie consistió de 15 000 datos.

Asimismo se grabaron imágenes de video en pantalla completa, a una tasa de 500 cuadros por segundo, lo que permitió una correspondencia directa entre los datos analógicos de los sensores y las señales de video.

### Condiciones experimentales

El trabajo, desarrollado en circunstancias de flujo uniforme en un canal hidráulicamente liso, abarcó tres números de Reynolds en condiciones experimentales (Tabla 1) donde  $h$  representa la profundidad del flujo,  $U_m$  la velocidad media en la sección transversal al flujo, y  $Re$  el número de Reynolds definido como  $Re = U_m h / \nu$ . La velocidad de corte fue estimada a partir de un ajuste por mínimos cuadrados a la ley semilogarítmica de velocidades medias (López, 1994). El sistema cartesiano adoptado en el estudio posee el eje de abscisas  $X$  alineado con la dirección media del flujo, y el eje de ordenadas  $Y$  perpendicular al lecho del canal.

1. Condiciones experimentales

$h$ (m)	$U_m$ (m/s)	$U_*$ (m/s)	$Re$
0.023	0.231	0.016	5300
0.036	0.344	0.020	12400
0.044	0.412	0.022	18100

Método de análisis

El análisis de series de velocidad y esfuerzo de corte permitió determinar valores medios y varianzas, así como también momentos de orden superior para cada serie. De igual manera se calcularon correlaciones cruzadas entre velocidad y esfuerzo de corte en el lecho.

El análisis de las imágenes de video proveyó la información necesaria acerca del tipo de estructura coherente, así como de la geometría y velocidad convectiva de las mismas.

Las superficies de corte, *shear-layers*, (Robinson, 1991), resultantes de la eyección de fluido de baja cantidad de movimiento desde el lecho hacia regiones de mayor velocidad, son las estructuras de ocurrencia más frecuentes y las analizadas con mayor detalle mediante un criterio visual que permitió detectarlas en las imágenes y efectuar promedios condicionales del campo de velocidad y esfuerzo de corte asociado, registrado por los sensores.

Asumiendo la hipótesis de Taylor, *frozen turbulence*, las velocidades convectivas, determinadas a partir de la digitalización de las imágenes, se emplearon para transformar datos puntuales temporales en variaciones espaciales en la dirección del flujo. En efecto, según esta hipótesis:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = -U_c \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (1)$$

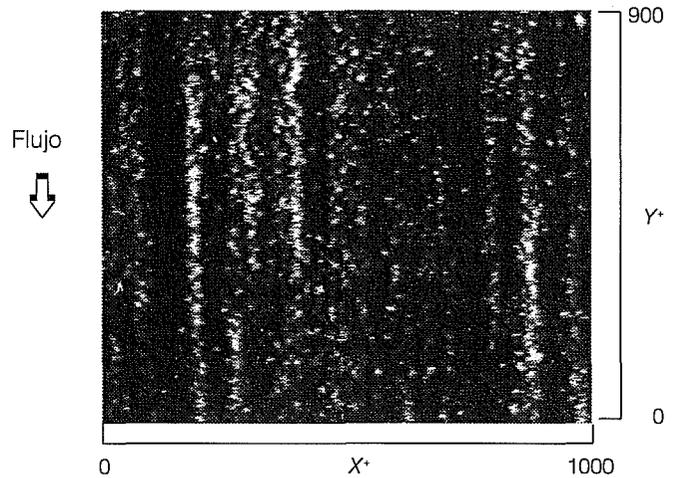
donde  $\phi$  representa el valor instantáneo de una variable medida y  $U_c$  es una velocidad convectiva característica.

Resultados

Tipo de estructuras observadas

El análisis de resultados demuestra la existencia de, al menos, cinco tipos de estructuras coherentes diferentes (Robinson, 1991):

2. Estrías de baja velocidad en la subcapa viscosa demarcadas por granos de arena fina de 94  $\mu\text{m}$  de diámetro.  $Re = 9000$



- Estrías de baja velocidad en la subcapa viscosa, *streaks*
- Superficies de corte inclinadas cercanas al lecho
- Eyecciones de fluido de baja velocidad desde el lecho
- Estructuras *vorticosas*
- Eventos de barrido, *sweeps*, y regiones de alta velocidad en la subcapa viscosa.

