

CHARACTERIZATION OF MODULAR ELEMENTS FOR STORM TANK CONSTRUCTION IN URBAN DRAINAGE SYSTEMS

Sánchez Beltrán, Héctor ¹; Iglesias-Rey, Pedro L. ¹; Martínez-Solano, F. Javier ¹;
Saldarriaga Valderrama, Juan ²; Barrera Triviño, Juan ²

¹ Universitat Politècnica de València, ² Universidad de Los Andes

Storm tanks are increasingly used to control flooding caused by the increase of runoff flows generated by rainfalls. To speed up the construction of these infrastructures and reduce downtime of urban supplies, plastic modular elements are used as basic building structures.

This paper presents the characterization of this type of modular elements. That is, determining the energy dissipation presented by these elements to water flow movement, and compare the hydraulic behavior of these modular reservoir with concrete conventional ones.

Characterization of modular elements is made from a three dimensional model. Then CFD techniques are applied mainly focused on application of the VOF (Volume of Fluid) model. Final model has been validated using an experimental prototype. The prototype consists of 16 modular structures fully monitored in order to analyze both flows and water levels at different points of the system.

The final result is a validated and calibrated model that can represent the behavior of such infrastructure against high intensity storms.

Keywords: Storm tanks; urban drainage; CFD

CARACTERIZACIÓN DE ELEMENTOS MODULARES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE DEPÓSITOS DE RETENCIÓN EN SISTEMAS DE DRENAJE URBANO PLUVIAL.

Los tanques de tormenta son una solución cada vez más empleada para el control de las inundaciones originadas por el aumento de los caudales de escorrentía generadas por las lluvias. Para agilizar la construcción de estas infraestructuras y reducir los tiempos de interrupción de los suministros urbanos, se emplean elementos modulares plásticos como estructura básica de construcción.

Este trabajo presenta la caracterización de este tipo de elementos modulares. Se trata de determinar la disipación energética que presentan estos elementos al paso del agua y comparar el comportamiento hidráulico de estos depósitos modulares frente a los depósitos convencionales de obra.

La caracterización de los elementos modulares realiza a partir de un modelo tridimensional de los mismos al que se aplican técnicas CFD, fundamentalmente centradas en a aplicación del modelo VOF (Volumen of Fluid). Este modelo se ha validado utilizando un prototipo experimental construido. Dicho prototipo consta de 16 estructuras modulares completamente monitorizadas a fin de poder analizar tanto los caudales circulantes como los niveles en diferentes puntos del sistema.

El resultado final es un modelo validado y calibrado que permite representar el comportamiento de este tipo de infraestructuras frente a tormentas de fuerte intensidad.

Palabras clave: Tanques de tormenta; Drenaje urbano; CFD

Correspondencia: Pedro L. Iglesias-Rey (piglesia@upv.es)

Agradecimientos: Los autores agradecen a Mexichem, Colombia por financiar la presente investigación a través del proyecto "Drenaje Urbano y Cambio Climático: hacia los sistemas de alcantarillado del futuro. Fase II", sin el cual no habría sido posible completar este estudio.

1. Introducción

El creciente desarrollo urbanístico de los núcleos de población en gran parte del mundo unido a los efectos apreciables del cambio climático está originando un aumento cada vez más importante y recurrente de los daños generados por inundaciones. Gran parte de las redes de drenaje de las ciudades se diseñaron para unas características de precipitación y periodos de retorno que han resultado ser insuficientes con el transcurso del tiempo. Por ello, es necesario abordar soluciones tanto para reducir los caudales de escorrentía generados como para controlar los circulantes por las redes de drenaje pluvial.

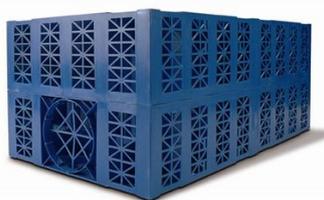
Todas estas tecnologías de control de caudales de lluvia son conocidas comúnmente como SUDS (Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible), término que engloba multitud de soluciones para el control de escorrentías, si bien muchas de ellas requieren de importantes costes de mantenimiento que las convierten en prácticamente inviables. Por ello, no solo se debe centrar la atención en reducir las escorrentías de entrada a la red sino también en el desarrollo de técnicas de control de caudales. La idea es diseñar estrategias que permitan laminar los picos de caudal de lluvia y aumentar al máximo la capacidad de las redes existentes.

La utilización de depósitos de retención y tanques de tormenta para el control de inundaciones, (Iglesias-Rey et al., 2014) es una solución cada vez más empleada como alternativa al control del aumento de las precipitaciones derivadas del cambio climático (Saldarriaga et al., 2014).

La naturaleza y ejecución de los tanques de tormenta puede ser muy diversa, desde los más convencionales basados en estructuras de hormigón hasta las más innovadoras que emplean estructuras modulares como elementos básicos de construcción favoreciendo la rapidez constructiva cuando el número de éstos que son envueltos por una estructura impermeable constituye un depósito de grandes dimensiones, a la vez que se consigue minimizar las interrupciones del suministro urbano.

Actualmente existe en el mercado una amplia gama de estructuras modulares con geometrías y tamaños diferentes. Se ha escogido el modelo de la marca Aquacell suministrado por Mexichem – PAVCO en Colombia mostrado en la Figura 1 para el desarrollo del presente estudio.

Figura 1: Elemento modular para la construcción de depósitos de retención modelo Aquacell®.



El flujo que se desarrolla a través de estas estructuras modulares es mucho más complejo que el presente en los depósitos convencionales generando una mayor disipación energética en su interior.

Esta disipación energética tiene dos efectos sobre el comportamiento global de los tanques. Por una parte, la pérdida de energía entre módulos contiguos hace que el tanque no se llene con una lámina de agua horizontal; esto es, el calado a la entrada del tanque puede ser notablemente superior al calado en alguno de sus extremos. Por otra parte, esta disipación energética supone una ralentización del flujo; fenómeno que en determinadas circunstancias

de las redes de drenaje puede contribuir a laminar caudal y mitigar posibles problemas de inundación.

