

Diseños especiales en grandes colectores: contraste de la modelación física con técnicas CFD.

F. J. Vallés Morán, D. Valero Huerta, I. Andrés-Doménech, R. García Bartual

Instituto de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente (IIAMA). Área de Hidráulica e Hidrología. Universitat Politècnica de València. Cno. de Vera s/n 46022 Valencia.

[*fvalmo@hma.upv.es*](mailto:fvalmo@hma.upv.es)

1 Introducción

La llegada de la Alta Velocidad a la ciudad de Valencia está suponiendo una gran reestructuración urbana, que afecta, entre otros, a la adaptación de la red de colectores, interferida por los nuevos túneles de acceso ferroviario. El caso analizado es la interferencia del Colector Sur de la red principal (capacidad máxima de 100 m³/s), para la que existen condicionantes geométricos en planta y alzado muy restrictivos, obligando a una solución hidráulica compleja cuyo diseño exige recurrir a técnicas más allá del ámbito de las herramientas más populares. El problema técnico resulta todavía más complejo por la enorme presión urbana de la zona. En la investigación se han empleado conjuntamente la modelación física reducida en laboratorio, y la mecánica de fluidos computacional (CFD). Se ha conseguido verificar satisfactoriamente un diseño hidráulico optimizado, comprobándose el correcto funcionamiento del colector en todo el rango de caudales previsto. El contraste entre los dos enfoques pone de manifiesto la bondad de las técnicas CFD como herramientas de análisis eficaces en diseños hidráulicos especiales, permitiendo una selección de alternativas que optimice el trabajo final en el laboratorio, así como la estimación detallada de las distribuciones espaciales de velocidades, vorticidad, turbulencia, presiones, etc.. De esta manera, se simplifica también la instrumentación en laboratorio y a la vez se minimizan los errores en la toma de datos experimentales. La singularidad del diseño hidráulico propuesto exige el análisis tridimensional del flujo, justificándose plenamente el uso de una modelación híbrida numérico-experimental como la empleada.

2 Descripción del diseño estudiado

Se analiza un tramo de nuevo diseño en el Colector Sur de la red principal de Valencia. El nuevo acceso ferroviario de alta velocidad, subterráneo, interfiere con aquel (fig. 1), por lo que se plantea su desvío y reposición, sujeto a fuertes condicionantes. Las restricciones concretas del caso afectan básicamente tanto al trazado en planta como al trazado en alzado previstos. Debido a la presión urbana existente se respeta la traza propuesta en el proyecto constructivo original. En cuanto al alzado, la solución debe ser compatible con el nuevo canal subterráneo de acceso ferroviario a la ciudad, tanto geométrica como constructivamente, y al mismo tiempo y obviamente, con las rasantes de las calles afectadas.

Como criterio general de proyecto, la solución de reposición debe conseguir un funcionamiento hidráulico generalizado en régimen lento o subcrítico estable, con zonas controladas de régimen rápido en caídas localizadas en sitios adecuados y resaltos hidráulicos confinados en lugares dispuestos al efecto. Desde el punto de vista de dicho funcionamiento, debe existir total correspondencia entre el perfil longitudinal y el trazado en planta, al objeto de evitar regímenes supercríticos en alineaciones curvas. También es fundamental evitar la coincidencia de tales regímenes de flujo en zonas de transición por cambio de sección, pues éstas suelen ser origen de formación de frentes de onda oblicuos que se reflejan y propagan hacia aguas abajo y que pueden dar lugar a calados locales incluso del orden del doble del medio calculado.

De tal manera que, la solución adoptada (Vallés Morán, et al., 2009), coordina la geometría y el funcionamiento hidráulico del colector con ciertos aspectos singulares (fig. 2) como el diseño de transiciones de secciones ovoides existentes a rectangulares en la reposición, curvas en planta, caídas localizadas en el perfil longitudinal y la inclusión singular de elementos de macrorrugosidad propios de las rápidas para estabilizar el consiguiente resalto hidráulico (Marco Segura, 2006), fijándolo al pie de la caída (perfil WES), para todo el rango de caudales (3.5–100 m³/s).

