

Análisis acimutal de las direcciones principales de las tensiones tangenciales en un canal compuesto meandriforme.

Inés Mera¹, Mário J. Franca², Enrique Peña³, Jose Anta⁴

¹*Grupo de Ingeniería del Agua y el Medio Ambiente. Universidade da Coruña*

imera@udc.es

²*Faculdade de Ciências e Tecnologia & IMAR – CMA, Universidade Nova de Lisboa*

mfranca@fct.unl.pt

³*Grupo de Ingeniería del Agua y el Medio Ambiente. Universidade da Coruña*

epena@udc.es

⁴*Grupo de Ingeniería del Agua y el Medio Ambiente. Universidade da Coruña*

janta@udc.es

1 Introducción

El flujo en canales compuestos se caracteriza por los intercambios de cantidad de movimiento entre las masas de agua circulantes por el cauce principal y sus llanuras adyacentes (Figura 1, Knight y Shiono, 1996). En el caso de morfologías meandriformes, la hidrodinámica del tramo está adicionalmente condicionada por la orientación de las direcciones preferenciales de la cantidad de movimiento. Ambas situaciones (intercambios de flujos y aceleración centrífuga asociada a los cambios de dirección) provocan per se la aparición de corrientes secundarias (Shiono et al., 2008), y su actuación conjunta introduce una complejidad extra en la estructura turbulenta del flujo.

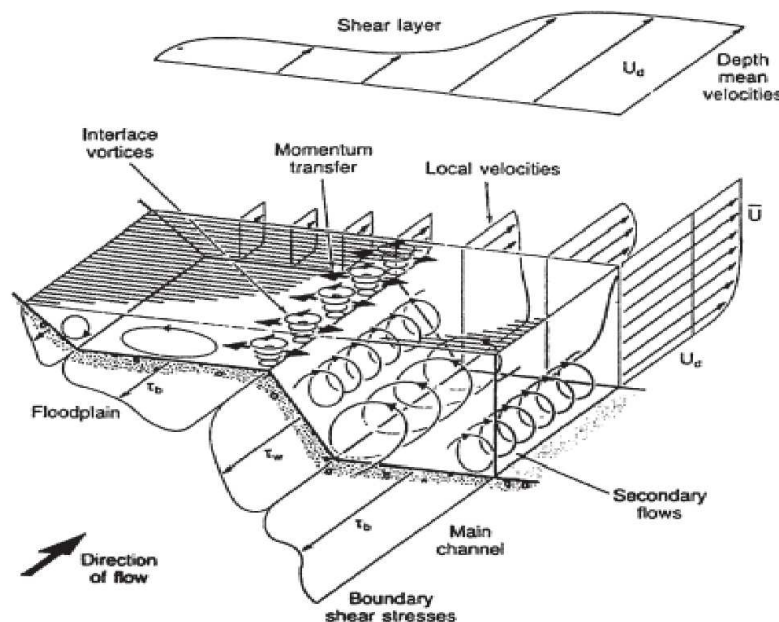


Figura 1 Procesos hidrodinámicos en canales compuestos (Knight y Shiono, 1996)

La combinación simultánea de flujo en canales compuestos y con morfología meandriforme es muy común en la naturaleza pero implica dificultades de modelización y tratamiento teórico. Uno de los principales problemas en la práctica es la determinación de la tensión tangencial en el fondo y los márgenes del canal, parámetro que además es importante para la definición y dimensionamiento de canales de sección estable y para la estimación de la resistencia al flujo. Además, en el seno del fluido aparecen tensiones turbulentas adicionales provocadas por el intercambio de cantidad de movimiento entre masas con movimientos no paralelos y, consecuentemente, capas de mezcla donde tiene lugar una producción extra de energía turbulenta (Noss et al., 2010).

El valor y distribución de las tensiones tangenciales están condicionados por multitud de parámetros físicos, como la morfología de la sección o su rugosidad (Ansari et al., 2011). Las corrientes secundarias, los gradientes laterales de tensión y, en general, la no-uniformidad del flujo, modifican también el patrón vertical de tensiones tangenciales, que en ausencia de estas estructuras debería ser lineal (Knight y Shiono, 1990). En la actualidad no existen teorías o modelos que permitan la reproducción de flujos de esta complejidad, por lo que el uso de modelos físicos es aún necesario en su estudio.

En el presente estudio se aborda un análisis acimutal de las direcciones principales de las tensiones tangenciales turbulentas y su relación con el patrón vertical de velocidades en diferentes zonas de un canal compuesto meandriforme para tres situaciones de flujo. Se han analizado registros instantáneos tridimensionales de velocidades en un modelo físico a escala 1:20 de un tramo fluvial real. A partir de ellos se ha calculado la magnitud de las tensiones turbulentas, tangenciales y normales, según ejes cartesianos arbitrarios, que coinciden con la orientación del equipo de medida. A través de un procedimiento de maximización de las tensiones tangenciales según un plano vertical se han definido las direcciones preferentes de actuación de estos esfuerzos, así como su evolución a lo largo del meandro.