2. Objetivos

El objeto del presente trabajo es analizar el comportamiento de este tipo de estructuras modulares. De forma particular se analizará el comportamiento de un elemento específico: el denominado módulo Aquacell de la casa Wavin y suministrado para el presente estudio por la empresa Mexichem-PAVCO Colombia. Se trata de comprender mejor el comportamiento de estos módulos para así poder extrapolar su comportamiento para el caso de tanques de tormenta reales, de grandes dimensiones y constituidos por un gran número de este tipo de elementos.

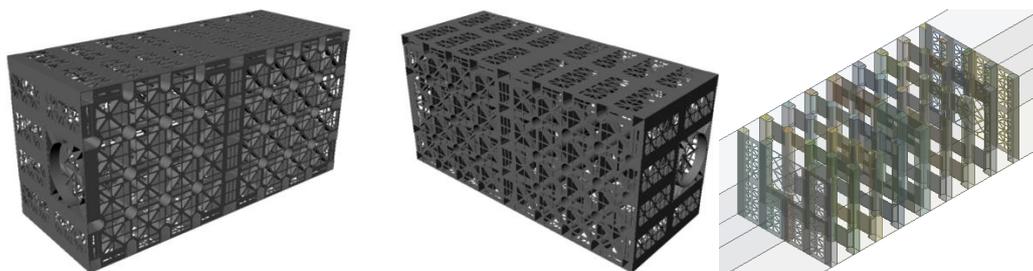
El estudio de este tipo de elementos se realizará en tres etapas diferentes. En una primera se va a caracterizar el comportamiento de los mismos mediante técnicas CFD (Computational Fluid Dynamics). Dicha caracterización supondrá básicamente obtener la disipación energética de cada uno de los elementos en función del caudal cuando el agua fluye en cualquiera de las direcciones en las que pueden instalarse estos módulos. Esta caracterización se completa con el estudio de la influencia que tiene en la disipación energética de estos elementos modulares la disposición de módulos adyacentes en ambas direcciones. Para ello se realizará mediante técnicas CFD el estudio de la influencia que tiene sobre el flujo la instalación de diferentes módulos tanto en dirección longitudinal como en dirección transversal.

En una segunda etapa se realiza la validación de los análisis realizados mediante técnicas CFD. Para ello se contrastan los resultados computacionales comparando los mismos con ensayos reales obtenidos a partir de un prototipo de canal construido en el laboratorio de hidráulica de la Universidad de Los Andes (Barrera et al., 2016). Finalmente, a partir de los estudios tanto computacionales como experimentales se elabora un modelo unidimensional de comportamiento de estas estructuras modulares. La finalidad de este modelo unidimensional es poder integrar el mismo en modelos computacionales específicos de análisis de redes de drenaje como SWMM (Rossman, 2015).

3. Metodología y caso de estudio.

Para caracterizar el comportamiento hidráulico de estos elementos modulares se van a emplear técnicas basadas en la dinámica de fluidos computacional (CFD). Estas técnicas ya han sido empleadas en el campo de la gestión del agua (Jarman et al., 2007); de forma específica en sistemas de drenaje urbano (Jarman et al., 2008) así como en la caracterización de depósitos (Adamsson et al., 2005). En concreto, para resolver este problema se utiliza el modelo ANSYS® Fluent (ANSYS Inc., 2013) a partir de una geometría simplificada del elemento que se ha generado a partir de una geometría completamente definida del mismo, mediante el modelo CAD de representación de sólidos.

Figura 2: Geometría real (izquierda) y simplificada (derecha) de la estructura modular.



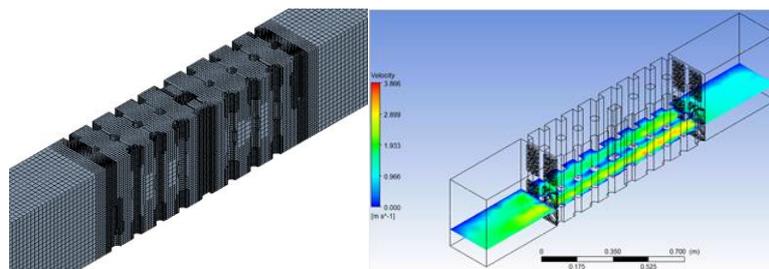
Las diferentes etapas fundamentales seguidas en el análisis mediante CFDs para definir el comportamiento de una de estas estructuras son: definición de la geometría, mallado de la estructura, procesado y post-procesado o presentación de resultados.

Estas cuatro etapas no se ciñen a un proceso meramente secuencial. Se trata más bien de un proceso iterativo en el que a partir de los resultados obtenidos (post-procesado) debe analizarse si es necesario modificar los parámetros de simulación (procesado), el tamaño de los elementos en que se divide el espacio de trabajo (mallado) o bien cambiar la forma del modelo (modificar la geometría).

A partir de la geometría completamente definida se realiza un modelo simplificado que represente adecuadamente las características geométricas de relevancia existentes en la estructura modular en la misma dirección del flujo. Además, el modelo simplificado presenta espesores nulos en todos sus elementos laminares con el fin de facilitar el mallado reduciendo el número de celdas del mismo y, por tanto, la velocidad de cálculo.

El modelo de mallado se ha seleccionado intentado respetar al máximo la forma hexaédrica regular de las celdas para garantizar una buena calidad de la malla, con valores de asimetría muy próximos a 1.

Figura 3: Mallado y post-procesado de un análisis mediante CFD de un bloque modular.