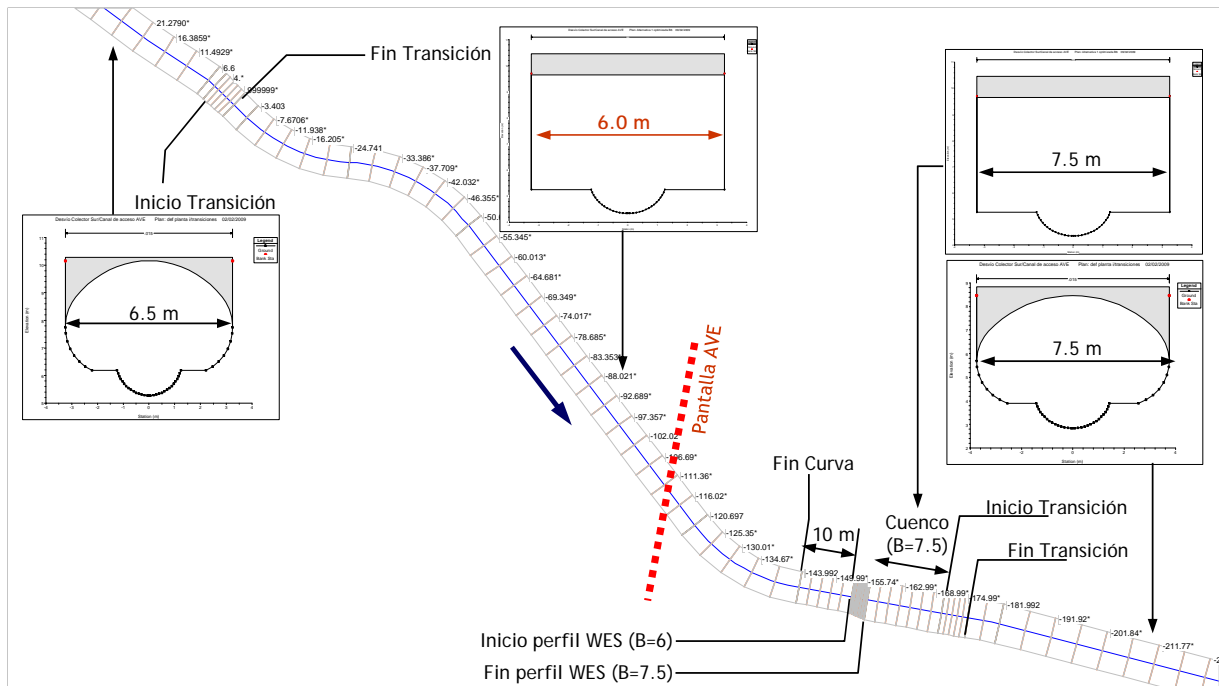


Figura 1 Esquema de la planta general y detalles de la reposición del Colector Sur por la interferencia con el nuevo acceso ferroviario de alta velocidad a Valencia.

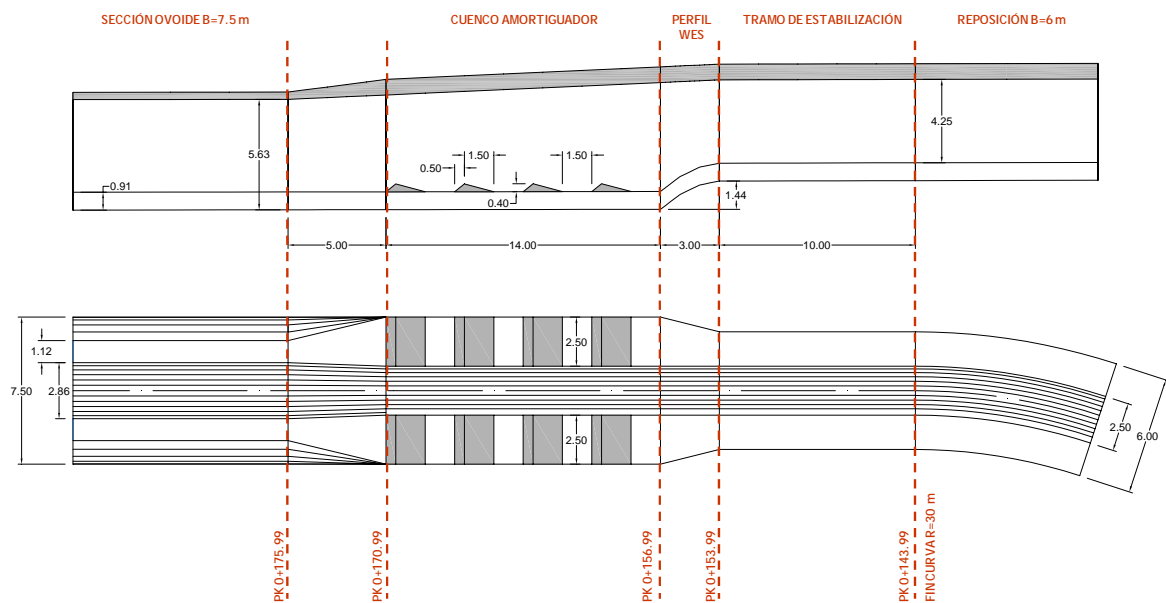


Figura 2 Definición geométrica del tramo de colector estudiado. Detalle del tramo final de la reposición (Vallés Morán, et al., 2009).

3 Modelación física reducida

La modelación física del flujo a través de un diseño tan singular, envuelve componentes tridimensionales de la velocidad, por lo que resulta obligada la reproducción del prototipo mediante un modelo a escala geométrica no distorsionada. Al estar el flujo dominado por la relación entre las fuerzas inerciales y gravitatorias la semejanza de Froude es la adecuada, resultando válida una escala geométrica no distorsionada $\lambda=1/20$ para el estudio planteado. El modelo físico se construye en el Laboratorio de Hidráulica y Obras Hidráulicas de la Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Valencia. En su fabricación se combinan materiales plásticos (PVC y metacrilato) para los nuevos hastiales y elementos de la sección ovoide existente, con elementos de hormigón para la solera y caz del nuevo diseño propuesto (fig. 3). El modelo físico completo se puede observar en la figura 4.

