

**XXV CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA  
SAN JOSÉ, COSTA RICA, 9 AL 12 DE SETIEMBRE DE 2012**

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

*Diva P. Rubio, Nataly Bermúdez, Juan G. Saldarriaga*

*Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados (CIACUA), Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental,  
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia*

*<dp.rubio50@uniandes.edu.co>, <n.bermudez87@uniandes.edu.co>, <jsaldarr@uniandes.edu.co>*

**RESUMEN:**

El presente artículo resume una investigación que tuvo por objetivo determinar el comportamiento de cámaras de unión bajo flujo supercrítico en sistemas de alcantarillado. Se implementó un modelo físico en el cual se probaron diferentes configuraciones de tuberías de entrada. El modelo está compuesto por una tubería de entrada y una tubería lateral con un ángulo de unión de 90°. Su diseño permite modificar de forma independiente la altura y pendiente de las dos tuberías de entrada con respecto a la cámara permitiendo diferentes configuraciones de caída. El modelo físico permite evaluar tres condiciones de entrada diferentes: (1) Flujo de entrada a la cámara únicamente por la tubería principal, (2) flujo de entrada a la cámara únicamente por la tubería lateral y (3) flujo de entrada a la cámara por las tuberías principal y lateral. Se plantearon como variables independientes algunas características de los flujos entrantes: el número de Froude, la relación de llenado y la caída (escalón) de las tuberías de entrada; y como variables dependientes las características de la ubicación y dimensión del flujo dentro de la cámara: inicio, fin y altura de las ondas. Se plantearon recomendaciones de diseño, las cuales crean una base importante para el estudio y comprensión del flujo supercrítico en este tipo de estructuras de conexión en sistemas de alcantarillado.

**ABSTRACT:**

This article summarizes the research undertaken to determine the supercritical flow behavior in wastewater system connection chambers. A physical model was implemented during this research to test different configurations; it consists of main and lateral entrance pipes with a 90° junction angle. The model's design allows the entrance pipes' height and slope—with respect to the chamber's base—to be independently altered, resulting in different drop configurations. This model also allows us to evaluate three flows with differing conditions each as they enter the structure: (1) manhole entry flow through main pipeline only, (2) manhole entry flow through lateral pipeline only and (3) manhole entry flow through both main and lateral pipelines. The independent variables that were used and corresponded to the three types of flow were wave start, end and height. In this paper we include several recommendations regarding design, recommendations that should facilitate the understanding of these types of flow within wastewater systems.

**PALABRAS CLAVES:** Flujo supercrítico, cámaras de unión, modelo físico, ondas, sistema alcantarillado.

## INTRODUCCIÓN

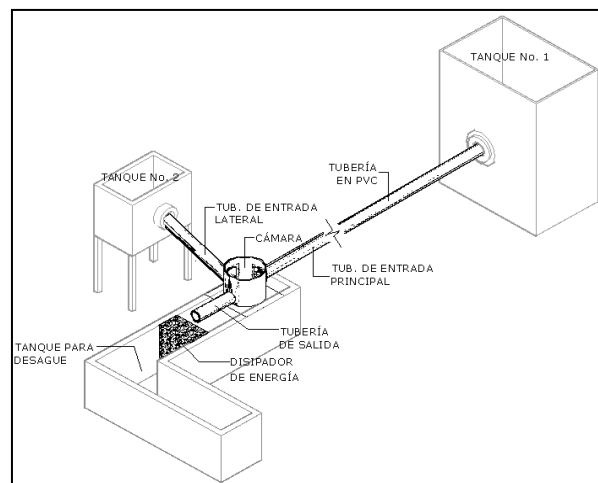
Las cámaras, pozos o buzones de unión forman parte de los elementos de sistemas de alcantarillado; son estructuras utilizadas para unir, ventilar, inspeccionar y darle mantenimiento a las tuberías. Se colocan al inicio de una tubería, cada cierto número de metros, o cada vez que hay un cambio de: dirección, diámetro, tipo de tubería y pendiente, y en la confluencia de dos o más tramos. La transición del flujo entre las tuberías aguas arriba y la tubería aguas abajo en una cámara, se puede realizar mediante un canal de conducción de flujo de sección transversal semicircular localizado en su base (elemento conocido con el nombre de cañuela), el cual describe los posibles tipos de uniones entre las tuberías.

