

# COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE CÁMARAS DE UNIÓN BAJO CONDICIONES DE FLUJO SUPERCRÍTICO

“XII Simposio Iberoamericano sobre planificación de sistemas de  
abastecimiento y drenaje”

*Juan Saldarriaga (1), Diego Páez (2), María Ximena Trujillo (3)*

(1) Profesor Titular, Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados de la Universidad de los Andes, Carrera 1 Este No. 19ª-40 Bogotá Colombia , 3394949 Ext: 2810 y jsaldarr@uniandes.edu.co

(2) Profesor Instructor, Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados de la Universidad de los Andes, Carrera 1 Este No. 19ª-40 Bogotá Colombia, 3394949 Ext: 2810 y da.paez27@uniandes.edu.co

(3) Investigadora, Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados de la Universidad de los Andes, Carrera 1 Este No. 19ª-40 Bogotá Colombia, 3394949 Ext: 2810y mx.trujillo92@uniandes.edu.co

## RESUMEN

Mediante un modelo de laboratorio de una cámara de unión se estudió el campo de flujo dominado por ondas estacionarias. Probando diferentes escenarios y variando la relación de llenado de las tuberías de entrada entre 20% y 85%, se identificó el patrón de flujo de acuerdo con las condiciones aguas arriba de la unión. Se encontró que para mantener la capacidad de la cámara de unión, el diseño tradicional de la estructura debe ser modificado. Por otro lado, se observó que cuando se forman curvas de remanso estas se desplazan hacia la tubería de menor pendiente, favoreciendo la transición a flujo subcrítico.

**Palabras claves:** Cámaras de unión, modelo físico, drenaje urbano, interacciones estructura-ondas.

## ABSTRACT

Hydraulics of supercritical flow across sewer junction manhole is explored using systematic experimentation. Conduits' filling ratios varied from 20% to 85% and flow scenarios were tested in order to distinguish between diverse flow patterns, including shockwaves and hydraulic jumps. Different flow regions were identified depending on the dynamic momentum components of the upstream flow. It was found that, the common standard design of junction manhole with supercritical flow have to be revised. Furthermore, when an inlet conduit has a hydraulic slope lower than 1%, backwater profile's length expands and prone the transition to subcritical flow.

**Key words:** Manholes, Laboratory study, sewer hydraulics, wave-structure interactions.

## SOBRE EL AUTOR PRINCIPAL

**Juan Saldarriaga:** Profesor Titular de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de los Andes. Área de Recursos Hidráulicos, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Coordinador del Centro de Investigación Estratégica del Agua (CIE-AGUA) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de los Andes. Director del Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados CIACUA del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de los Andes.

## INTRODUCCIÓN

El flujo a la entrada de las cámaras de unión en sistemas de alcantarillado puede ser subcrítico o supercrítico. El flujo subcrítico puede ser tratado como un flujo en una dimensión utilizando las ecuaciones de energía con coeficientes de pérdida apropiados. Pero el flujo supercrítico es no-uniforme e inestable, por lo que necesita un tratamiento bidimensional (2D) (Hager, 2010).

Ahora bien, la simulación adecuada de las condiciones de unión es esencial para cualquier modelo hidráulico de una red de alcantarillado, pues si éstos no reflejan las condiciones físicas reales de las uniones en la red, el efecto de utilizar ecuaciones complejas para caracterizar el flujo no permanente a través de las tuberías se anula (Bridge, 1984). La descripción detallada de los patrones de ondas estacionarias en los canales de unión fue presentada por Schwalt y Hager en 1995. Más adelante, Del Giudice & Hager (2001) y Hager (2002) estudiaron la variación del campo de ondas de acuerdo con el ángulo de entrada de las tuberías a la cámara de unión. Encontraron que el comportamiento del campo de flujo está dominado principalmente por el número de Froude y la relación de llenado.

Gargano & Hager (2001) evaluaron el comportamiento de las cámaras de unión bajo flujo supercrítico, obteniendo que la superficie libre está dominada por la formación de ondas originadas por el cambio de sección transversal de una tubería circular a un canal en forma de U; También concluyeron que las alturas relativas de la curva de remanso menores a 0.25 no representaban un riesgo de sobrecargar el sistema.