En la sección 2 se encuentra una definición detallada de la zona de estudio, su modelización en el laboratorio y los escenarios de flujo ensayados. El apartado de resultados presenta de forma separada las tensiones tangenciales calculadas según un sistema de referencia cartesiano y las obtenidas al optimizar su valor en cada punto. Para todas ellas se han comparado los resultados en puntos de la primera curva del meandro y en su tramo final. Por último, se formulan algunas conclusiones a la vista de los resultados obtenidos en este trabajo.

2 Material y métodos

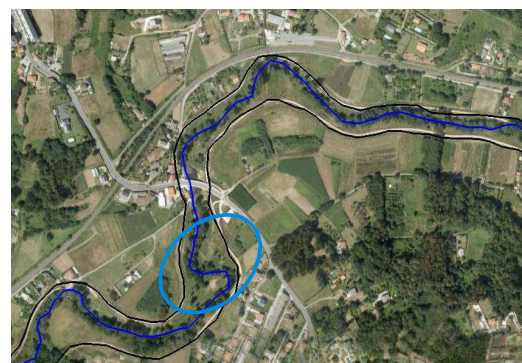
2.1 Prototipo

Los resultados de este trabajo se refieren a un meandro de 300 metros de longitud en el río Mero (Cambre, A Coruña, ver Figura 2). Se trata de un tramo con dos curvas consecutivas de radio pequeño y elevado desarrollo y sendas motas de protección en sus dos márgenes. La anchura del cauce oscila entre los 12 y los 14 m, mientras que su profundidad es de unos 2.5 m, dependiendo de la sección.

Los niveles de precipitación, elevados en algunas épocas del año, y la existencia de un embalse unos 5 kilómetros aguas arriba, provocan que en esta zona sean frecuentes los episodios de flujo en inundación. Otra particularidad de la zona de estudio es que su rugosidad se caracteriza por dos valores distintos, correspondientes al cauce principal y las llanuras de inundación vegetadas.



Figura 2



Situación de la zona de estudio

2.2 Montaje experimental

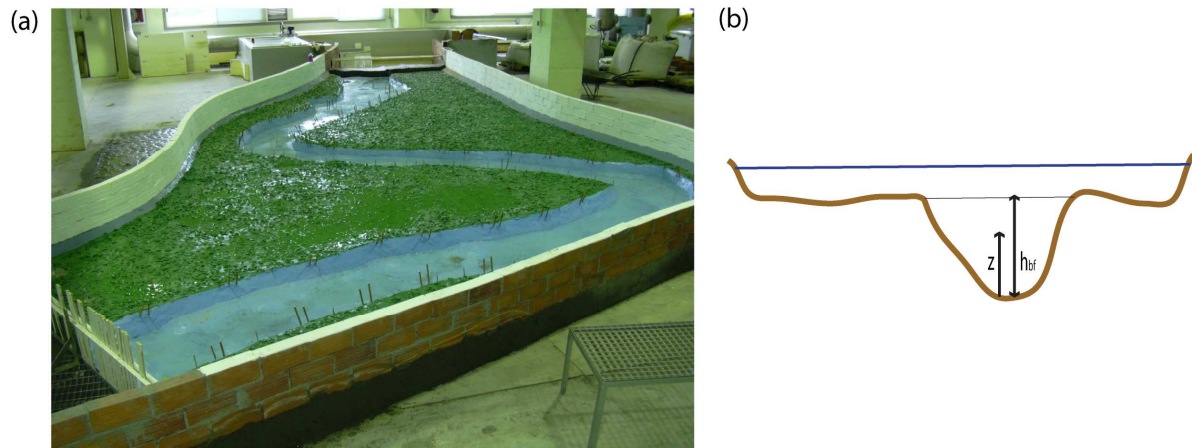


Figura 3 Modelo físico (a) fotografía y (b) sección tipo

Los resultados que se presentan en este trabajo se basan en las medidas realizadas en un modelo físico del meandro ya descrito, construido en el laboratorio de hidráulica del Centro de Innovación Tecnológica en Edificación e Ingeniería Civil (CITEEC) de la Universidad de A Coruña (Figura 3). Para la construcción del modelo se ha realizado una topografía de detalle de la zona de estudio, incluyendo puntos en el cauce principal y las llanuras de inundación. La escala geométrica se ha definido teniendo en cuenta las dimensiones de la zona de estudio y el espacio disponible en el laboratorio donde se ubica, resultando en un factor $\lambda_L=20$. Las características del prototipo se han restituido en el laboratorio siguiendo las leyes de semejanza de Froude.