El flujo en la entrada de la cámara de inspección puede ser subcrítico o supercrítico. Para el adecuado diseño de la estructura de conexión es necesario hacer una distinción entre estos tipos de flujo, debido a que el flujo subcrítico puede considerarse como unidimensional, mientras que el flujo supercrítico en la unión es mucho más complejo y necesita de un tratamiento bidimensional (Hager, 1999). En la práctica actual de diseño no se tiene en cuenta la presencia de flujo supercrítico, lo cual implica que para velocidades altas los sistemas de alcantarillado y particularmente las cámaras de unión presentan un deficiente diseño hidráulico. No se cuenta con una base teórica clara, debido a la dificultad de encontrar una función analítica que correlacione los parámetros involucrados y el complicado análisis hidráulico de tal flujo.

En la investigación objeto de este artículo se implementó un modelo físico en el cual se probaron diferentes configuraciones de cámaras. Se plantearon como variables independientes las siguientes características de los flujos entrantes: el número de Froude, la relación de llenado y la caída de la tubería de entrada y como variables dependientes: el inicio, el fin, la altura de las ondas (característica de ubicación y dimensión del flujo dentro de la cámara) y el porcentaje de pérdida de energía. Se pudieron identificar los diferentes tipos de ondas y cómo se comportan las pérdidas. Finalmente, se plantearon algunas recomendaciones de diseño.

## MATERIALES Y MÉTODOS

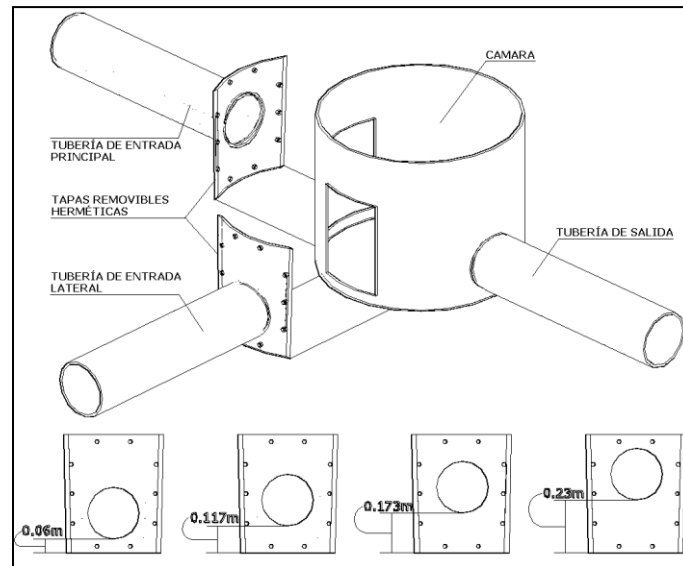
La investigación en la Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia se desarrolló mediante el empleo de un modelo físico de una estructura de conexión convencional (cámara). El modelo está conformado por dos tuberías de entrada aguas arriba, una tubería de salida aguas abajo y un canal de conducción del flujo en la base (media caña, cañuela). Todos los elementos fueron elaborados en cristal acrílico, material que permite observar y analizar las formas de operación bajo condiciones de flujo supercrítico.



**Figura 1.**-Esquema del montaje del modelo.

Debido al tamaño real del modelo, este representa muy bien una cámara prototipo particular a escala 1:2 ó 1:3. Este tipo de escalas permite reproducir los fenómenos hidráulicos que ocurren en una forma dinámica similar, lo cual le da validez al presente estudio.

El modelo está compuesto por una tubería de entrada principal y una entrada lateral a 90°. Su diseño permite que en las dos tuberías de entrada se pueda variar la pendiente y la altura con respecto al fondo de la cámara, lo cual permite diferentes configuraciones de caída; para este fin se adicionó a la cámara un mecanismo de tapas removibles herméticas que permiten tener cuatro posibles alturas desde la cota de batea con respecto al fondo de la cámara. El modelo también cuenta con una tubería de salida aguas abajo. Las tres tuberías convergen en la cámara, de sección circular, construida en láminas de acrílico.



**Figura 2.-**Modelo de estructura de conexión y configuraciones de tapas removibles herméticas.

El modelo permite evaluar dos configuraciones de dirección del flujo de entrada a la estructura de conexión: flujo directo, tubería de entrada a la estructura aguas arriba alineada a la tubería de salida aguas abajo; y flujo lateral, tubería de entrada a la estructura ubicada a 90° con respecto a la tubería de salida aguas abajo. Lo anterior permite definir diferentes condiciones del flujo de entrada a la estructura:

- Flujo de entrada a la cámara únicamente en la tubería principal (Flujo directo).
- Flujo de entrada a la cámara únicamente en la tubería lateral (Flujo a 90°).
- Flujo de entrada a la cámara en la tubería principal y en la tubería lateral (Unión de los flujos).