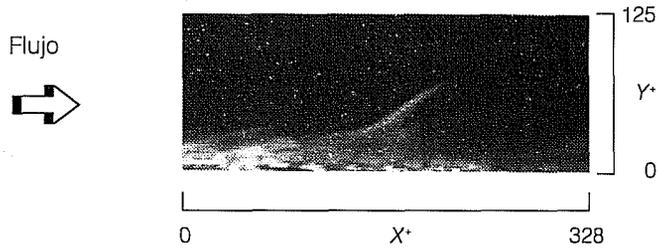
Como consecuencia de la periodicidad espacial del fenómeno de *bursting* la subcapa viscosa presenta una estructura característica con regiones de marcada diferencia en velocidad longitudinal (Kline *et al.*, 1967). Regiones de alta y baja velocidad en la subcapa viscosa, adyacente al lecho del canal, se apreciaron a través de la visualización de partículas de arena 200  $\mu\text{m}$  ( $D^* = 3,20$ ) de diámetro.

En la ilustración 2 se observan claramente regiones de marcada diferencia en cuanto a su actividad turbulenta. La longitud de onda promedio medida entre estas estrías, o periodicidad espacial, coincide con lo aceptado universalmente,  $\lambda^* (= \lambda U_* \nu) = 100$ . En adelante + será empleado para indicar adimensionalizaciones con unidades de pared o viscosas.

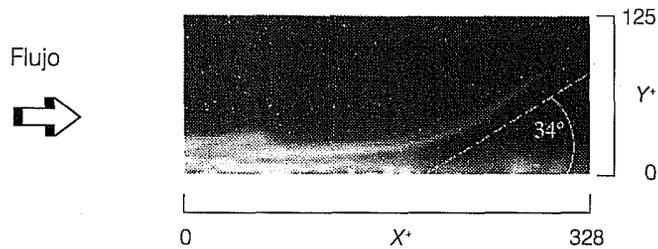
Respecto a las estructuras caracterizadas por una superficie de corte inclinada cercana al lecho, se detectaron dos subtipos:

- Uno con poco desarrollo vertical, de relativa baja frecuencia de aparición, y con la presencia de un vórtice transversal (ilustración 3)
- Otro, detectado más frecuentemente, se caracteriza por su mayor extensión en la vertical sin mostrar la existencia de vórtices en su desarrollo (ilustración 4)