Se han realizado medidas de calados y velocidades en varias zonas del modelo para tres situaciones de flujo: punto de desbordamiento del tramo ($Q=14$ L/s) y dos caudales de inundación ($Q=80$ y $Q=98$ L/s). En este artículo se analizarán los obtenidos en cuatro puntos a lo largo de la primera curva del meandro (Área 1, ver Figura 4a), donde la orientación del cauce y las llanuras de inundación son divergentes, y otros dos en el tramo final (Área 2, ver Figura 4a), donde ambas direcciones son prácticamente paralelas. Para todos ellos se ha caracterizado con detalle el perfil vertical de velocidad tridimensional en tres escenarios de flujo (Figura 4b).

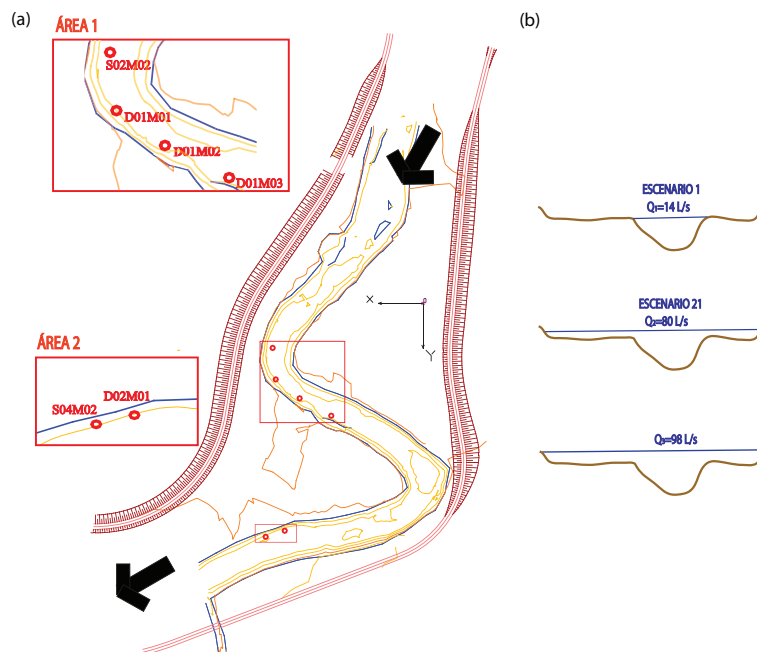


Figura 4 (a) Puntos de estudio y (b) escenarios de ensayo (caudales en el modelo)

Las velocidades se han registrado utilizando equipos ADV (*Acoustic Doppler Velocimetry*) durante 600 s y con una frecuencia de adquisición de 50 Hz para el caso de flujo simple, y 300 s a 25 Hz en los dos escenarios de inundación. Los datos obtenidos se han tratado utilizando un filtro fase-espacio (Goring y Nikora, 2002) que elimina parcialmente las anomalías presentes en la señal. Se ha conseguido medir la velocidad del flujo a partir de una distancia de 2 centímetros sobre el fondo. No se han obtenido resultados de la franja superior de la vertical puesto que el volumen de control de este tipo de velocímetros se sitúa unos 5 centímetros por debajo de la sonda de emisión. La Tabla 2 muestra las características de los perfiles medidos en cada uno de los ensayos.

Tabla 1 Puntos de estudio con su calado (h) y altura de medida sobre el fondo del canal (z).

	S02M02		D01M01		D01M02		D01M03		D02M01		S04M02			
	h (m)	z (m)	h (m)	z (m)	h (m)	z (m)	h (m)	z (m)	h (m)	z (m)	h (m)	z (m)		
E1	0.100	0.03	0.117	0.107	0.098	0.100	0.101	0.03	0.101	0.04	0.04	0.06		
		0.04						0.04					0.04	
		0.06						0.06					0.06	
		0.08												
E2	0.250	0.02	0.266	0.258	0.249	0.251	0.252	0.02	0.252	0.11	0.12	0.13	0.14	
		0.04						0.04						0.04
		0.06						0.06						0.06
		0.08						0.08						0.08
		0.09						0.09						0.09
		0.10						0.10						0.10
		0.11						0.11						0.11
		0.12						0.12						0.12
		0.13						0.13						0.13
		0.14						0.14						0.14
		0.16						0.16						0.16
		0.18						0.18						0.18
								0.20						
E3	0.254		0.270	0.262	0.253	0.254	0.254		0.254	0.11	0.12	0.13	0.14	
		0.02						0.02						0.02
														0.03
		0.04						0.04						0.04
														0.05
		0.06						0.06						0.06
														0.07
		0.08						0.08						0.08
		0.09						0.09						0.09
		0.10						0.10						0.10
		0.11						0.11						0.11
		0.12						0.12						0.12
		0.13						0.13						0.13
		0.14						0.14						0.14
		0.15						0.15						0.15
		0.16						0.16						0.16
								0.17						
		0.18						0.18						0.18
														0.19
		0.20												