Hager (2010) llevó a cabo una serie de experimentos para determinar el comportamiento hidráulico de las cámaras de unión y de cambio de dirección bajo flujo supercrítico. En este estudio se propuso un diseño con extensiones en las uniones laterales, para prevenir que la altura máxima de las ondas ocasionaran daños en la estructura. Recientemente, Saldarriaga *et al.* (2011) argumentaron que la complejidad del campo de flujo ha impedido el desarrollo de ecuaciones analíticas y a través de un estudio experimental estableció información preliminar para encontrar ecuaciones de diseño.

El propósito del estudio de este artículo es identificar, en una cámara de unión simétrica, los patrones de ondas de acuerdo con las condiciones aguas arriba y analizar la influencia las

características de las ondas sobre la formación de resaltos hidráulicos y curvas de remanso.

## BASE TEÓRICA

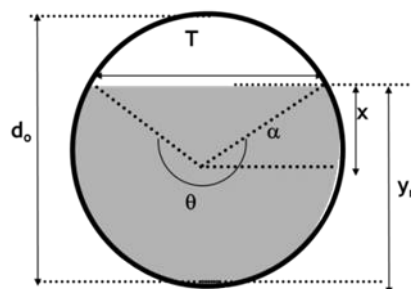
El proceso de diseño de alcantarillados se basa en el diseño de tuberías fluyendo parcialmente llenas, esto suponiendo condiciones de flujo uniforme, es decir, aquel flujo para el cual sus características permanecen constantes en el espacio y en el tiempo. Además, de acuerdo con el Título D del Reglamento de Aguas y Saneamiento Básico del Ministerio de Medio Ambiente de Colombia (RAS) 2011, cada uno de los tramos que forman parte del sistema de alcantarillado debe diseñarse como un conducto a flujo libre por gravedad, lo que implica el uso de las ecuaciones de resistencia fluida para una sección circular fluyendo parcialmente llena. La ecuación más general para calcular las pérdidas por fricción en ductos es la ecuación de Darcy-Weisbach:

$$v = -2\sqrt{8gRS} \log_{10} \left( \frac{k_s}{14.8R} + \frac{2.51\nu}{4R\sqrt{8gRS}} \right) \quad (1)$$

La ecuación anterior, describe la velocidad de flujo ( $v$ ) en función de la aceleración de la gravedad ( $g$ ), el radio hidráulico ( $R$ ), la pendiente de la tubería ( $S$ ), la rugosidad del material del conducto ( $k_s$ ) y la viscosidad cinemática del fluido ( $\nu$ ). En esta investigación el número de Froude es definido como:

$$F = \sqrt{v / (gD)} \quad (2)$$

donde  $D = A/T$  es (Ver Figura 1).



**Figura 1. Geometría de sección circular fluyendo parcialmente llena.**

Una vez definido el número de Froude para un sección de escurrimiento circular, se adoptó la caracterización del régimen de flujo supercrítico adoptada por Hager & Gissoni (2005), donde se especifican los límites entre un flujo subcrítico débil, el flujo transicional, el flujo supercrítico y flujo hipercrítico (ver Tabla 1).

**Tabla 1. Clasificación del flujo supercrítico a partir del número de Froude. Tomado de: Gargano, R, Hager, W.H (2002).**

Rango	Flujo	Características
$0 < F < 0.7$	Subcrítico Débil	La superficie libre es casi plana y hay efectos dinámicos muy pequeños; estos flujos se comportan como flujo a presión si $F=0$ .
$0.7 < F < 1.5$	Transicional	Típicamente se presentan ondas superficiales y resaltos hidráulicos.
$1.5 < F < 3$	Supercrítico	Flujo se comporta con las características de flujo dinámico.
$F > 3$	Hipercrítico	Involucra dinámicas fuertes de flujo, con un alto potencial de daños si el flujo es perturbado.