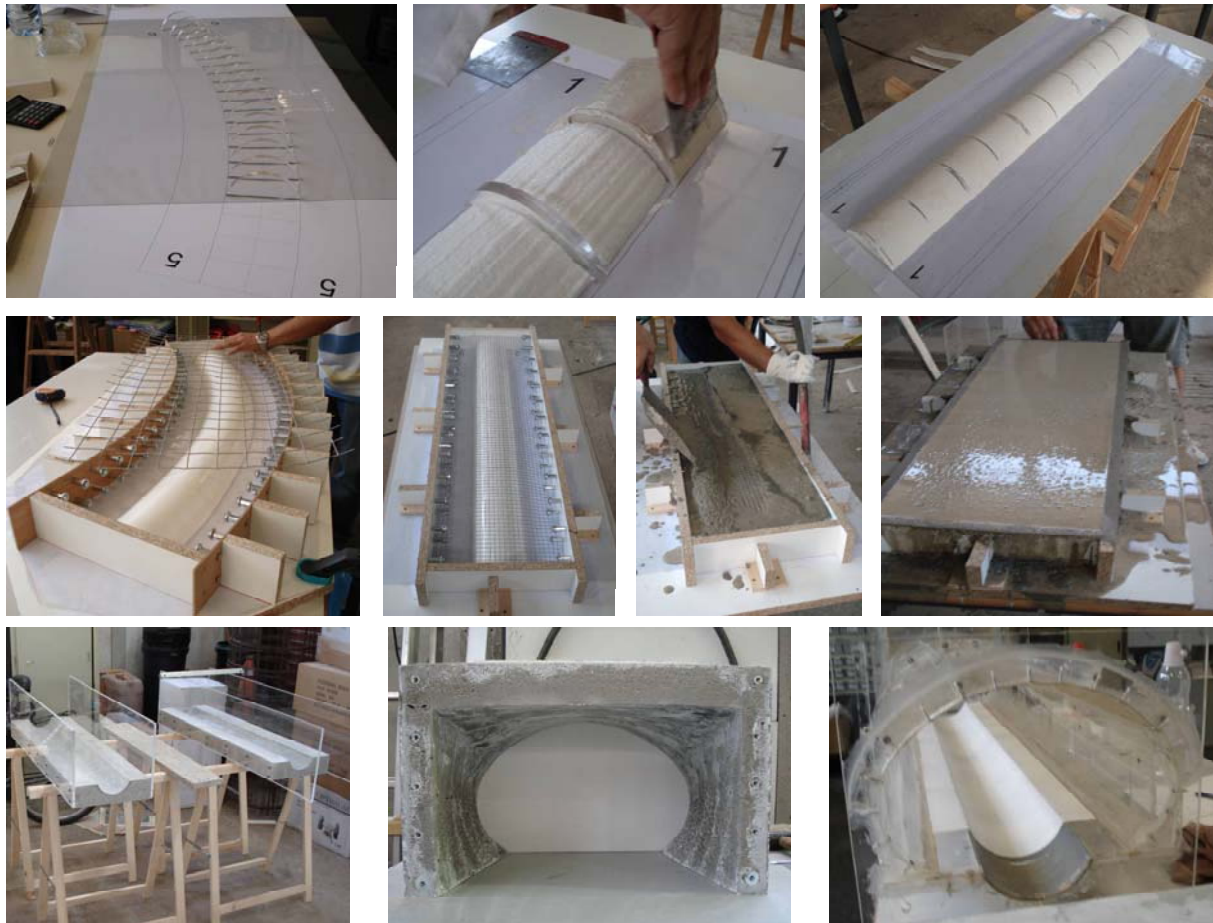


Figura 3 Modelo físico reducido. Fases de fabricación.

De los ensayos en laboratorio se desprende que el resalto queda adecuadamente fijado en la estructura de disipación de energía diseñada al efecto, de manera que la transición final del entronque aguas abajo con el colector existente de sección ovoide funciona siempre en régimen lento (fig. 5). Destaca también que el calado crítico observado en cabecera del perfil WES es del orden de $2/3$ del teórico, valor ampliamente sancionado por la experiencia. Por último, y como era de esperar, en la alineación curva aguas arriba del WES se produce el peralte de la lámina libre, que en ningún caso compromete el resguardo admisible en el colector (fig. 6; tabla 1). La comparación del funcionamiento con caudales menores permite afirmar que para el rango de caudales esperables en el colector, se sigue el mismo patrón de respuesta hidráulica en la zona de vertedero-cuenca que para el caudal de diseño de $100 \text{ m}^3/\text{s}$ (fig. 7). Estos aspectos se contrastan a continuación con la modelación numérica.



Figura 4 Modelo físico reducido.



Figura 5 Resalto hidráulico para 100 m³/s.