3 Resultados

3.1 Introducción

En trabajos anteriores se han analizado los campos tridimensionales de velocidades en el modelo físico para los distintos escenarios de ensayo, así como su patrón vertical en algunos puntos (Mera et al. 2009). Se observó cómo la velocidad en los puntos de las llanuras sigue la dirección preferente de éstas, mientras que en los puntos del cauce principal, especialmente en la primera curva, se producen reorientaciones debidas a la morfología del meandro (Figura 5)

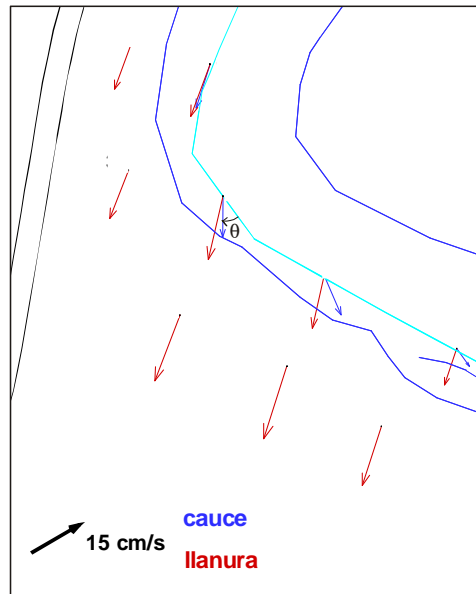


Figura 5 Velocidades medias en cauce y llanura para varios puntos del Área 1 en el escenario 3 (Mera et al., 2009)

A continuación se presentan, para distintos puntos y escenarios de flujo, los resultados relativos a las tensiones tangenciales calculadas según dos sistemas de referencia. En primer lugar, según coordenadas cartesianas arbitrarias y a continuación, según la dirección del plano vertical con máxima tensión.

3.2 Análisis de las tensiones tangenciales según un referencial cartesiano arbitrario

En este apartado se analizan los patrones de tensiones tangenciales según planos verticales (xz e yz) para los distintos puntos de estudio y escenarios de ensayo (Figura 4). Estos planos vienen dados por los ejes cartesianos de referencia en el modelo (xyz), definidos de acuerdo con la disposición de los elementos del laboratorio. En todos los resultados, la coordenada vertical z se encuentra normalizada por la altura del cauce, h_{bf} .

Para el ensayo 1, que simula el punto de desbordamiento del tramo, se observa que las tensiones tangenciales son negativas y, en algunos casos (especialmente el punto S02M02), con tendencia quasi-lineal y creciente desde la superficie al fondo. Esto no se aprecia en los resultados de los ensayos 2 y 3, de flujo en inundación. En estos casos, el valor de las tensiones tangenciales aumenta claramente con el caudal ($(\tau_{uw})_{E3} > (\tau_{uw})_{E2}$), si bien no se identifica un patrón vertical de sus valores. En la primera curva del meandro tanto τ_{uw} como τ_{vw} aumentan a lo largo de la curva, a medida que la dirección del cauce y las llanuras de inundación son más divergentes. Sin embargo, los valores máximos de τ_{uw} se encuentran en el punto S04M02 de la zona 2, donde ambas direcciones son sensiblemente parecidas.

La influencia de las corrientes secundarias en la estructura turbulenta del flujo es visible, y viene dada tanto por la interacción entre el cauce y las llanuras (diferencias entre el ensayo E1 y los ensayos E2 y E3), como por la reorientación del flujo (el efecto del meandro se aprecia especialmente al comparar las verticales S02M02 y D01M03). Podemos afirmar que el valor de las tensiones tangenciales aumenta a medida que el flujo se

desarrolla en la curva. Otros cambios que se aprecian en el perfil de tensiones pueden estar relacionados con la orientación variable del cauce y las llanuras con respecto a los ejes coordenados.