En la Tabla 1 se puede observar que una de las características típicas del flujo transicional es la presentación de ondas superficiales y resaltos hidráulicos. El flujo supercrítico se caracteriza por tener características de flujo dinámico, es decir, el flujo se puede acelerar o desacelerar en cualquier momento (Saldarriaga, 2011).

El modelo de onda dinámica normalmente es utilizado para el cálculo hidráulico de los conductos y canales que componen el sistema de alcantarillado de zonas urbanas con pendientes de terreno muy bajas. Sin embargo, hoy en día es evidente la necesidad de implementar este modelo cuando el flujo es supercrítico (Saldarriaga, 2011).

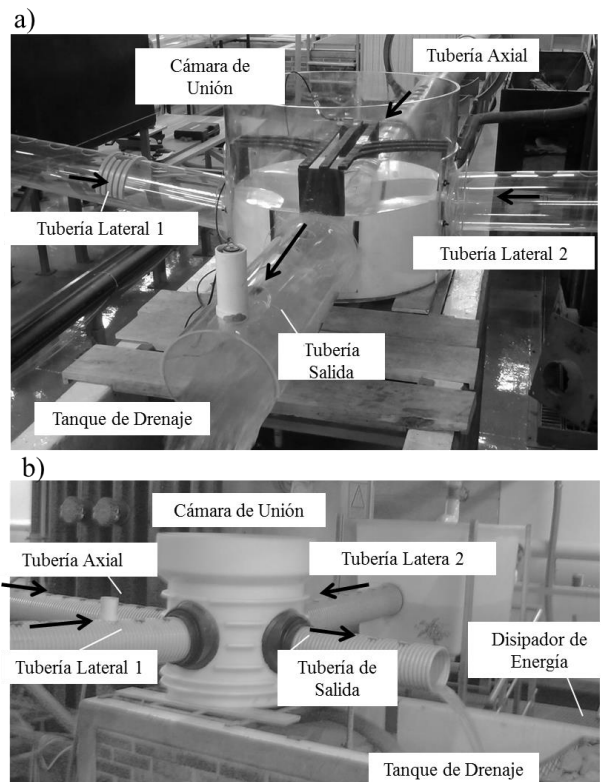
La formulación del problema requiere de dos ecuaciones diferenciales que representan los principios de continuidad y conservación de momentum conocidas como ecuaciones de Saint-Venant o ecuación de onda dinámica (Hager, 1994).

$$\frac{1}{A} \left( \frac{\partial Q}{\partial t} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\beta Q^2}{A} \right) + g \left( \frac{\partial h}{\partial x} + S_f + S_m \right) - \beta v_x q = 0 \quad (3)$$

El primer y segundo término de la ecuación anterior, representan la aceleración local y convectiva respectivamente, por lo tanto su suma es el total de fuerzas inerciales. El tercer término, es la suma de las fuerzas de presión, fricción y pérdidas menores. Por último se incluye una expresión para caudal lateral por unidad de longitud, considerando el coeficiente de Bousinesq ( $\beta$ ).

## METODOLOGÍA

Los experimentos se realizaron en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad de los Andes, Colombia. Se probaron dos prototipos de modelos a escala de las cámaras de unión. El primero, fabricado en acrílico para observar fácilmente las perturbaciones del flujo dado la unión (Figura 2a). El segundo, un prototipo en polietileno utilizado para la unión de tuberías de alcantarillado en PVC (Figura 2b).