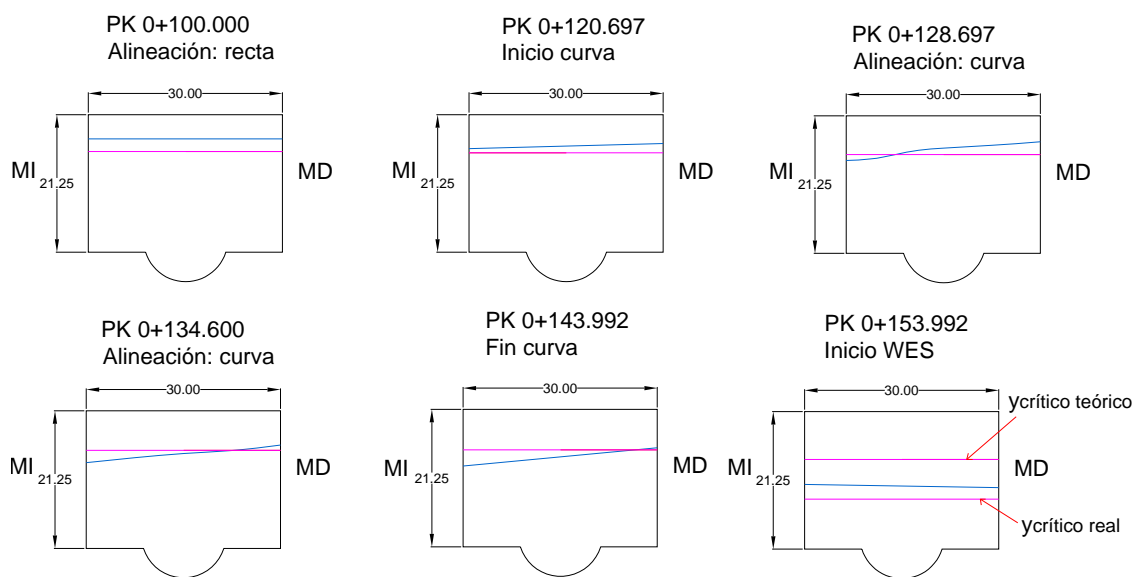


Figura 6 Comparativa de calados teóricos 1D obtenidos en la fase de prediseño (Vallés Morán et al., 2009) y experimentales. Cotas en cm (escala modelo).

Tabla 1 Peraltes y resguardos en prototipo.

PK	Calado en prototipo (m)		Peralte (m)	Resguardo
	MI	MD		mínimo (m)
0+100.000	4.41	4.41	0	0.75
0+120.697	4.11	4.27	0.16	0.89
0+128.697	3.78	4.36	0.58	0.80
0+134.600	3.56	4.1	0.54	1.06
0+143.992	3.41	3.97	0.56	1.19
0+153.992	2.91	2.81	0.1	2.25

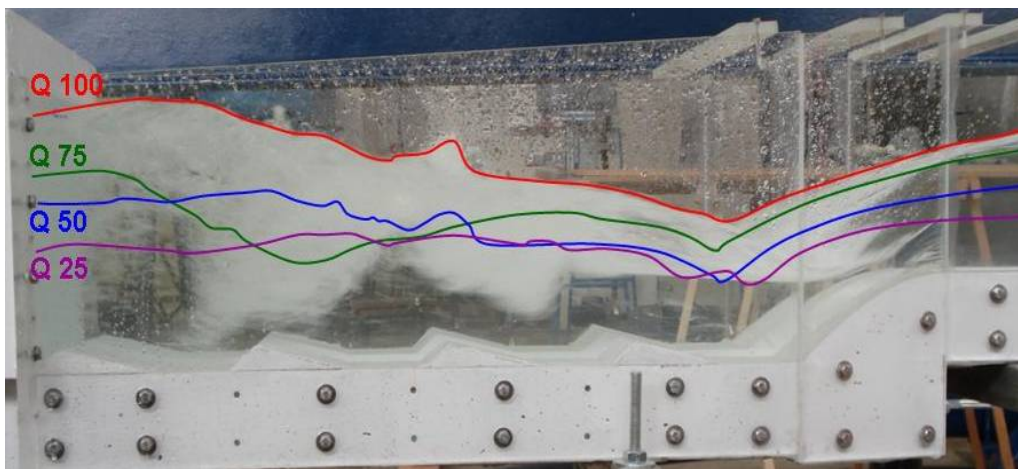


Figura 7 Comparativa de perfiles para caudales menores al de diseño.

Por tanto, los resultados obtenidos en los ensayos sobre modelo físico sancionan el nuevo diseño del tramo afectado, y permiten afirmar que dicho diseño representa una solución técnicamente viable e hidráulicamente óptima desde el punto de vista de su funcionamiento, tanto para el caudal de diseño ($100 \text{ m}^3/\text{s}$) como para todo el rango de caudales que pueden circular en lámina libre por este tramo del Colector Sur.