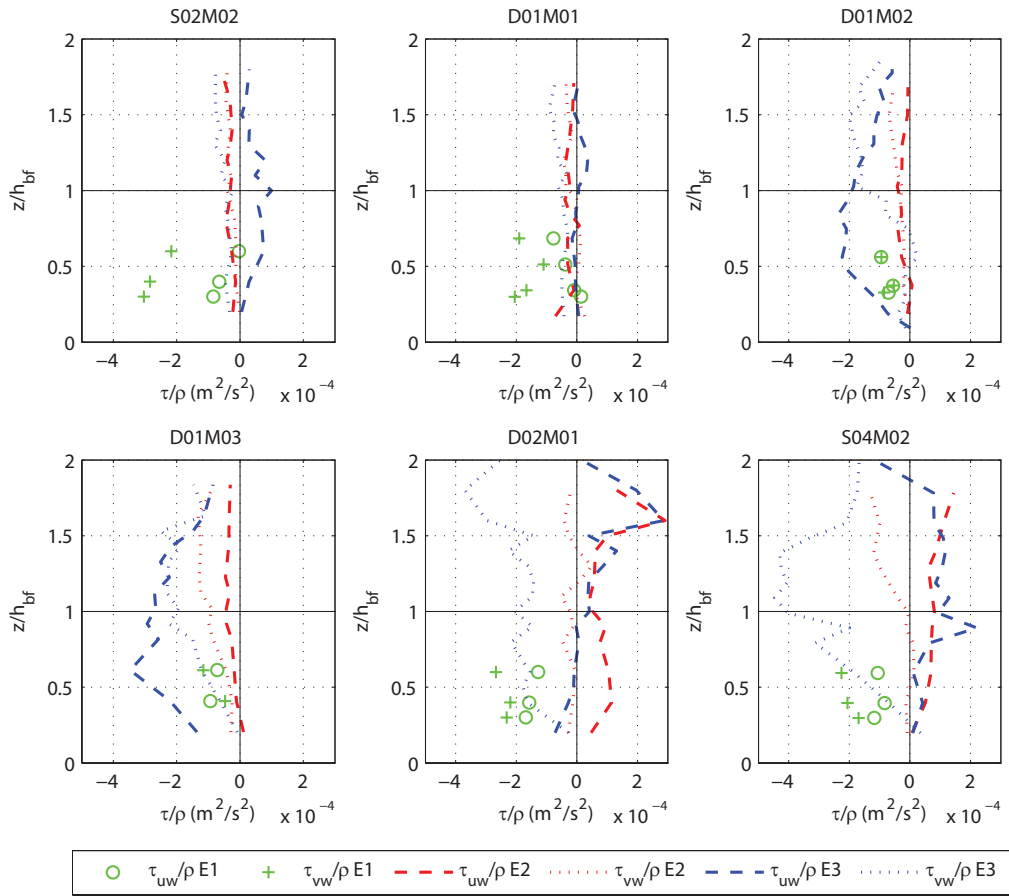


Figura 6 Tensiones tangenciales τ_{uw} , τ_{vw} calculadas según los ejes cartesianos xy

Los resultados presentados ponen de manifiesto la necesidad de una definición clara de las direcciones de cálculo para el análisis de las tensiones tangenciales. De esta manera, podrá caracterizarse adecuadamente la resistencia interna al flujo y su capacidad de transporte y mezcla. Los ejes cartesianos iniciales se definieron de forma arbitraria y sin relación con la geometría del modelo, por lo que, en general, la interpretación física de los parámetros calculados con referencia a ellos no es inmediata.

3.3 Rotación del referencial horizontal según los ejes de máxima tensión tangencial

En esta sección se ha determinado el sistema de ejes correspondientes a la dirección de actuación de las tensiones tangenciales verticales máximas. Para ello se ha realizado, en todos los puntos de cada vertical de medida, una rotación de los ejes horizontales (x e y), manteniendo la dirección vertical (z) fija, hasta encontrar el valor máximo de la tensión tangencial vertical $\tau_{u'w}$. Simultáneamente, el valor de $\tau_{v'w}$ se anula. Los nuevos ejes x' y y' están girados un ángulo α_τ respecto a los ejes cartesianos arbitrarios, y tienen orientaciones distintas a lo largo de una misma vertical de medida.

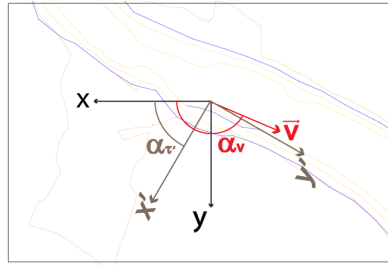


Figura 7 Relación entre el sistema de ejes coordenados (xyz , arbitrario) y el definido por la dirección que maximiza las tensiones tangenciales verticales ($x'y'z$)

La Figura 8 presenta las tensiones tangenciales máximas para cada una de las verticales de estudio. Para el escenario 1, el patrón de tensiones tangenciales es prácticamente lineal en muchos de los puntos de ensayo. En los casos de flujo en inundación esto ocurre solamente para los puntos iniciales del área 1 (primera curva del meandro), donde el cauce y la llanura tienen direcciones muy parecidas. A medida que sus orientaciones divergen (puntos D01M02 Y D01M03) la linealidad del perfil disminuye, y los valores más altos de $\tau_{u'w}$ se concentran en su zona central. Este efecto es muy claro en los resultados del ensayo 3.