**Figura 2. Modelos físicos probados a) cámara de acrílico y b) cámara de polietileno.**

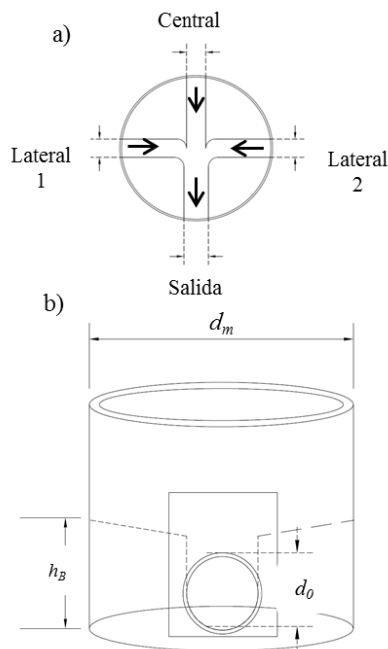
Las cámaras de unión eran simétricas, es decir, tenían una central y dos laterales con un ángulo de unión de  $90^\circ$  (Figura 3a). Las paredes de las cañuelas ( $h_B$ ) cubrían completamente el diámetro de las tuberías de entrada ( $d_0$ ) a lo que se le llama cañuela completa. El diámetro de la cámara de unión era  $3.5d_0$ , considerado como la proporción mínima para que la unión tenga capacidad de recibir tres entradas de caudal simultáneamente (Figura 3b). El nivel del agua fue medido utilizando un sensor ultrasónico con una precisión de  $\pm 0.17\text{mm}$ .

Los parámetros independientes para cada tubería de entrada (Subíndice Ax para Central, L1 para Lateral 1 y L2 para Lateral 2) eran: (1) Número de Froude  $F_{Ax} = Q_{Ax} / (A_{Ax} g D_{Ax})^{1/2}$ ,  $F_{L1} = Q_{L1} / (A_{L1} g D_{L1})^{1/2}$  y

$F_{L2} = Q_{L2} / (A_{L2}(gD_{L2})^{1/2})$ , (2) relación de llenado  $Y = Y_n / d_o$  donde  $Y_n$  = profundidad de flujo y  $d_o$  = diámetro de las tuberías de entrada y (3) las pendientes de fondo de la tuberías de entrada  $S_{Ax}$ ,  $S_{L1}$  y  $S_{L2}$ .

Las relaciones de llenado de las tuberías de entrada llegaron hasta 85% y los números de Froude variaron entre 1.5 y 6.1; de esta forma se cubría todo el espectro de número de Froude propuesto por Gargano & Hager (2002). Las condiciones de flujo variaban el número y dirección de los caudales de entrada:

- (1) Flujo Directo: se le denominó a probar caudales por la tubería Central ( $Q_{Ax}$ ).
- (2) Flujo Lateral 1: es enviar caudal por la tubería Lateral 1 ( $Q_{L1}$ ).
- (3) Unión de Flujos I: es la unión de flujos por la tubería Lateral 1 y la tubería Central ( $Q_{L1} - Q_{Ax}$ ).
- (4) Unión de Flujos II: se le llama a la unión de flujos por la tubería Lateral 1, Central y Lateral 2 ( $Q_{L1} - Q_{Ax} - Q_{L2}$ ).

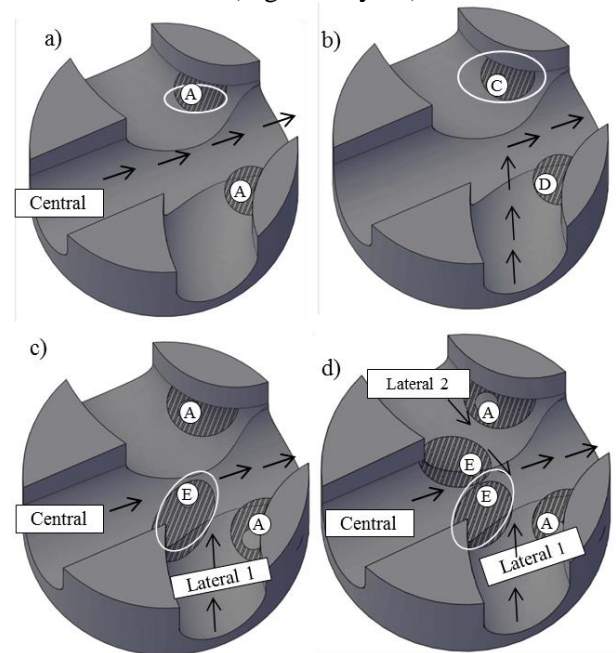


**Figura 3. Características geométricas de la cámara a) simetría de las entradas, b) parámetros de la cañuela.**

## RESULTADOS

En la cámara de unión se observaron cinco tipos de ondas dependiendo del número y ángulo de los caudales de entrada. La Onda A se presentaba cuando las descargas laterales eran pequeñas y el caudal central de entrada impactaba con las paredes de la cañuela de salida (Figura 4a). La Onda B era la confluencia a la salida de la cámara de las Ondas A.