A partir de la malla, el análisis del comportamiento del agua por el interior del bloque modular se realiza empleando el modelo VOF (Volume of Fluid) desarrollado por Hirt y Nichols (1981), que permite determinar la cantidad tanto de agua como de aire que presenta cada una de las celdas. A fin de definir completamente el flujo se ha utilizado un modelo de turbulencia $k-\epsilon$ (Launder y Shima, 1989), por ser el más adecuado para los niveles de turbulencia y valores del número de Reynolds que se alcanzan en el interior de las estructuras modulares.

El esquema de resolución numérica empleado en la resolución del problema es del tipo “pressure based”, utilizando un esquema de tipo SIMPLE para el acoplamiento entre las ecuaciones de presión y las de velocidad. Las principales opciones de cálculo utilizadas para cada ecuación son:

- Cálculo del gradiente: Least Square Cell Based.
- Cantidad de movimiento: Second Order Upwind.
- Cálculo de la fracción de volumen de cada fase: Geo-Reconstruct.
- Energía Cinética Turbulenta: First Order Upwind.
- Presión: Body Force Weighted.

En base a esta configuración del modelo y a la definición del caudal de entrada se realiza el análisis. La simulación se va a ejecutar para régimen transitorio dando por finalizada la misma cuando se establezca el régimen permanente en el sistema. Una vez concluido el proceso de cálculo se procede al posterior post-procesado de los resultados la figura 3, que

permite analizar las características del flujo desarrollado en el interior de las estructuras modulares, así como determinar el perfil de calados a lo largo del modelo objeto de estudio. A partir del cual, es posible obtener los valores de los parámetros n-K que caracterizan la disipación energética generada por la existencia de los citados elementos modulares.

CONFIGURACIONES ANALIZADAS

Una vez construido el modelo CFD es necesario definir los casos de estudio que se procederá a abordar. Dado que el objetivo que se persigue es determinar la disipación energética de estos elementos modulares tanto longitudinal como transversalmente, la idea es representar en primer lugar el comportamiento de un solo elemento modular de forma aislada para posteriormente determinar la influencia que presenta la instalación la instalación de varias de estas estructuras una a continuación de la otra en ambas direcciones.

Figura 4: Configuraciones estudiadas.

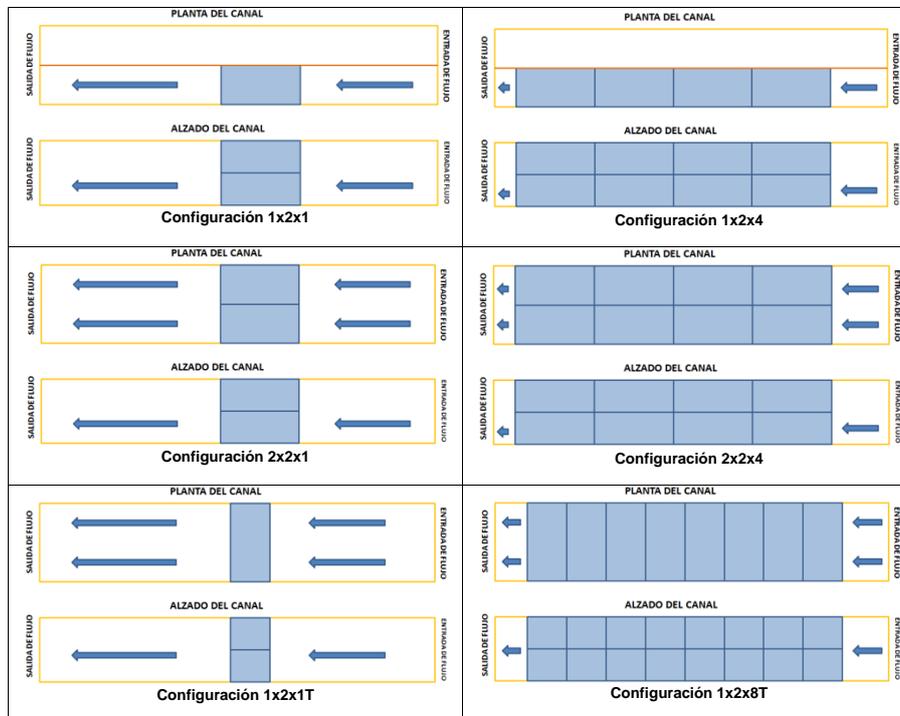


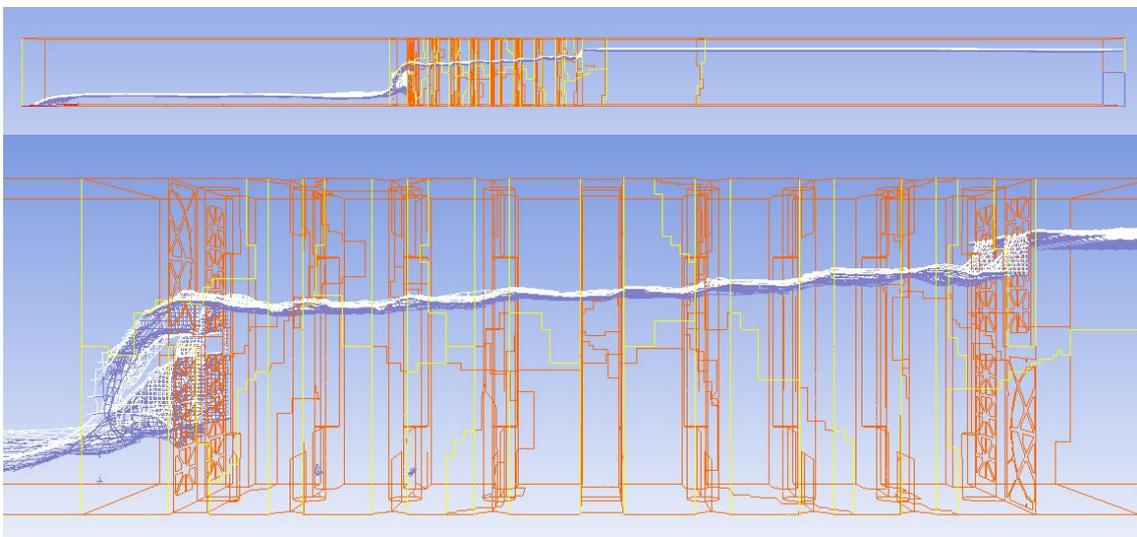
Tabla 1: Detalle de las diferentes configuraciones a estudiar.