Teniendo en cuenta todo lo comentado, cabría esperar un perfil de tensiones máximas aproximadamente lineal en los puntos del área 2, donde las direcciones del cauce y la llanura son también similares. Sin embargo la tendencia que presentan no es ésta, debido al efecto de la curva. En los puntos D02M01 y S04M02 se produce una entrada de agua desde la llanura izquierda al cauce principal, que genera la aparición de vórtices a lo largo del contacto entre el cauce y la llanura (Sellin et al., 1993). Este fenómeno podría ser el causante de las desviaciones del perfil de tensiones sobre el quasi-lineal esperado. Por otra parte, igual que en los puntos del área 1, se observa un claro aumento de los valores de las tensiones máximas al incrementarse el caudal de ensayo.

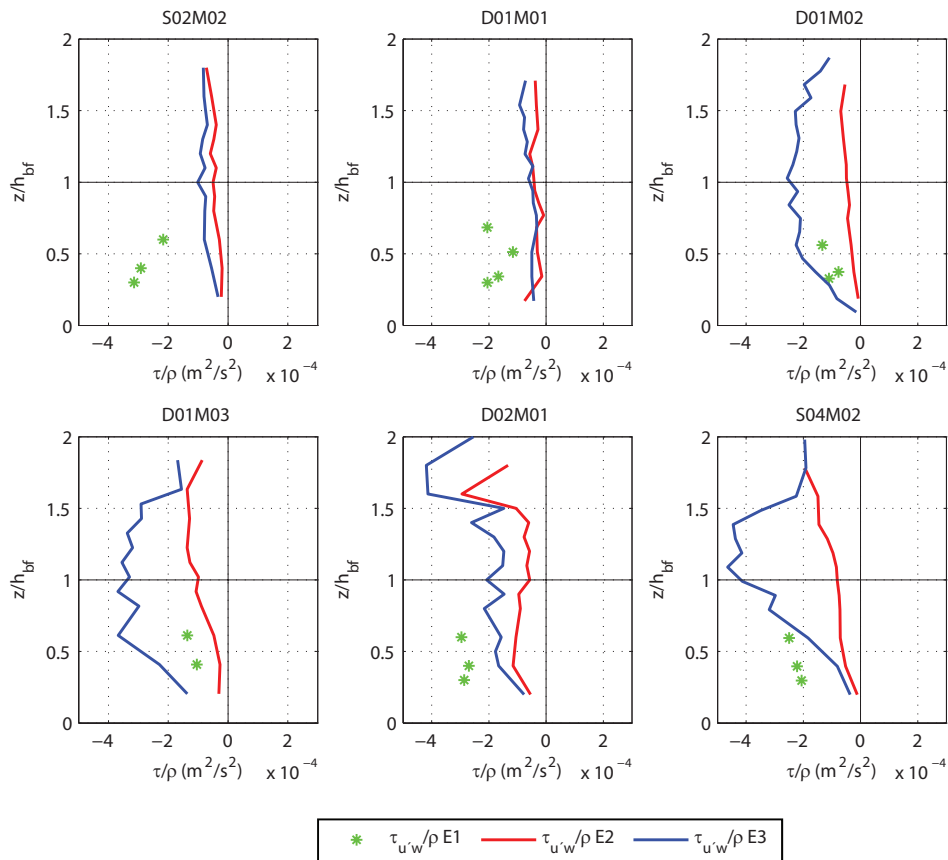


Figura 8 Tensiones tangenciales máximas $\tau_{u'w}$, calculadas según los ejes $x'y'$

3.4 Análisis de resultados

En las secciones anteriores se han descrito los resultados obtenidos al calcular las tensiones tangenciales cartesianas y máximas en varios puntos a lo largo del modelo físico. Como se ha comentado, el sistema de referencia inicial (xyz) es arbitrario y no guarda relación con la geometría del modelo ni la orientación de sus elementos principales (cauce y llanuras de inundación). Por lo tanto, resulta complicado analizar los patrones de tensiones tangenciales según estos ejes (Figura 6).

El efecto de la meandricación y de la existencia de llanuras adyacentes al canal principal es más visible en el caso de las tensiones máximas (Figura 8). La linealidad del perfil vertical disminuye en las zonas con corrientes secundarias (puntos dentro de la primera curva y zona final del meandro), y los valores mayores aparecen cerca de la región de contacto entre el cauce y las llanuras (esto es, $z/h_{bf} = 0.6-1.6$). Esto se aprecia especialmente en los resultados del ensayo 3, por lo que podemos decir que los aumentos de caudal contribuyen a la homogeneización vertical de la turbulencia, y que las corrientes secundarias inducen una tensión de arrastramiento extra.