4 Modelación numérica

En paralelo a la modelación física en laboratorio se llevó a cabo una modelación numérica del diseño propuesto a la escala real, para el caudal máximo $Q=100 \text{ m}^3/\text{s}$. Los cálculos se realizaron con un ordenador personal en entorno Windows XP, con de 16 Gb de memoria RAM y ocho procesadores. La definición geométrica del colector (fig. 8) se realizó con *Autocad*, incluyendo las transiciones (perfil WES y ensanchamiento, transición suave del cuenco al perfil ovoide) así como la totalidad de los detalles geométricos relevantes (tamaño, diseño y disposición de los elementos de macrorrugosidad, tramo en curva del colector, caz, sección ovoide, etc.).

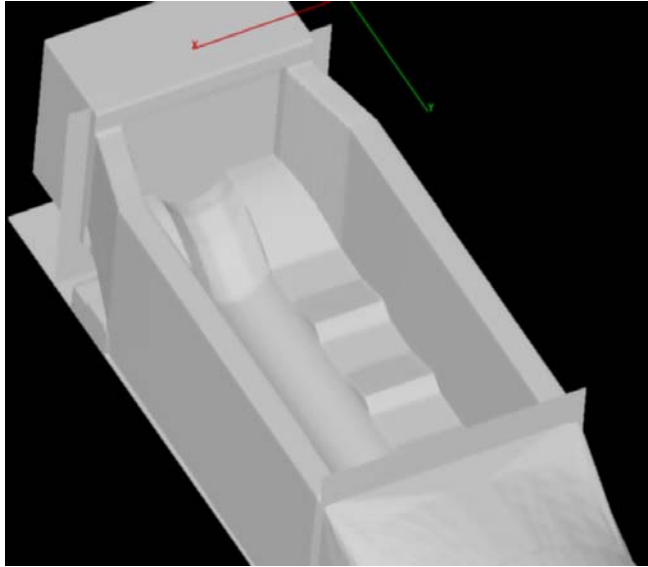


Figura 8 Definición geométrica para la modelación CFD. Detalle del perfil WES y el cuenco con los elementos de macrorrugosidad.

Se optó por dividir en tres etapas el cálculo numérico, lo cual permitió optimizar la capacidad computacional disponible con mallados de mayor resolución. Estas tres fases de cálculo se corresponden con tramos sucesivos del colector, y entre ellas existen tramos de solape que garantizan la continuidad de la solución global obtenida. En dichos solapes se trasladan ó copian las distribuciones de velocidades en la sección, presiones, intensidad y disipación turbulenta. El control hidráulico lógicamente es el calado crítico al inicio del WES.

El primer tramo cubre 160 metros aguas arriba del tramo curvo. El segundo tramo comprende el tramo en curva del colector (80 m) hasta el vertedero, y el último tramo, de 45 metros de longitud, se inicia en el perfil WES, incluyendo el cuenco, transición a sección ovoide y un tramo final rectilíneo (sección ovoide). En la figura 9 se esquematizan los tramos seleccionados de colector asociados a las sucesivas fases del cálculo numérico. Como se puede observar, entre ellas existen tramos de solape que permiten verificar la continuidad de la solución hidráulica obtenida, comprobándose la corrección de las distribuciones de velocidad en las secciones de solape por contraste de los resultados derivados de las sucesivas fases de cálculo.

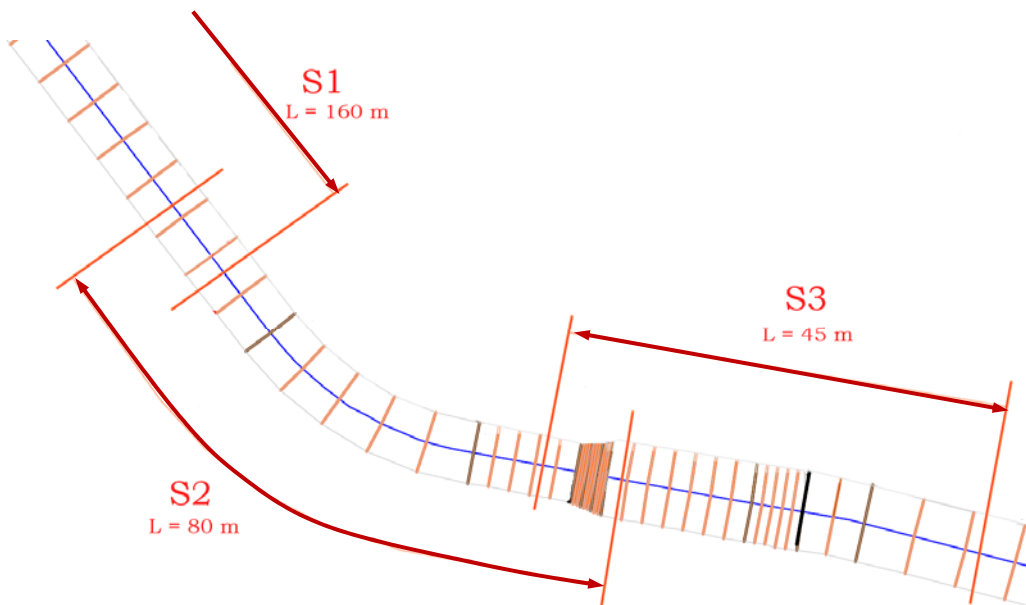


Figura 9 Esquema de la subdivisión en tramos solapados para organizar el cálculo numérico.