La Onda C se formaba cuando el caudal lateral impactaba el canal lateral opuesto (Figura 4b). La Onda D se formaba como un reflejo de la Onda C en la salida de la cámara. Finalmente, la Onda E era característica de la unión de dos o más flujos en diferente dirección (Figura 4c y 4d).



**Figura 4. Clasificación de ondas generadas en una cámara simétrica.**

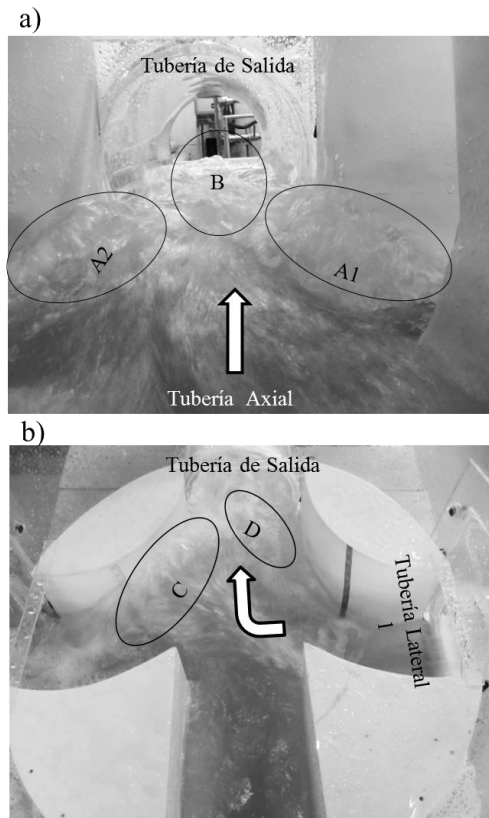
### Flujo Directo

En la configuración de flujo más simple, donde el flujo simplemente atraviesa la estructura de unión, se formaron dos Ondas A (Figura 5a). Una en cada uno de las paredes de la cañuela del canal central. Además se formó una Onda B, la cual se desplazaba hacia la salida de la cámara. La altura máxima de las Ondas A fue  $0.38h_B$ .

### Flujo Lateral

El flujo lateral con un ángulo de entrada de  $90^\circ$  representa una configuración típica de flujo en alcantarillados, pues normalmente el trazado de la red está bajo la malla vial. Se observaron dos tipos de onda: C y D (Figura 5b).

La Onda C se formaba cuando el flujo lateral impacta la cañuela del canal lateral opuesto. Mientras que la Onda D, nunca se desarrollaba por sí misma, sino que era un reflejo de la Onda C en la salida de la cámara. A pesar de que la Onda C siempre se desarrollaba en el mismo punto, el punto de inicio se podía mover hacia aguas abajo si la relación de llenado aumentaba. Por lo tanto, si la onda se desarrollaba cerca de la tubería de salida, se incrementaba el riesgo de sobrecarga. La altura máxima de la Onda C fue  $0.7h_B$ .



**Figura 5. Campo de flujo a) Flujo Directo, b) Flujo Lateral.**

### Unión de Flujos I

La coexistencia de un flujo lateral con el caudal que entra por la tubería axial, recrea la situación en la que la red de alcantarillado recolecta aguas residuales o fluviales en diferentes puntos de un centro urbano (Figura 6a).