Configuración	1x2x1	1x2x4	2x2x1	2x2x4	1x2x1T	1x2x8T
Nº filas de bloques modulares en la dirección del flujo	1	4	1	4	1	8
Nº filas de bloques modulares en la dirección perpendicular al flujo	1	1	2	2	1	1
Nº filas de bloques modulares en vertical	2	2	2	2	2	2
Nº total de bloques modulares instalados	2	8	4	16	2	16

Finalmente, se analizan dos casos distintos. El primero se basa en estudiar el comportamiento de un único elemento modular situado en la dirección del flujo de forma individual. Esto permite analizar con detalle las pérdidas localizadas a la entrada y a la salida, así como las pérdidas distribuidas de forma uniforme a lo largo del propio elemento modular. El segundo caso recoge una serie de cuatro bloques consecutivos. Ambos casos se han analizado mediante técnicas CFD y los resultados obtenidos mediante esta modelación han sido validados a partir de los perfiles de flujo obtenidos de un prototipo experimental construido en el Laboratorio del CIACUA en la Universidad de los Andes (Barrera et al., 2016).

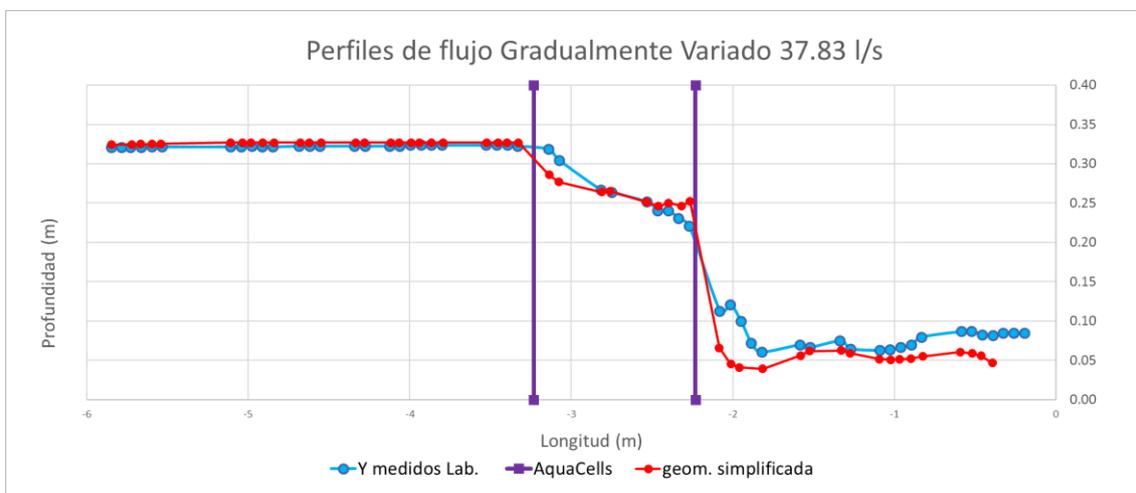
Los resultados obtenidos para el primero de los casos descritos en el párrafo anterior para un caudal circulante de 37.83 l/s son los que se muestran en la figuras 5.

Figura 5: Perfil adoptado por el flujo de agua en canal completo para configuración 1x2x1, Q=37.83 l/s.



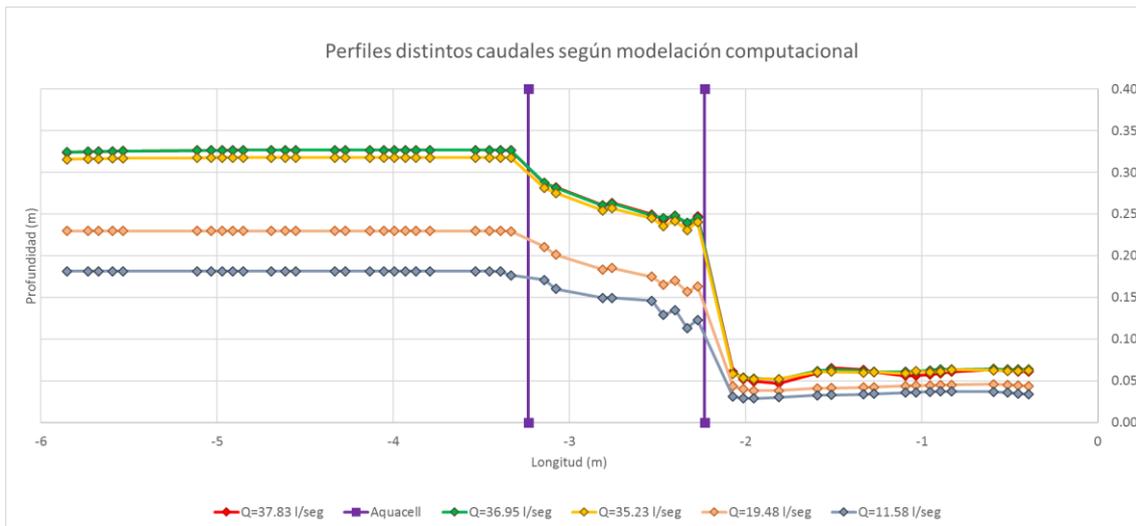
A continuación, se procede a validar el perfil obtenido a partir de la solución obtenida mediante CFD con los resultados observados en el laboratorio. La comparativa de ambos perfiles se puede observar en la figura 7.