En cuanto al mallado numérico, se utilizó un mallado estructurado a base de hexaedros regulares referidos a unos ejes fijos x-y-z, con el eje z vertical y el eje y coincidente con el eje en planta del tramo ovoidal. Este tipo de mallado presenta la ventaja inicial de una representación geométrica más sencilla con elementos estrictamente ortogonales, de modo que el manejo de los índices para la asignación o identificación de celdas se simplifica y la construcción de las aproximaciones en diferencias finitas para las ecuaciones de flujo es más directa. Por el contrario, y como resulta obvio, los mallados estructurados ortogonales no se adaptan a los contornos sólidos que confinan el movimiento, como es el caso de los elementos finitos o los métodos BFC (*body-fitted coordinates*).

En cuanto a la resolución espacial de la malla, como es sabido, se hace necesaria una definición del mallado mucho más fina en las zonas con mayores gradientes de velocidad y en general, en las proximidades de los contornos sólidos. Manteniendo la opción del mallado estructurado, esta cuestión se ha tratado a base de considerar bloques de celdas con resolución gradualmente variable, así como la disposición de distintos bloques contiguos, cada uno de ellos con densidad de malla propia (fig. 10).

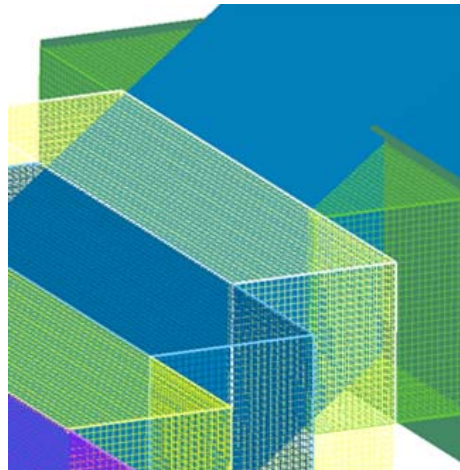


Figura 10 Bloques contiguos con diferentes densidades de mallado.

Por último, se han fijado aristas y planos limitando zonas de flujo de especial importancia. Por ejemplo, las aristas horizontales que definen la coronación de los elementos de rugosidad dispuestos en el cuenco de amortiguación (fig. 11). En el mallado de cálculo, se disponen los bloques de celdas de modo que tales planos y/o aristas necesariamente coincidan con caras o aristas de celdas internas.

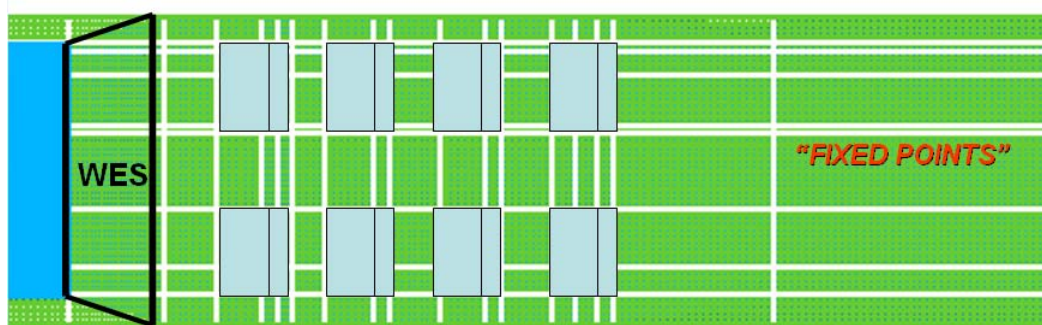


Figura 11 Definición de planos y aristas coincidentes forzosamente con límites de celda de cálculo.

Los contornos geométricos tridimensionales que definen el tramo de colector a analizar tienen un grado de complejidad importante, debido a las curvas, transiciones, cambios bruscos de pendiente y sobre todo, formas en la solera (caz, elementos de macrorrugosidad, etc.). En consecuencia, y para conseguir la fiabilidad deseada en la representación numérica del flujo tridimensional, es de especial importancia la cuestión de la adaptación de la malla de cálculo a los contornos sólidos.

La malla estructurada empleada hace que todas y cada una de las celdas tengan sus aristas respetando las direcciones x, y, z prefijadas. Es decir, eje y en la dirección del eje del tramo ovoidal final, eje z vertical, y eje x perpendicular a los dos anteriores. Cuando una cara de una celda elemental queda intersectada por la pared, origina automáticamente una fracción de área útil a efectos de cálculos de flujo inter-celda, y análogamente ocurre con la fracción de volumen a efectos de ocupación de espacio por el fluido. De esta forma, y mediante algoritmos automáticos sencillos, se definen con precisión los obstáculos y contornos que confinan el flujo sin sacrificar precisión en la solución numérica. Las aproximaciones de las variables dinámicas se restringen a las regiones abiertas (útiles) de las celdas, imponiéndose en el contorno la condición de no-deslizamiento.