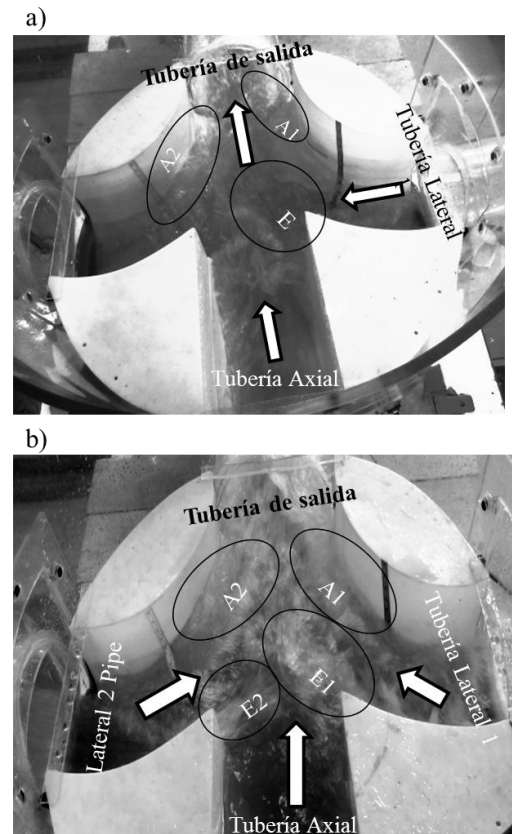
Las Ondas A parecen ser dominantes en la tubería central cuando  $Q_{Ax}=0.9Q_{L1}$ . Sin embargo, la onda tipo E fue la que tuvo una altura máxima mayor, pues la única manera de conservar el momentum en la unión de dos flujos supercríticos en diferente dirección es aumentar la profundidad. La Onda E tuvo una altura máxima de  $0.86h_B$  y se localizaba el centro de la cámara. Por lo tanto, podría llegar a comprometer la capacidad la estructura de unión, pues facilitaba la formación de una curva de remanso cuya longitud se desplazaba hacia la tubería de menor pendiente.

### Unión de Flujos II

La unión de tres flujos representa una condición crítica para la estructura de unión, pues ingresan tres flujos supercríticos y ocurren dos cambios de dirección simultáneamente. Se formaron cuatro ondas: A1, A2, E1 y E2 (Figura 6b). La Onda A1 se formaba cuando el caudal lateral 2 impactaba contra el final del canal lateral 1. La Onda A2 se formaba porque el caudal lateral 1 impactaba con el final del canal lateral 2. Las ondas tipo E1 y E2 se

localizaban en los puntos de unión de los canales en forma de U. La onda E1 fue la que obtuvo mayores alturas máximas de onda cercanas a  $0.73h_B$ .

La presencia de las ondas afectaba el régimen flujo en la tubería central, pues se generaba un resalto hidráulico a la entrada de la cámara que tendía a desplazarse hace el conducto central.



**Figura 6. Campo de flujo a) Unión de Flujos I, b) Unión de Flujos II.**

## ANÁLISIS DE RESULTADOS

### Análisis estadístico

Las ecuaciones preliminares de diseño describen la altura máxima de las ondas en función de la relación de llenado y el número de Froude de los conductos de entrada. El ajuste estadístico se realizó mediante un software estadístico y los resultados se compararon con estudios anteriores realizados en la Universidad de los Andes (Saldarriaga, 2011).

En la Tabla 2 se puede ver que la altura máxima de la Onda E, característica de la unión de flujos en diferente dirección, es inversamente proporcional al número de Froude de la tubería Central (subíndice Ax). Así mismo, se observa que los valores de los coeficientes de determinación son altos, lo que indica que las condiciones aguas arriba son significativas para determinar la altura máxima de las ondas.

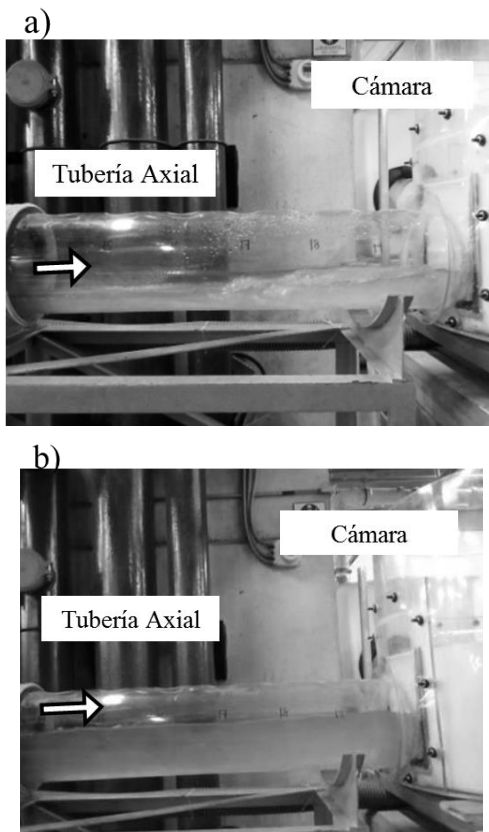
**Tabla 2. Altura máxima de las ondas en función de la relación de las condiciones de aguas arriba.**