Figura 7: Comparativa perfiles obtenidos en laboratorio vs ANSYS para configuración 1x2x1, Q=37.83 l/seg.



A partir de la figura 7 se observa una importante similitud entre ambos perfiles. Por tanto, se da por válida la forma de proceder llevada a cabo para obtener la solución mediante modelación computacional. Posteriormente, se realiza el cálculo de una serie de simulaciones computacionales para distintos caudales para la misma configuración, empleando un procedimiento idéntico. Los perfiles obtenidos para todos los caudales analizados se presentan en la figura 8.

Figura 8: Comparativa perfiles obtenidos mediante CFD para distintos caudales en configuración 1x2x1.



Validados los resultados del CFD se procede a determinar los parámetros que caracterizan el comportamiento del bloque modular, asimilando su comportamiento al de una conducción. En este caso, se pretende determinar los valores del coeficiente de Manning y de las pérdidas de carga a la entrada y salida de la estructura modular.

Para ello se toma como punto de partida los valores del calado en diferentes puntos antes y después de las caras de entrada y salida del Aquacell. El valor del coeficiente de pérdidas de carga adimensional en una de las caras del Aquacell se determina analizando la pérdida de energía entre un punto antes (punto 1) y otro después (punto 2) de dicha cara. Matemáticamente el coeficiente k se determina mediante la expresión (1).

$$k = \frac{2g \cdot \Delta H}{\left(\frac{v_1 + v_2}{2}\right)^2} \quad (1)$$

En la expresión anterior:

- k es el valor del coeficiente adimensional de pérdidas de carga localizada de la cara del Aquacell.
- v_1 y v_2 son las velocidades en los puntos aguas arriba y aguas abajo de la cara del Aquacell. Dichas velocidades se obtienen a partir del caudal Q circulante y de los calados z_1 y z_2 en los mismos puntos.
- ΔH es la pérdida de energía entre los puntos 1 y 2. Dicha diferencia de energía se termina de acuerdo a la expresión:

$$\Delta H = E_1 - E_2 = \left(z_1 + \frac{v_1^2}{2g}\right) - \left(z_2 + \frac{v_2^2}{2g}\right) \quad (2)$$

De forma simulada se realiza el cálculo del coeficiente de Manning equivalente para el tramo de Aquacell estudiado. Se parte así de la ecuación de Manning que relaciona la velocidad V en el conducto con el radio hidráulico R_h y la pendiente hidráulica s .

$$V = \frac{1}{n} \cdot R_h^{2/3} \cdot s^{1/2} \quad (3)$$

Así, el coeficiente de Manning equivalente se obtiene de la ecuación (3) considerando un valor medio de la velocidad como promedio de la entrada y la salida y un valor también promedio del radio hidráulico. La pendiente hidráulica s se obtiene como el ratio entre la diferencia de energías entre la entrada y la salida y la longitud L del Aquacell.

Este planteamiento de cálculo basado en determinar las pérdidas localizadas tanto a la entrada como a la salida del elemento modular, así como de su coeficiente de Manning equivalente se aplica en dos casos: a los resultados obtenidos directamente de los ensayos de laboratorio (Tabla 2) y a los resultados obtenidos del análisis mediante técnicas CFD para la geometría simplificada introducida en el modelo.

Tabla 2: Pérdidas localizadas y coeficiente de Manning equivalente para un bloque modular en configuración 1x2x1 a partir de los datos de laboratorio (Q=37.83 l/s).

Q = 37.83 l/s - Datos de los ensayos de laboratorio.													
Obtención del coeficiente de pérdidas adimensionales k													
Q	z1	z2	v1	v2	v1 ² /2g	v2 ² /2g	E1	E2	ΔH	ki			
37.83	0.32	0.267	0.23	0.28	0.00	0.00	0.33	0.27	0.05	16			
37.83	0.22	0.072	0.34	1.06	0.01	0.06	0.23	0.13	0.10	4			
Obtención del coeficiente de Manning equivalente													
Q	x1	z1	x2	z2	L	Dz	s	v1	v2	A1	A2	Rh	n
37.83	-2.82	0.267	-2.27	0.22	0.545	0.046	0.08	0.28	0.343	0.133	0.110	0.123	0.229

Tabla 3: Pérdidas localizadas y coeficiente de Manning equivalente para un bloque modular en configuración 1x2x1 a partir de los resultados CFD con la geometría simplificada (Q=37.83 l/s).

Q = 37.83 l/s - Resultados CFD con geometría simplificada													
Obtención del coeficiente de pérdidas adimensionales k													
Q	z1	z2	v1	v2	v1 ² /2g	v2 ² /2g	E1	E2	ΔH	ki			
37.83	0.33	0.29	0.23	0.26	0.00	0.00	0.33	0.29	0.04	12			
37.83	0.25	0.06	0.31	1.24	0.00	0.08	0.25	0.14	0.11	4			
Obtención del coeficiente de Manning equivalente													
Q	x1	z1	x2	z2	L	Dz	s	v1	v2	A1	A2	Rh	n
37.83	-3.142	0.286	-2.48	0.24	0.68	0.044	0.065	0.26	0.312	0.14	0.12	0.13	0.225