La parte del flujo que fue objeto de un mayor tiempo de computación corresponde a la zona donde se produce el resalto hidráulico, es decir, la zona del cuenco con los elementos de macrorrugosidad en la solera. Para dicho tramo, se empleó una malla de cálculo con 6 millones de celdas, con resolución gradualmente variable desde los contornos hacia el centro, más fina en las proximidades de los disipadores de energía y cajeros. El incremento de tiempo empleado fue $\Delta t = 0.7 \cdot 10^{-3}$ s.

Se ha empleado el software *FLOW-3D* (Blazek, 2001; Tota, 2009) para la solución numérica de las ecuaciones de Navier-Stokes para el flujo medio:

$$\rho \overline{u_j} \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} = \rho X_i - \frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} - \rho \overline{u_i' u_j'} \right]$$

donde ρ es la densidad del agua, μ su viscosidad dinámica, las barras indican promediación en el tiempo, p es la presión, u_i es la componente en la dirección “i” de la velocidad, u_i' representa la fluctuación de velocidad instantánea debido a la turbulencia, con $i=1,2,3$, X_i es la fuerza de campo gravitatoria y siendo:

$$\kappa = \frac{1}{2} \cdot \left(\overline{(u_1')^2} + \overline{(u_2')^2} + \overline{(u_3')^2} \right)$$

la energía cinética turbulenta por unidad de masa.

Las tensiones de Reynolds $\left[-\rho \overline{u_i' u_j'} \right]$ se aproximan mediante la hipótesis de viscosidad turbulenta (ν_T), con:

$$\nu_T = C_\mu \cdot \frac{\kappa^2}{\varepsilon} \quad (\text{Kolmogorov-Prandtl})$$

donde $C_\mu=0.0885$ para el modelo κ - ε (RNG) y ε la tasa de disipación de la turbulencia.

Para la representación matemática de la turbulencia se introducen índices locales de creación/destrucción de turbulencia, tratando el proceso de mezcla turbulenta como un proceso difusivo con las escalas espaciales y temporales características (respectivamente L_T y T_T):

$$L_T = \frac{\kappa^{3/2}}{\varepsilon}; \quad T_T = \frac{\kappa}{\varepsilon},$$

Para la modelación numérica se utiliza el modelo de turbulencia κ - ε (RNG) con sendas ecuaciones de transporte para la energía cinética turbulenta (κ) y para la tasa de disipación (ε) (Hirsch, C., 2007). En todos los tramos de colector considerados, las simulaciones se extendieron hasta alcanzarse una situación estacionaria para el caudal de proyecto $Q=100$ m³/s. No se ha empleado ninguna información de laboratorio o medida extraída del modelo físico reducido para la ejecución del modelo matemático.

Los resultados obtenidos permiten conocer los campos de velocidades, presiones, vorticidad e intensidad de la turbulencia en todos los puntos de la región 3D analizada. En la figura 12 se muestra una instantánea para el resalto hidráulico.

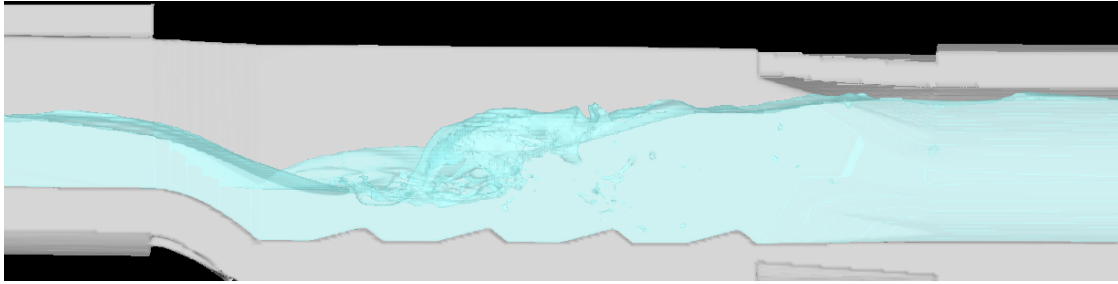


Figura 12 Instantánea del resalto hidráulico para $100 \text{ m}^3/\text{s}$.

En la figura 13 se muestra el contraste entre las mediciones en laboratorio (modelo físico reducido) y modelo numérico, para el perfil de la lámina en la sección crítica. El error es de 1,3 %.