	Ecuación	R <sup>2</sup>
(1)	$h_{\max A} = 0.28 Y_{Ax}^{0.068} F_{Ax}^{0.576}$	0.73
(2)	$h_{\max C} = 2.18 Y_{L1}^{0.671} F_{L1}^{0.438}$	0.81
(3)	$h_{\max E} = 0.85 Y_{Ax}^{0.33} Y_{L1}^{0.276} F_{Ax}^{-1.947}$	0.89
(4)	$h_{\max E} = 0.127 Y_{L2}^{0.733} Y_{Ax}^{-0.615} F_{L2}^{-3.17} F_{Ax}^{-1.77}$	0.91

### Análisis de la curva de remanso

Considerando que en la tubería de menor pendiente se observaron resaltos hidráulicos (Figura 7a) y curvas de remanso (Figura 7b), se analizaron los perfiles axiales de flujo en la tubería a fin de identificar cuando existiría un potencial riesgo de sobrecarga.

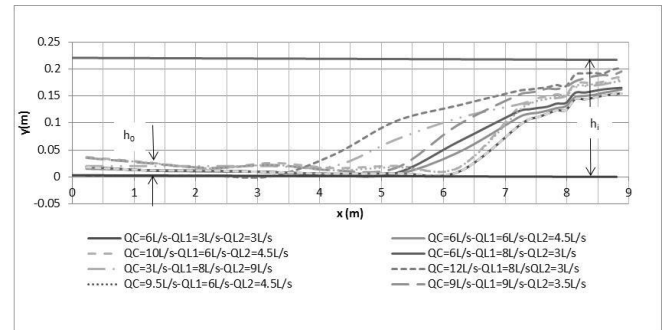
Los resultados de los experimentos realizados muestran que cuando el flujo está lo suficientemente aguas arriba de la cámara de unión es supercrítico a profundidad normal. Sin embargo, inmediatamente aguas arriba de la unión el flujo es subcrítico (Figura 8).



**Figura 7. Efectos de las ondas superficiales en la tubería de menor pendiente a) resalto hidráulico, b) curva de remanso.**

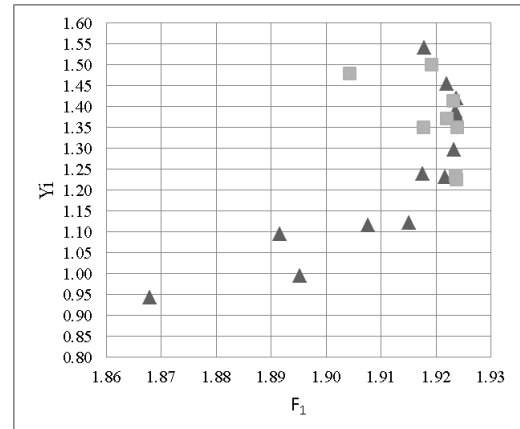
En diferentes escenarios se observó la formación de una curva de remanso que en el caso más crítico

alcanzaba a desplazarse hasta 4 m aguas arriba de la entrada a la cámara de unión (Figura 8). Por lo tanto, si el diámetro de la cámara aumentara, incrementaría la longitud de las cañuelas y sería posible contener la altura máxima de la curva de remanso. De esta forma se podría prevenir la sobrecarga en la tubería de menor pendiente.



**Figura 8. Perfil axial de flujo en la tubería central.**

Por otro lado, se determinó la relación entre la altura relativa de la propagación de la curva de remanso  $Y_i = (h_i - h_0)/h_i$  la y el número de Froude supercrítico de la tubería central. En la Figura 9, se puede observar que las alturas relativas para la Unión de Flujos I y II, fueron mayores a 0.25, lo que indica que el riesgo de sobrecarga en la tubería de central.