3. Superficie de corte y vórtice de horquilla.  $Re = 15750$



4. Segundo tipo de superficies de corte.  $Re = 15750$

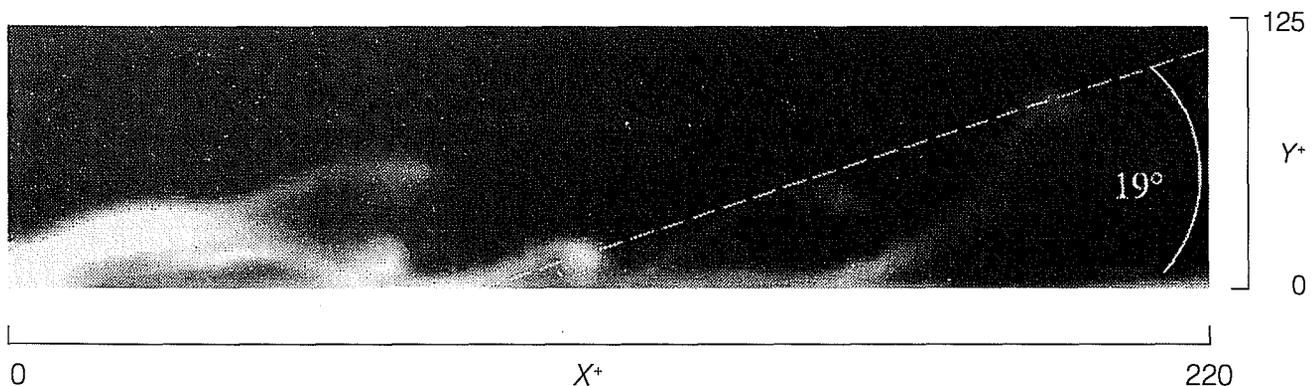


El vórtice circular observado en la ilustración 3 es una reminiscencia del tipo de estructura denominada horquilla (Robinson, 1991), asimismo se aprecia una región de eyección de fluido inmediatamente por debajo de dicho vórtice a una distancia entre 200 y 350 unidades de la pared ( $X^+$ ) aguas abajo de la raíz de la estructura.

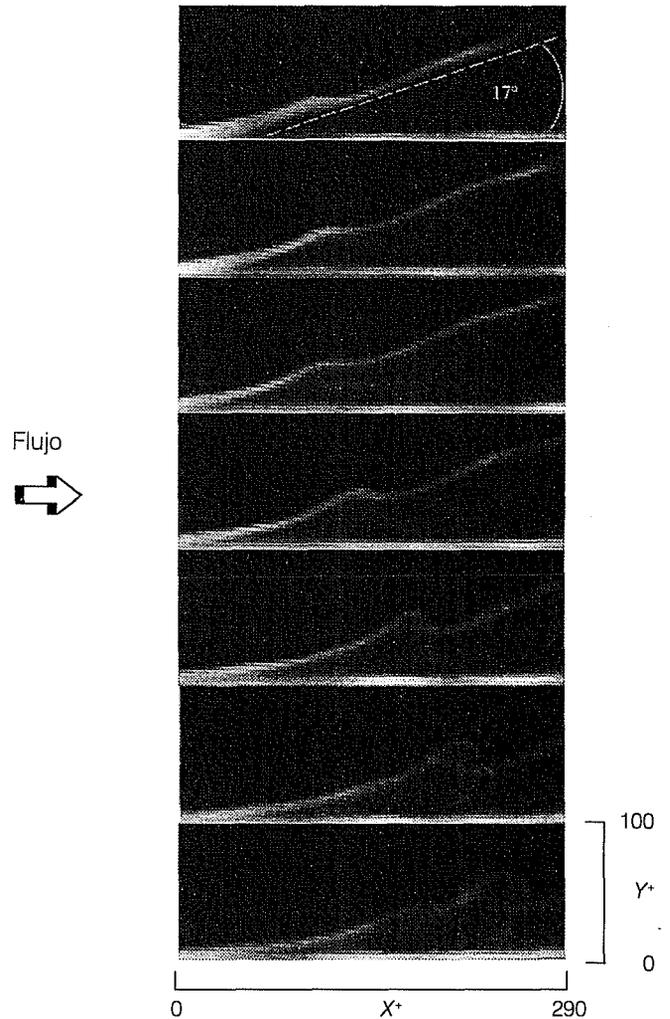
En los experimentos correspondientes al mayor número de Reynolds se notó la aglomeración de este tipo de estructuras (ilustración 5), lo que tendería a confirmar el modelo conceptual de coalescencia longitudinal debido a Smith (1984).

5. Aglomeración de vórtices de horquilla. Coalescencia longitudinal.  $Re = 5300$

Flujo →



6. Secuencia de inestabilidades en superficies de corte. Imágenes separadas 0.012 s.  $Re = 5300$



Se detectaron, además, algunos eventos en los que la superficie de corte experimenta procesos de inestabilidad (ilustración 6, vista por un observador desplazándose a la velocidad convectiva de la estructura). El origen de estas inestabilidades estaría asociado a mecanismos de interacción entre regiones de flujo alejadas de la pared, *outer flow regions*, y zonas de producción de turbulencia (Praturi y Brodkey, 1978).