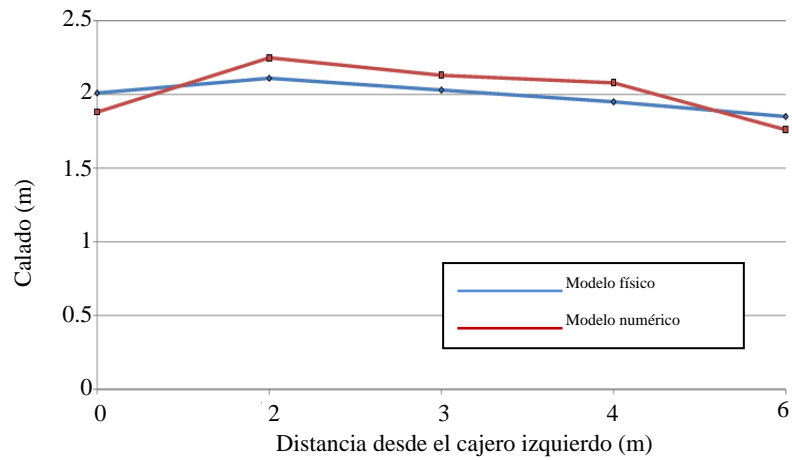


Figura 13 Perfil de la lámina libre en la sección crítica.

Otros aspectos de la geometría del flujo (el resalto hidráulico, los calados normales, la separación de la lámina en el ensanchamiento previo al cuenco) contrastan muy favorablemente con las mediciones del laboratorio.

En la figura 14 se indica la medición correspondiente al calado supercrítico aguas abajo del WES. En el modelo físico se obtiene 72 mm, que traducido a la escala real ($\times 20$) supone un calado de 1.44 m. En el modelo numérico se obtiene un calado de 1.41 m. Se ha medido la separación de la lámina junto a los cajeros en la zona de ensanchamiento coincidente con el perfil WES. Los resultados contrastan favorablemente.

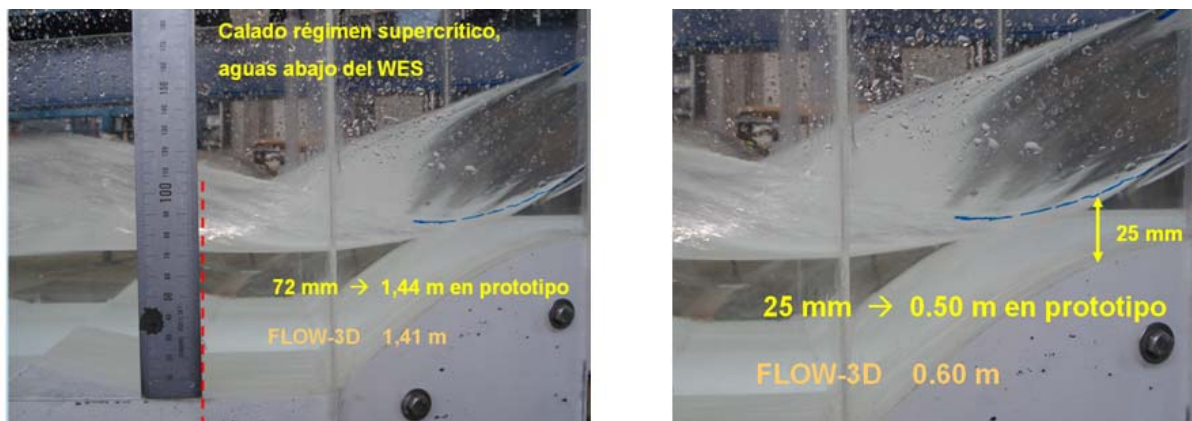


Figura 14 Contraste de medidas laboratorio – modelo numérico.

5 Conclusiones

Los resultados alcanzados confirman las herramientas CFD (*computacional fluid dynamics*) como técnicas complementarias a los modelos físicos con un importante potencial de beneficios prácticos en diseño hidráulico urbano y en el diseño de estructuras hidráulicas en general, todo ello condicionado a una buena calibración del modelo matemático. Permiten reducir la carga de trabajo en el laboratorio (con reducción selectiva del número de diseños a probar), ampliando el abanico de variables cuantitativas derivadas, algunas de ellas de difícil medición en el laboratorio, en especial para aquellas zonas o regiones de flujo con problemáticas locales o más decisivas en el diseño global del dispositivo hidráulico. Todo ello puede redundar en una reducción de costes totales al abordar el problema con esta estrategia conjunta, mejorándose tanto la extensión como la fiabilidad de los resultados finales.

6 Referencias

Blazek, J. 2001. *Computational Fluid Mechanics: Principles and Applications*. Editorial Elsevier.

Hirsch, C. 2007. *Numerical Computation of Internal and External Flows*. Volume 1, Second Edition. The Fundamentals of Computational Fluid Dynamics. Ed. Elsevier.

Marco Segura J. B., 2006. *Disipación de energía en grandes colectores. El sistema de colectores de pluviales de Alicante*. Jornada sobre diseño hidráulico de grandes colectores. Grupo Flumen. Universitat Politècnica de Catalunya.

Tota, P. V. 2009. *Turbulent Flow over a Backward-Facing Step Using the RNG κ - ε Model*. Flow Science.

Vallés Morán F. J., Andrés Doménech I., Marco Segura J. B., Eguibar Galán M. A. 2009. *Soluciones singulares de drenaje y desagüe urbanos*. Jornadas de Ingeniería del Agua. IAHR. Libro de actas. ISBN 978-90-78046-10-3.