**Figura 9. Altura relativa de la curva de remanso en función de  $F_1$  ( $\blacktriangle$ )  $Q_{L1}-Q_{Ax}$ , ( $\blacksquare$ )  $Q_{L1}-Q_{Ax}-Q_{L2}$ .**

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En conclusión, el patrón de ondas que se forma dentro de las cámaras de unión de flujo depende de las condiciones hidráulicas del conducto dominante. Las ondas tipo A son características del Flujo Directo y no representan ningún tipo de riesgo para la sobrecarga de la tubería. Las ondas tipo C son típicas de un cambio de dirección en el flujo de entrada. Las ondas tipo E, se dan por la unión de

flujos en diferentes direcciones y estas son las que representan un mayor reto para el diseño de la estructura, pues al incrementar la profundidad del agua en la cámara se desacelera el flujo, provocando curvas de remanso, cuyas profundidades relativas pueden llegar a sobrecargar la tubería de menor pendiente.

Ahora bien, en lo que respecta a la metodología utilizada en dos montajes diferentes, se puede decir que es válida para probar la operación de las estructuras de unión de flujo. Es importante resaltar la importancia de probar modelos con geometrías suaves que favorezcan un flujo continuo y poco perturbado al ingresar a la estructura de unión.

Para continuar con los experimentos en este tema se recomienda probar cámaras simétricas con diferentes caídas para caracterizar el efecto sobre el campo de flujo de un cambio de energía y un cambio de sección transversal. Asimismo, se podría construir una cámara de unión e tres entradas con un diámetro sea superior a 3.5 veces el diámetro de las tuberías de entrada para ver si es posible evitar la propagación de la curva de remanso dentro de los conductos.

Se recomienda que una vez se haya determinado de forma empírica los diferentes patrones sería interesante desarrollar modelos computacionales que resuelvan el modelo de onda dinámica dentro de la cámaras de unión, de manera que permitieran insertar la modelación de la unión a la modelación hidráulica detallada de la red de alcantarillado.

## BIBLIOGRAFÍA

- Bridge S, 1984. A study of unsteady flow wave attenuation in partially filled pipe networks. A thesis submitted for the degree of Doctor Philosophy. Department of Mechanical Engineering, Brunel University, 104-199.
- Del Giudice, G., Hager, W.H. (2001). Supercritical flow in 45° junction manhole. *J. Irrig. Drain. Eng.* 127(2), 100–108.
- Gargano, R., Hager, W.H. (2002). Supercritical flow across sewer manholes. *J. Hydraulic Eng.* 128(11), 1014–1017.
- Gisonni, C., Hager, W.H. (2002). Supercritical flow in manholes with a bend extension. *Exp. Fluids* 32(3), 357–365.
- Gisonni, C., Hager, W.H. (2002). Supercritical flow in the 90° junction. *Urban Water* 4(4), 363–372.
- Hager, W.H. (2010). *Wastewater hydraulics: Theory and practice*, ed. 2. Springer, Berlin.
- Krüger, S., Rutschmann, P. (2000). Numerical sensitivity analysis of supercritical confluences to inaccuracy of

- upstream boundary conditions. Proc. *Hydroinformatics Iowa* [CD-ROM].
- Schwalt, M., Hager, W.H. (1995). Experiments to supercritical junction flow. *Exp. Fluids* 18(6), 429–437.
- Sturm T.W., 2010. *Open Channel Hydraulics*. McGraw-Hill. Second Edition. Singapore.
- Saldarriaga J., Bermúdez N., Rubio D. (2011) Hydraulic behavior of junction manholes under supercritical flow conditions. *J. Hydraulic Research*. 50(6) 631-636.
- Saldarriaga J., (2011) Notas de Clase de Hidráulica de Drenaje Urbano.
- Ministerio de Vivienda y Desarrollo Territorial, República de Colombia (MVDT). Reglamento de Agua y Saneamiento Básico, Título D. (2011)