Cabe destacar que, según resultados preliminares, la dimensión de los vórtices observados en las estructuras mencionadas resulta del orden de la microescala de Taylor (ilustración 7).

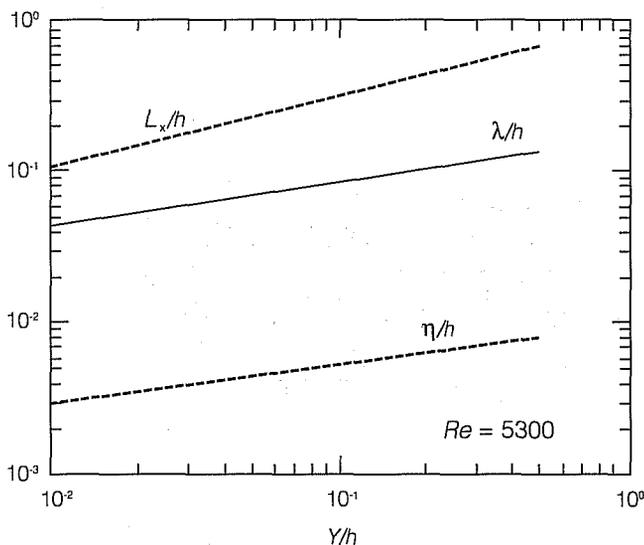
**Características principales**

Las estructuras se manifestaron con una frecuencia de aproximadamente 0.0032 unidades de pared, coincidiendo con valores de observaciones experimentales obtenidos a partir de la aplicación de algoritmos de detección a series de velocidad (Blackwelder y Haritonidis, 1983).

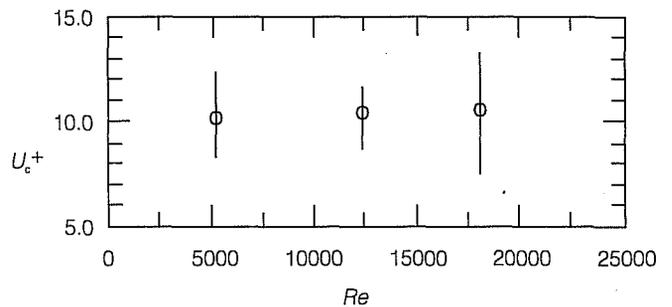
Las estimaciones de velocidades convectivas de las estructuras,  $U_c$ , tanto a partir de la digitalización de imágenes como de resultados de correlaciones cruzadas entre velocidades y esfuerzos de corte, confirman la escala interna de los eventos, arrojando valores casi constantes de  $U_c = 10 U_*$  para el rango de números de Reynolds analizado (ilustración 8).

En las imágenes se aprecian ángulos de inclinación de las estructuras entre 15 y 30°, lo que implica el retraso en las correlaciones entre fluctuaciones de velo-

**7. Tamaño adimensional de vórtices transversales comparado con macroescalas turbulentas ( $L_x/h$ ), microescalas de Taylor ( $\lambda/h$ ) y de Kolmogorov ( $\eta/h$ )**



**8. Velocidad convectiva de estructuras, adimensionalizada con unidades de pared. Los símbolos representan valores medios y las líneas verticales indican dos desviaciones estándar**



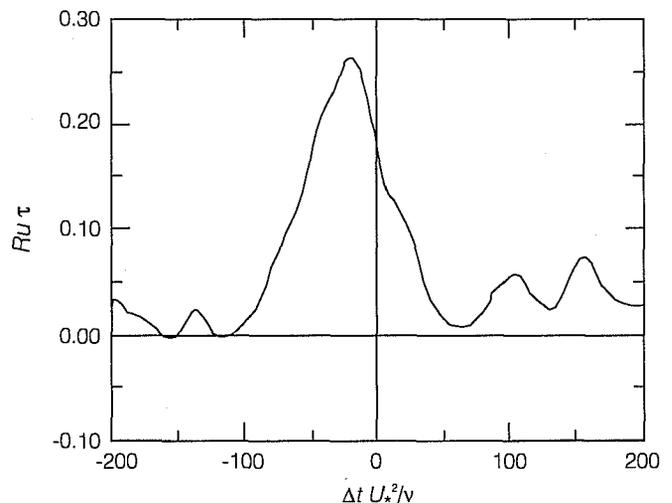
idades longitudinales y de esfuerzos de corte; circunstancia que algunos autores aprovechan para proponer condiciones de contorno en la simulación numérica de turbulencia, *large eddy simulation* (Piomelli et al., 1989). Este retraso resulta claramente apreciable en la ilustración 9.