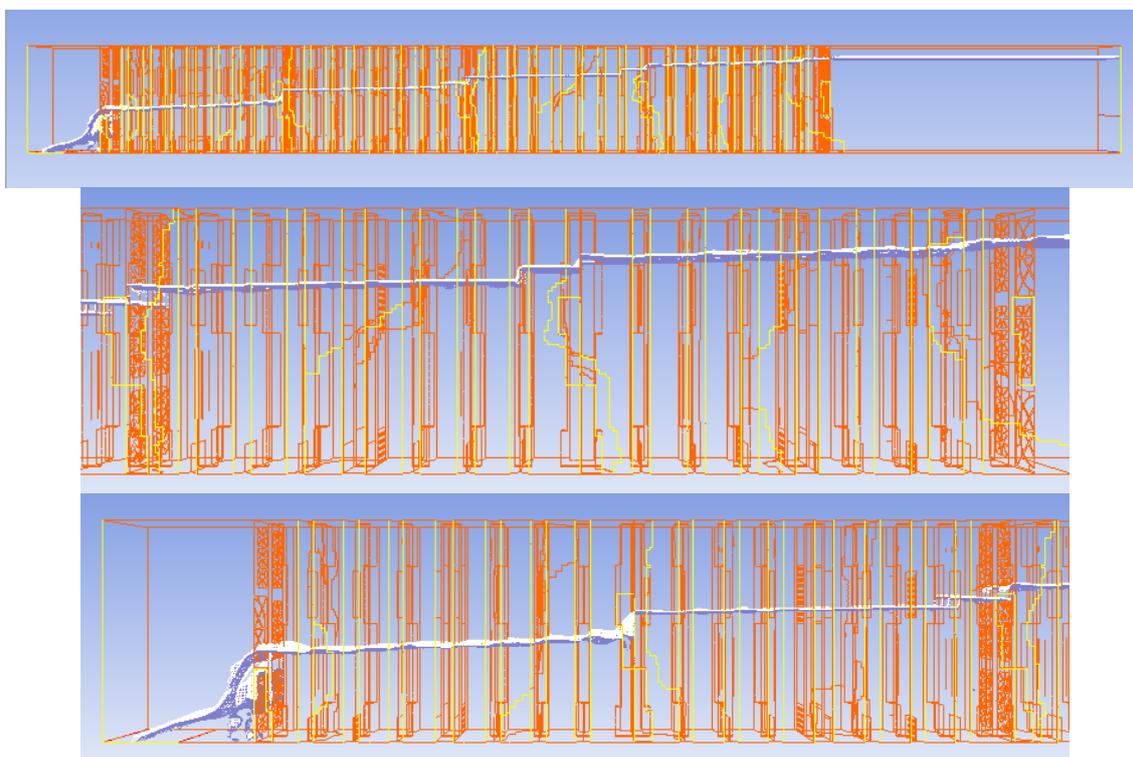
A continuación, se muestra la tabla 4 en la que se presentan todos los valores del coeficiente de Manning (n_{eq}), así como los coeficientes de pérdidas localizadas a la entrada (k_{ent}) y a la salida (k_{sal}) de la estructura modular dispuesta en la misma dirección del flujo para la configuración 1x2x1.

Tabla 4: Tabla resumen de los valores N-K en conf. 1x2x1, obtenidos mediante CFD.

Q (l/s)	CFD geometría simplificada		
	η_{eq}	k_{ent}	k_{sal}
37.83	0.225	12	4
36.95	0.229	13	4
35.23	0.238	13	4
19.48	0.252	16	5
11.58	0.220	22	6

En el caso de la existencia de cuatro bloques consecutivos, la solución del perfil obtenida para un caudal circulante de 37.83 l/s es la que se presenta en las figuras 9, 10 y 11.

Figura 9: Perfil adoptado por el flujo de agua en canal completo para configuración 1x2x4, Q=37.83 l/s.



En la figura 12 se muestra la gráfica correspondiente a la validación de la solución obtenida mediante técnicas computacionales. En la que se compara el perfil obtenido mediante CFD con el perfil medido en laboratorio para este caso. A partir de los resultados obtenidos se da por válida la solución obtenida mediante técnicas computacionales.

De la misma forma que se ha expuesto para la configuración 1x2x1, se procede a calcular los valores del coeficiente de manning así como del coeficiente adimensional k de pérdidas localizadas para cada uno de los bloques modulares tanto para el caso ensayado en laboratorio como para el caso modelado computacionalmente. Los valores obtenidos son los que se muestran en la tabla 5.

Figura 12: Comparativa perfiles obtenidos en laboratorio vs ANSYS para configuración 1x2x4, Q=37.83 l/seg.

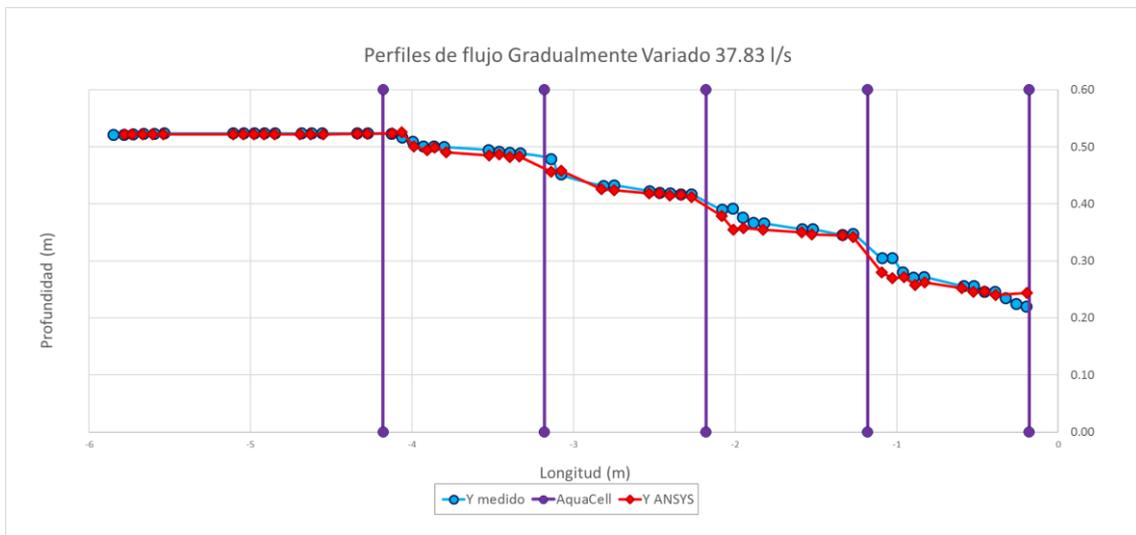


Tabla 5: Tabla resumen de los valores N-K en conf. 1x2x4, laboratorio vs CFD para Q=37.83 l/s.