Los perfiles correspondientes al ensayo 3 son similares a los observados para flujos de baja sumergencia en relación a la rugosidad (Franca y Lemmin, 2006). Así, el cauce deja de funcionar como el principal conducto de agua, y lo hace como una rugosidad del fondo, llevando a una dispersión de las tensiones tangenciales. Esta hipótesis puede justificar en algunos casos, como los puntos S02M02 y D01M01, la diferencia entre las tensiones del ensayo E1 y los dos escenarios de inundación.

Se ha considerado de interés analizar también la dirección de los ejes de tensiones tangenciales máximas, y su relación con la orientación principal del flujo (definida por la de la velocidad media en cada punto). En la Figura 9 se muestran los valores del ángulo de la rotación horizontal α_r realizada en cada punto para obtenerlas. Se ha representado también la orientación de la velocidad media, de forma que se pueden comparar las direcciones de actuación de la tensión tangencial y del flujo medio en cada una de las verticales de ensayo.

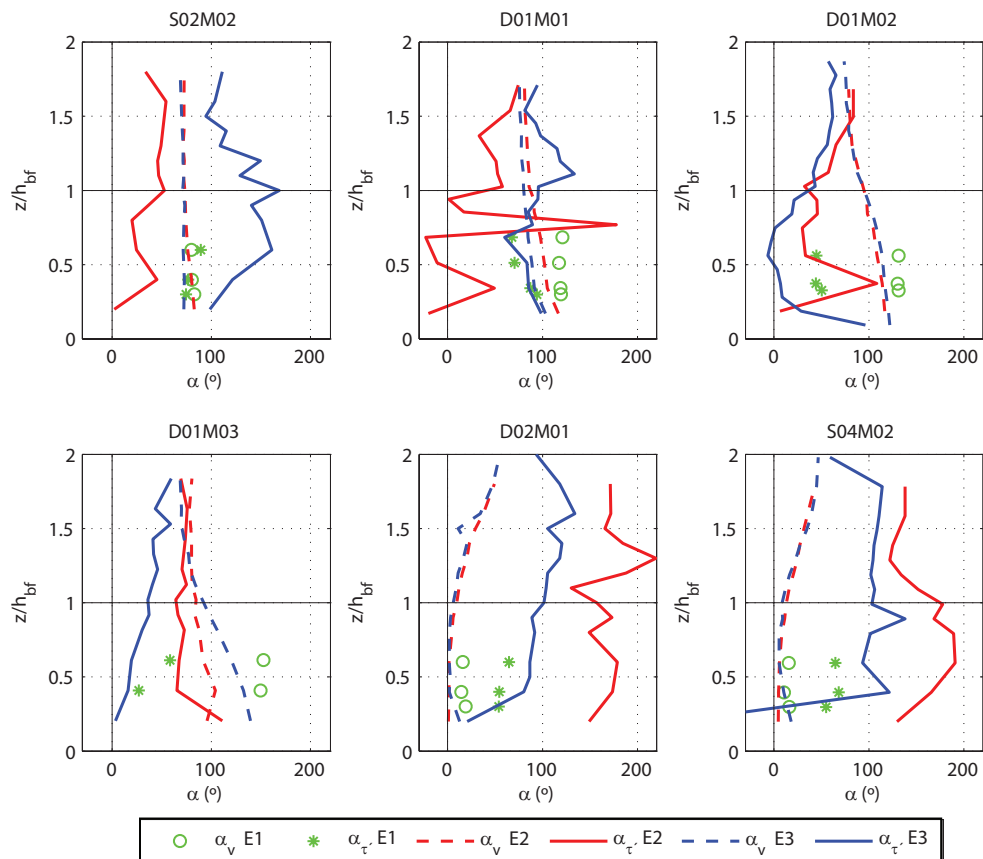


Figura 9 Comparativa de la orientación de la velocidad en planta del flujo y las tensiones tangenciales máximas ($x'y'z$)

En el área de medida 1 se observa claramente la reorientación del flujo a lo largo del meandro. El valor de α_v es prácticamente constante en las verticales S02M02 y D01M01, mientras que para los dos últimos puntos de esta zona (D01M02 y D01M03) hay una variación de hasta 50° entre su magnitud en el fondo -orientación de la velocidad según el cauce- y en la superficie -orientación de la velocidad según la llanura de inundación- (ver Figura 5).

En cuanto a las tensiones tangenciales máximas, su dirección es parecida a la del flujo principal en el inicio de la curva, y a partir del punto D01M02 se observa una diferencia clara de comportamiento entre la zona superior e inferior del perfil. En la primera de ellas ($z/h_{bf} > 1$) las tensiones máximas se orientan casi paralelamente a la velocidad, mientras que en la segunda ($z/h_{bf} < 1$) el desfase angular entre ambas supera los 100° en algunos casos. Esto sitúa el plano de tensión máxima en la dirección transversal de la sección, lo cual señala que las corrientes secundarias que transportan agua de la llanura al cauce y viceversa contribuyen a la aparición de este fenómeno.