**Campo de flujo asociado**

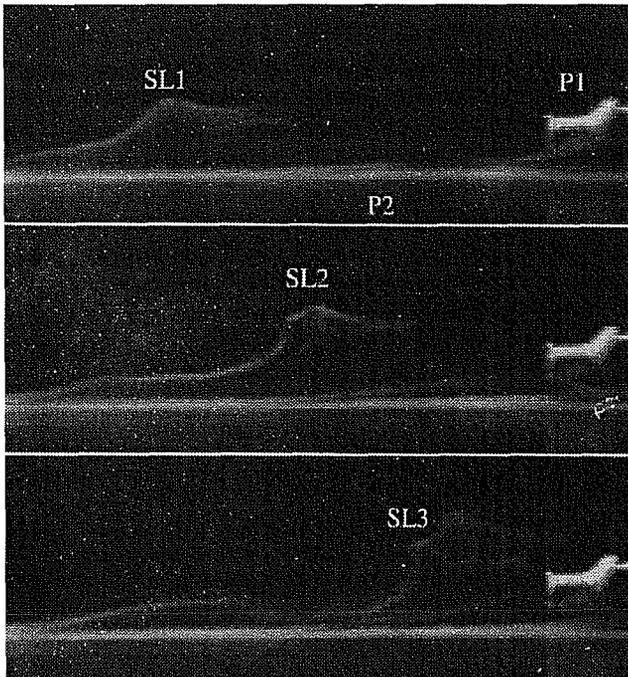
La ilustración 10(a) muestra como ejemplo una secuencia de imágenes de una estructura coherente, trasladándose aguas abajo y levantándose desde el lecho. La separación temporal de las imágenes es de 0,04 s para un  $Re = 5300$ . El sensor de velocidades (denominado P1) se observa en el extremo derecho. Por el contrario el sensor de esfuerzos de corte no resulta visible, pero su posición ha sido indicada como P2 en la imagen superior.

La ilustración 10(b) muestra el resultado de la digi-

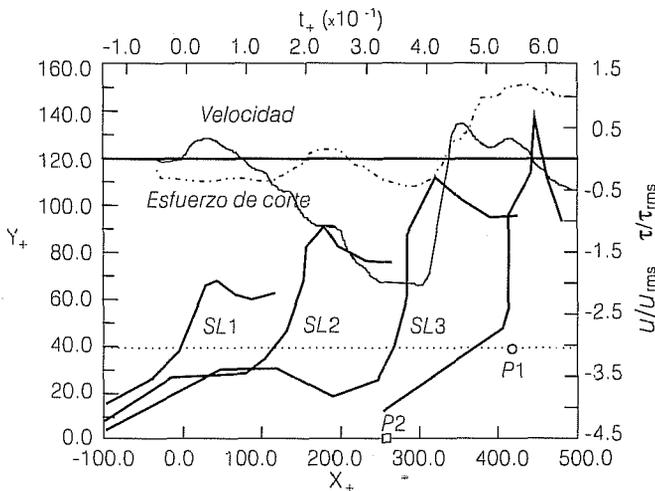
**9. Correlación cruzada entre fluctuaciones de velocidad longitudinal y de esfuerzos de corte en el lecho -  $\Delta X = 10$  mm**