Orden bloques modulares	Laboratorio		CFD	
	n_{eq}	k_i	n_{eq}	k_i
1	0.279	21	0.318	20
2	0.372	28	0.252	40
3	0.256	27	0.193	27
4	0.226	23	0.207	20

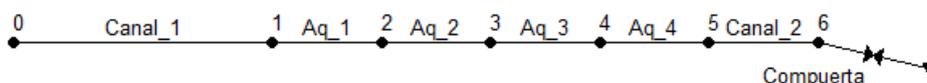
En este caso, el valor del coeficiente k de pérdidas localizadas para el bloque 1 engloba solo las pérdidas localizadas a la entrada, en cambio para el resto de elementos se corresponde con la suma de las pérdidas localizadas a la salida del bloque anterior a las que se suman las pérdidas localizadas a la entrada del bloque que le precede.

MODELO UNIDIMENSIONAL DE COMPORTAMIENTO DE UN DEPÓSITO MODULAR.

Como se ha expuesto anteriormente en el apartado de objetivos, la finalidad del presente estudio radica en realizar una propuesta de representación del comportamiento de este tipo de estructuras modulares mediante modelos unidimensionales que puedan ser integrados en modelos computacionales específicos de análisis de redes de drenaje como es el caso del SWMM.

El modelo unidimensional para la configuración 1x2x4 es el que se recoge en la figura 13.

Figura 13: Modelo unidimensional en SWMM5 de la configuración 1x2x4.



En el modelo de la figura 9 existen cuatro bloques modulares en la dirección del flujo, instalados entre los nudos 1 y 5; y definidos por las líneas Aq_1, Aq_2, Aq_3 y Aq_4. A partir del modelo de la configuración estudiada desarrollado en SWMM se ha realizado el ajuste de los valores tanto del coeficiente de Manning (n) como de los coeficientes de pérdidas de carga adimensional a la entrada (k_{ent}) y a la salida (k_{sal}). Dicho ajuste se ha realizado en base a una herramienta computacional que utiliza el Toolkit de SWMM y que va probando para cada caudal cuales son los valores de dichos coeficientes que mejor se ajustan.

El proceso de ajuste pretende encontrar la combinación de estos tres parámetros que mejor ajustan los resultados de la simulación obtenida mediante el modelo SWMM con los resultados obtenidos del análisis previo de dichos elementos.

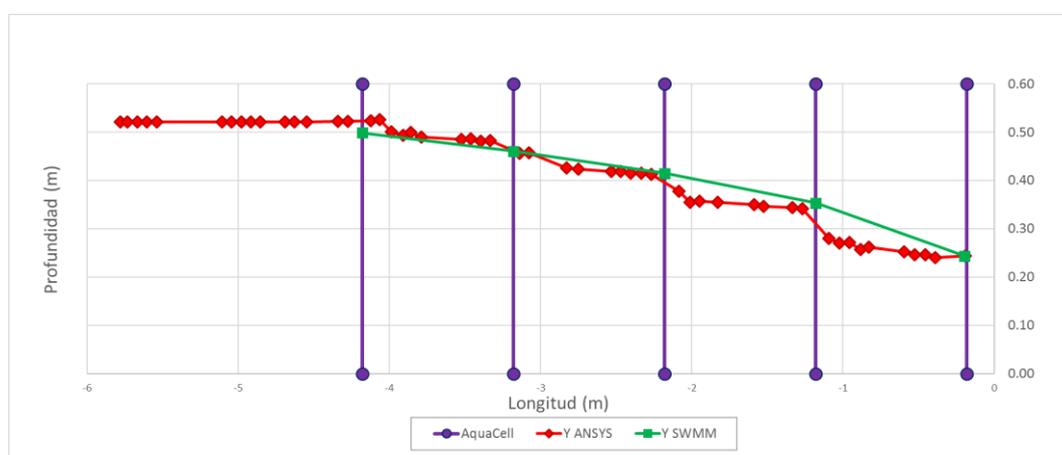
Tras realizar el proceso de ajuste para diferentes caudales, los valores óptimos son los que se recogen en la tabla 6.

Tabla 6: Ajuste de los parámetros n , k_{ent} y k_{sal} para la configuración 1x2x4.

Q (l/s)	n	k_{ent}	k_{sal}	$k_{tot}=k_{ent}+k_{sal}$
37.83	0.20	15	10	25
36.52	0.20	15	12	27
36.09	0.20	15	12	27
30.37	0.20	15	12	27
28.85	0.20	12	10	22
25.59	0.20	13	10	23
24.22	0.20	15	15	30
23.22	0.20	15	14	29

A fin de mostrar la bondad de los resultados obtenidos mediante el ajuste de los coeficientes n , k_{ent} , k_{sal} ; en la figura 14 se recoge una gráfica comparativa entre los resultados de la simulación mediante el modelo SWMM y los resultados obtenidos computacionalmente. En esta gráfica se presenta una imagen en la que se observan los puntos correspondientes a los valores de la energía del flujo a lo largo de los distintos elementos modulares obtenidos mediante modelación computacional, sobre los que se superpone una línea de color verde que une los puntos correspondientes a los valores de la energía obtenidos para la mejor combinación de parámetros encontrada.

Figura 14: Perfil obtenido mediante CFD vs perfil parámetros ajustados, $Q=37.83$ l/s.



Finalmente, en la tabla 7 se presentan los valores de los parámetros n y k óptimos obtenidos mediante SWMM tanto para el caso ensayado en laboratorio como para el caso simulado en ANSYS.