En el área de medida 2 (puntos D02M01 y S04M02) se observan diferencias importantes entre los resultados para los ensayos de inundación. En el primero de ellos (ensayo 2) la velocidad y la tensión máxima son aproximadamente perpendiculares (desfase de unos 90°), lo que indica que el plano de τ_{uw} es aproximadamente transversal a la dirección del cauce. Sin embargo, en el ensayo 3, el desfase entre los dos perfiles llega a los 180°, por lo que la dirección de la tensión tangencial máxima es similar a la longitudinal del cauce. Se supone que la orientación transversal a la sección se debe al efecto de las corrientes secundarias, mientras que la alineación con el cauce principal responde a la influencia global de la morfología del canal.

4 Conclusiones

A la vista de los resultados presentados en el apartado anterior se pueden formular varias conclusiones relativas al efecto de la morfología y las condiciones de ensayo en el perfil de tensiones tangenciales en un tramo compuesto meandriforme:

- El patrón vertical de tensiones tangenciales en un tramo fluvial está muy afectado por la morfología del canal. La existencia de curvas y/o llanuras de inundación condiciona el régimen hidrodinámico y los parámetros turbulentos del flujo.
- La dirección principal de las tensiones tangenciales no es necesariamente la misma que la de la cantidad de movimiento, tal y como se observa en la Figura 9.
- La divergencia entre ambas orientaciones se debe a la influencia de la meandrización del tramo y a la existencia de llanuras de inundación. Además, es más apreciable en la zona inferior del flujo, donde el agua circula por el cauce principal. La hidrodinámica en esa franja es, por lo tanto, claramente tridimensional.
- La elección del sistema de coordenadas tiene mucha importancia en el cálculo de la hidrodinámica de un tramo. En la actualidad se está llevando a cabo una nueva campaña experimental en la que se obtendrán mapas de velocidades en una malla de puntos más densa, a través de un perfilador acústico doppler (DOP 2000). En futuros trabajos se analizarán estos resultados teniendo en cuenta la orientación del cauce principal y las llanuras de inundación del tramo, las direcciones de máxima tensión tangencial y los ejes principales (máxima tensión normal y tensión tangencial nula), con el objetivo de analizar la adecuación de cada uno de estos sistemas de referencia para la caracterización hidrodinámica del tramo.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo proporcionado por el Ministerio de Educación y Ciencia para el proyecto “Caracterización de tensiones tangenciales y turbulencia en procesos de inundación en ríos con tramos meandriformes. Estudio en modelo físico y modelo numérico” (CGL 2008-03319, Plan Nacional de I+D+I 2008-2011), así como a los Entes Promotores Observadores del proyecto (Confederación Hidrográfica del Norte, Augas de Galicia y Acuática Ingeniería Civil). Parte de este trabajo se desarrolló durante la estancia realizada por la primera autora en el Departamento de Engenharia Civil de la Faculdade de Ciências e Tecnologia (Universidade Nova de Lisboa, Portugal).

Referencias

- Ansari, K., H. P. Morvan, et al. (2011). "Numerical Investigation into Secondary Currents and Wall Shear in Trapezoidal Channels." *Journal of Hydraulic Engineering-Asce* 137(4): 432-440.
- Franca, M. J. y Lemmin, U. (2006). "Turbulence measurements in shallow flows in gravel-bed rivers." *7th International Conference on Hydrosience and Engineering 2006*. Philadelphia, septiembre 2006
- Goring, D. G. y V. I. Nikora (2002). "Despiking acoustic doppler velocimeter data." *Journal of Hydraulic Engineering* 128(1): 117-126.
- Knight, D. W. y K. Shiono (1990). "Turbulence measurements in a shear layer region of a compound channel." *Journal of Hydraulic Research* 28(2): 175-196.
- Knight, D. W. y K. Shiono (1996). "River channel and floodplain hydraulics." en Anderson, M. G., Walling, D.E. y Bates, P.D. (eds.), "Floodplain processes", Capítulo 5, Chichester, Wiley, pp. 139-181.
- Mera, I., J. Anta et al. (2009). "Análisis del patrón vertical de velocidades en un río meandriforme: modelización física." *Jornadas de Ingeniería del Agua*. Madrid, octubre 2009.
- Noss, C., T. Salzmann, et al. (2010). "Turbulent and advective momentum fluxes in streams." *Water Resources Research* 46(12).
- Sellin, R. H. J., D. A. Ervine, et al. (1993). "Behaviour of meandering two-stage channels." *Proceedings - ICE: Water, Maritime & Energy* 101(2): 99-111.
- Shiono, K., J. Spooner, et al. (2008). "Flow characteristics in meandering channels with non-mobile and mobile beds for overbank flows." *Journal of Hydraulic Research* 46(1): 113-132.