10 (a). Imágenes de video



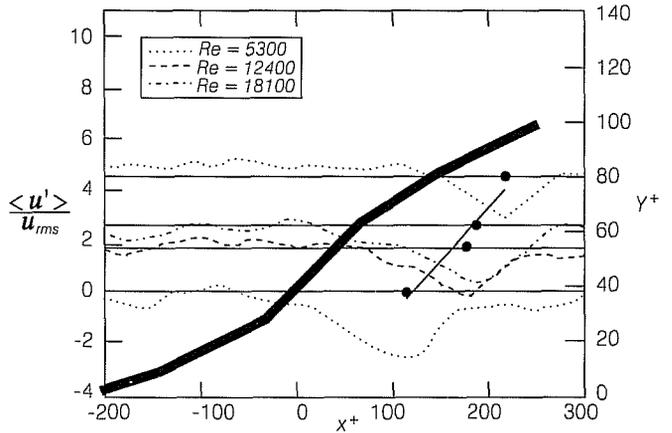
10 (b). Digitalización de imágenes y datos de sensores



talización de las imágenes anteriores, representadas adimensionalmente en unidades de pared  $X^+$  e  $Y^+$ . Los datos de velocidad y esfuerzo de corte ( $u$ ,  $\tau$ ) se graficaron en función de  $t^+$  en la misma ilustración, adimensionalizados con respecto al correspondiente desvío estándar ( $u_{rms}$ ,  $\tau_{rms}$ ).

Tanto el tiempo como las distancias longitudinales se refirieron al momento en que, valiéndose de la velocidad convectiva observada, la estructura encuentra al sensor de velocidad ( $P1$ ).

11. Promedios condicionales de fluctuaciones longitudinales de velocidad. • Indica ubicación del mínimo de los perfiles



El cálculo de promedios condicionales de fluctuaciones de velocidad  $\langle u' \rangle$  (para los tres números de Reynolds, y para ubicaciones del sensor a diferentes distancias adimensionales del lecho) permitió obtener, mediante la información de eventos independientes, estimaciones del campo asociado de fluctuaciones longitudinales de velocidad (ilustración 11). Los círculos demarcan la ubicación de los mínimos de  $\langle u' \rangle$ , mientras que la recta de ajuste a los mismos, también graficada, muestra un marcado paralelismo con la inclinación de la estructura coherente promedio obtenida del análisis de las imágenes de video.

Las dimensiones longitudinales características de las estructuras  $L_x$  se compararon con las microescalas de Taylor y las macroescalas de la turbulencia (López, 1994). Los resultados se presentan en el cuadro 2. Puede observarse que las estructuras preservan su coherencia sobre escalas comparables a las de los mayores vórtices turbulentos. Este hecho, unido a que la energía turbulenta asociada con la ocurrencia de estos eventos resulta apreciablemente superior a la media temporal, permite asumir que las estructuras observadas sean en gran parte responsables por la extracción de energía desde el flujo medio hacia las

2. Escalas turbulentas y dimensiones de estructuras observadas

$Re$	$Y^+$	$L_x^+$	$\lambda_x^+$	$\Delta X^+$
5300	38	118	28	250
12400	52	193	38	250
18100	64	249	42	220
5300	80	172	40	150

fluctuaciones turbulentas, a través del proceso de cascada. Mas aún, esta tasa interna de transferencia de energía en la cascada turbulenta desde grandes a pequeñas escalas puede ser estimada como el cociente entre el valor medio condicional  $\langle u' \rangle_{rms}^2$  durante la ocurrencia del evento y el tiempo de vida promedio de las estructuras  $T$ .