Tabla 7: Comparación parámetros n , k_{ent} y k_{sal} óptimos para la configuración 1x2x4 laboratorio vs CFD, $Q=37.83$ l/s.

Laboratorio				CFD			
n_{eq}	k_{ent}	k_{sal}	$k_{tot}=k_{ent}+k_{sal}$	n_{eq}	k_{ent}	k_{sal}	$k_{tot}=k_{ent}+k_{sal}$
0.2	15	10	25	0.2	11	10	21

4. Conclusiones.

Algunas de las conclusiones del presente trabajo son:

- Los modelos CFD desarrollados son absolutamente válidos para analizar y estudiar tanto el comportamiento como la disipación energética de las estructuras modulares de construcción de tanques de retención. Estos modelos han mostrado una buena correlación con los resultados obtenidos del modelo experimental.
- La disipación energética de este tipo de elementos ha quedado perfectamente establecida. A pesar de su complejidad dicha disipación puede considerarse concentrada en tres puntos diferentes del mismo: en la entrada del módulo, a la salida del mismo, y una disipación distribuida a lo largo de la longitud del módulo.
- El análisis y estudio tanto experimental como mediante modelos CFD ha permitido construir un modelo unidimensional de caracterización de este tipo elementos y estructuras. Dicho modelo se ha implementado en el modelo hidráulico de drenaje SWMM.

En definitiva, las técnicas CFD se han mostrado sumamente eficaces para el estudio y caracterización de depósitos modulares. Los resultados obtenidos mediante el análisis computacional y la verificación experimental son bastante próximos. Por ello puede afirmarse, que dicha técnica podrá ser empleada en primer lugar como herramienta para la caracterización de depósitos de mayores dimensiones. Asimismo, podrá emplearse la herramienta para determinar la disipación energética de estas estructuras en otras condiciones de flujo y en otras configuraciones diferentes a las analizadas, sin la necesidad de emplear los enormes costes experimentales que serían necesarios. Sin duda la utilización en más profundidad permitirá en el futuro el análisis de grandes depósitos de retención construidos con estructuras modulares y determinar cómo son las condiciones de llenado y vaciado de los mismos cuando acontecen episodios de lluvia intensos.

5. Bibliografía.

- Andrés-Doménech, I. ; Montanari, A. ; and Marco, J.B. (2012). "Efficiency of Storm Detention Tanks for Urban Drainage Systems under Climate Variability". *Water Resour. Plann. Manage.* 2012.138:36-46.
- Adamsson, Å., Bergdahl, L., & Lyngfelt, S. (2005). "Measurement and three-dimensional simulation of flow in a rectangular detention tank". *Urban Water Journal.* 2(4), 277-287.
- Barrera, J.C.; Montes, C.D.; Saldarriaga, J.; Iglesias, P.L.; Martínez, F.J. (2016). "Modelación física de tanques modulares de tormenta". XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Lima, 26-30 septiembre de 2016 (Perú).

ANSYS Inc. (2013). ANSYS Fluent User's Guide. Release 15.0. ANSYS Inc, Southpointe, Canonsburg, PA (EEUU).

Chorin, A. J. (1968). "Numerical solution of the Navier-Stokes equations". *Mathematics of computation*, 22(104), 745-762.

Gironás, J., Roesner, L. A., Rossman, L. A., & Davis, J. (2010). "A new applications manual for the Storm Water Management Model (SWMM)". *Environmental Modelling & Software*, 25(6), 813-814.

Hirt, C.W.; Nichols, B.D. (1981). "Volume of Fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries". *Journal of Computational Physics* 39 (1): 201–225. doi:10.1016/0021-9991(81)90145-5.

Iglesias-Rey, P.L.; Martínez-Solano, F.J.; Saldarriaga, J.; Vallejo, D. (2014). "Localización de tanques de tormenta para control de inundaciones mediante un algoritmo pseudo-genético". XIII Simpósio Iberoamericano de Redes de Água, Esgoto e Drenagem. *Linguas Ibéricas como Instrumento de Conhecimento, Ciência e Tecnologia*. 03-06 noviembre 2014, Fortaleza, Brasil.

James, W., Rossman, L. A., & James, W. R. C. (2010). *User's guide to SWMM 5*. CHI.

Jarman, D. S., Faram, M. G., Butler, D., Tabor, G., Stovin, V. R., Burt, D., & Throp, E. (2008). "Computational fluid dynamics as a tool for urban drainage system analysis: A review of applications and best practice". 11th ICUD – 11th International Conference on Urban Drainage. 31 August - 5 September 2008, Edinburgh, Scotland.

Jarman DS, Faram MG, Tabor G, Butler D. (2007). "A review of the opportunities presented through the application of Computational Fluid Dynamics (CFD) to water management challenges". *Water Management Challenges in Global Change*. CCWI2007 and SUWM2007. Leicester, UK.

Launder, B. E., & Shima, N. (1989). "Second-moment closure for the near-wall sublayer. Development and application". *AIAA journal*, 27(10), 1319-1325.

Rossman, L.A. (2015). *Storm Water Management Model. User's Manual Version 5.1*. EPA, Cincinnati, OH (EEUU).

Saldarriaga, J.; Camilloni, I.; Cunha, M.; Simoes, N.; Zeferino, J.; Iglesias, P.; Martínez, F.J., Ocampo-Martínez, C.; Quijano, N.; Paez, D.; Bohorquez, J.M.; Salcedo, C.A.; Vallejo, D. (2014). "Drenaje urbano y cambio climático: hacia los sistemas de alcantarillado del futuro". XIII Simpósio Iberoamericano de Redes de Água, Esgoto e Drenagem. *Linguas Ibéricas como Instrumento de Conhecimento, Ciência e Tecnologia*. 03-06 noviembre 2014, Fortaleza, Brasil.