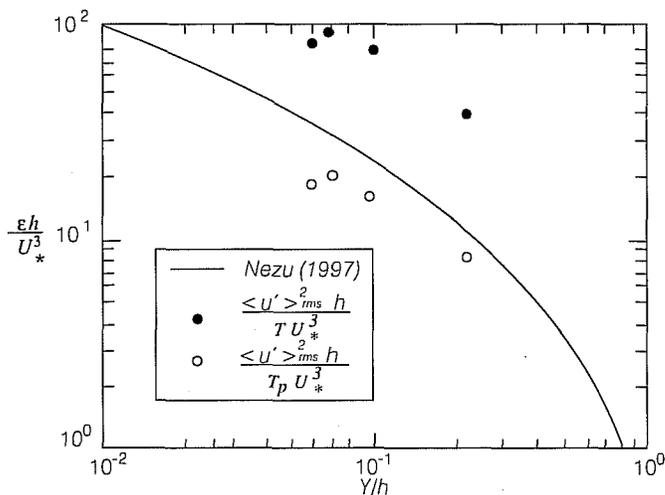
Por otra parte, en regiones cercanas al lecho en canales abiertos resulta válido asumir la existencia de un balance entre producción de energía  $P$  y disipación,  $\epsilon$  (Nezu y Nakagawa, 1993), de manera que:

$$P = \epsilon \approx \frac{\langle u' \rangle_{rms}^2}{T} \quad (2)$$

La ilustración 12 muestra las estimaciones de la ecuación (2) (círculos llenos) junto con la expresión propuesta por Nezu (1977) obtenida de resultados experimentales en canales abiertos. Como puede apreciarse los valores de disipación resultantes de (2) son apreciablemente mayores que los valores medios de disipación observados en canales abiertos. Pero si para la estimación de  $\epsilon$  utilizamos el tiempo medio entre estructuras  $T_p$  en lugar de emplear el tiempo de vida promedio de los eventos, se obtienen valores inferiores, indicados con círculos vacíos (ilustración 12) muy cercanos a la curva expresada por Nezu (1977).

Lo anterior evidencia claramente la naturaleza intermitente del fenómeno en estudio, donde un alto porcentaje de los valores medios de producción y disipación turbulenta resulta de contribuciones localizadas en el espacio y en el tiempo, encontrándose íntimamente ligado a la ocurrencia de eventos coherentes.

## 12. Distribución de la tasa adimensional de disipación turbulenta



## Conclusiones

La técnica de adquisición sincronizada de imágenes de video y señales de anemómetros de película caliente permitió no sólo la obtención de las características geométricas y cinemáticas de las principales estructuras coherentes en canales abiertos, sino también la definición del campo de flujo asociado en términos de velocidad y esfuerzos de corte en el lecho.

Las estructuras coherentes detectadas en el presente estudio coinciden con las típicas observadas en capas límite turbulentas, mientras que las características geométricas y cinemáticas de las superficies de corte, así como la frecuencia de ocurrencia de eventos coherentes coinciden con datos de la literatura para túneles de viento y flujos en ductos cerrados.

Todo lo anterior sugiere, por lo tanto, una estructura común de la turbulencia en flujos en capas límites. Se ha confirmado, asimismo, la validez de ciertos modelos conceptuales de estructuras coherentes en capas límite.

De igual manera queda demostrada la íntima relación entre los eventos detectados y los mecanismos responsables de la producción de energía cinética turbulenta así como del transporte turbulento de cantidad de movimiento, ambos fenómenos de alta intermitencia espacial y temporal.

Por último, la caracterización del campo de velocidades asociado con la ocurrencia de eventos turbulentos coherentes en las cercanías de la pared resulta de suma importancia para el estudio de fenómenos de transporte asociados, como por ejemplo la resuspensión de sedimento desde el lecho en canales abiertos.

Recibido: mayo, 1995

Aprobado: julio, 1995

## Reconocimientos

Los autores desean manifestar su agradecimiento al Programa de Fluidos, Hidráulica y Partículas de la Fundación Nacional de Ciencia de EUA (subsidio CTS-9210211; Marcelo García, Investigador Principal). Fabián López y Yarko Niño, manifiestan su agradecimiento por la licencia y el apoyo recibidos durante el desarrollo de sus estudios de posgrado a las siguientes instituciones: el primero al Instituto Nacional de Ciencia y Técnica Hídricas, y a la Universidad Nacional de Córdoba, Argentina, y el segundo al Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile y a la Agencia de Cooperación Internacional.

## Referencias

Blackwelder, R. F. y Haritonidis. 1983. Scaling of the bursting frequency in turbulent boundary layers. *J. Fluid Mech.* 132:87-103.

- Guezennec, Y. G.; U. Piomelli y J. Kim. 1989. On the shape and dynamics of wall structures in turbulent channel flow. *Phys. Fluids (A)* 1:764-766.
- Kline, S. J.; W. C. Reynolds; F. A. Schraub y P. W. Runstadler. 1967. The structure of turbulent boundary layers. *J. Fluid Mech.* 30:741-773.
- López, F. 1994. *Near wall turbulent coherent structures and their role on sediment transport in smooth-bed open channel flows*. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Illinois en Urbana-Champaign. Tesis de Maestría.
- Luchik, T. S. y W. G. Tiederman. 1987. Timescale and structure of ejections and bursts in turbulent channel flow. *J. Fluid Mech.* 174:529-552.
- McComb, W.D. 1990. *The physics of fluid turbulence*. Clarendon Press. Oxford.
- Nezu, I. 1977. *Turbulent structure in open-channel flows*. Traducción de la disertación doctoral original en japonés, Universidad de Kyoto, Japón.
- Nakagawa, H. y I. Nezu. 1977. Prediction of the contribution to the Reynolds stress from bursting events in open-channel flows. *J. Fluid Mech.* 80:99-128.
- Niño, Y.; F. López y M. García. 1994. High-Speed video analysis of sediment-turbulence interaction. *ASCE Symposium on Fundamentals and Advancements in Hydraulic Measurements and Experimentation*. Buffalo, NY.
- Piomelli, U.; J. Ferziger y P. Moin. 1989. New approximate boundary conditions for large eddy simulations. *Phys. Fluids A* 1-6:1061-1068.
- Pratry, A. K. y R. S. Brodkey. 1978. A stereoscopic visual study of coherent structures in turbulent shell flow. *J. Fluid Mech.* Vol. 89; pp. 251-272.
- Rajagopalan, S. y R. A. Antonia. 1979. Some properties of the large structure in a fully developed turbulent duct flow. *Phys. Fluids*, 22(4):614-622.
- Robinson, S.K. 1991. Coherent motions in the turbulent boundary layer. *Ann. Rev. Fluid Mech.* 23:601-639.
- Smith, C.R. 1984. A synthesized model of the near-wall behavior in turbulent boundary layers. *8<sup>th</sup> Proc. Symp. Turbul.*, Rolla, Mo.
- Talmon, A. M.; J.M. G. Kunen; G. Ooms. 1986. Simultaneous flow-visualization and Reynolds-stress measurement in a turbulent boundary layer. *J.F. Mech.* Vol. 163; pp. 459-478.
- Thomas, A. S. W. y M.K. Bull. 1983. On the role of wall-pressure fluctuations in deterministic motions in the turbulent boundary layer. *J. Fluid Mech.* 128:283-322.

#### Abstract

López F. et al., "Turbulent Coherent Structures in the Near Wall Region of Open Channel Flows" *Hydraulic Engineering in México (in Spanish)*. Vol. XI. Num. 1, pages 5-13, January-April, 1996.

The present work describes an investigation aimed at characterizing turbulent coherent structures in the near wall region of open channel flows. High-speed video recordings (500 Hz) of flow visualizations were synchronized with hot-film measurements of flow velocity and bed shear stress, allowing the acquisition of unprecedented information both visual and quantitative. Analysis of the information allowed the identification as well as the geometric and kinematic characterization of observed structures and the associated flow field. Results reveal the intermittent nature of coherent structures and also their intimate relationship with the mechanism responsible for the transfer of mean flow energy towards large-scale turbulent fluctuations.

**Keywords:** open-channels, turbulence, coherent structures, shear layers, synchronization, high-speed video, anemometers.