De igual forma, cada condición de entrada tiene la posibilidad de variar la altura de caída para obtener diferentes escenarios de modelación. En total se desarrollaron 188 pruebas. Cada escenario se evaluó para relaciones de llenado entre el 5% y el 75%, rango dentro del cual es habitual el comportamiento del flujo supercrítico en tuberías de sistemas de alcantarillado.

Para el desarrollo de cada prueba primero se ajustaba el caudal en las dos tuberías de entrada, luego se procedía a la medición alturas de la lámina de agua en el modelo empleando un sensor de nivel, el cual se ubicaba en los orificios espaciados cada 0.15 m a lo largo de cada tubería y en la cámara.

Los datos registrados permiten un análisis detallado del comportamiento del flujo a lo largo del modelo, ya que con ellos se identifican los parámetros independientes: (1) número de Froude en cada una de las tuberías de entrada, (2) Relación de llenado en cada tubería del modelo, (3) Ángulo de unión de la cañuela y (4) Alturas de las caídas de la tubería principal y lateral. Otro de los objetivos de las mediciones es la descripción del patrón de flujo de la estructura ya que el comportamiento del flujo supercrítico en una cámara de alcantarillado está caracterizado por la

presencia de flujo ondulatorio. Para esto fue necesario especificar la ubicación de las ondas y sus dimensiones en función de coordenadas: transversal (x), longitudinal (y) y vertical (z) en la estructura de unión, definiendo de esta forma las variables dependientes. Finalmente, la explicación del comportamiento hidráulico se basa en la correlación de parámetros independientes y variables dependientes de acuerdo con el escenario de modelación evaluado.

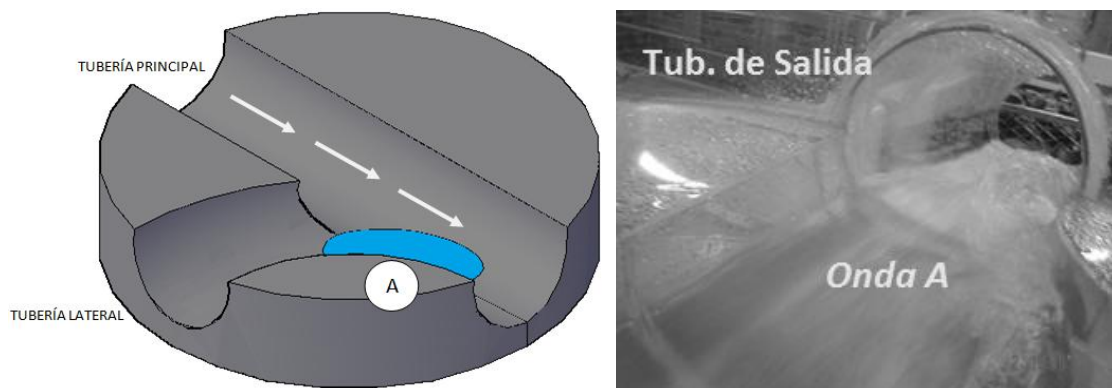
## EVALUACIÓN DE RESULTADOS

### Flujo Directo

Se encontró que para un flujo supercrítico directo se presenta un solo tipo de onda ubicada al final de la pared interna del canal de conducción lateral de la cañuela *Onda A*. Esta onda se forma debido al choque del flujo de entrada por la tubería principal con el final de la pared interna del canal de conducción lateral de la cañuela. Esta onda se presenta solo en caudales mayores a 10 L/s.

Se observó que la localización de la Onda A es independiente a los parámetros de entrada, ya que para este escenario de modelación el inicio y fin de la onda son constantes, por lo cual se considera esta una onda como estática.

Por otro lado, se analizó la altura máxima de la onda en relación con el número de Froude y la altura máxima de llenado. Se encontró un comportamiento directamente proporcional entre la altura máxima y la relación de llenado descrita con una función logarítmica que representa el mejor ajuste. Entre la altura máxima de onda y el número de Froude se observó un comportamiento inversamente proporcional descrito con una función logarítmica que representa el mejor ajuste. Lo anterior sugiere la existencia de una relación multivariada entre la altura máxima de la Onda A, el número de Froude y la relación de llenado.



**Figura 3.-** Onda presente en una cámara con flujo directo. Foto de desarrollo Onda A para un caudal medio.

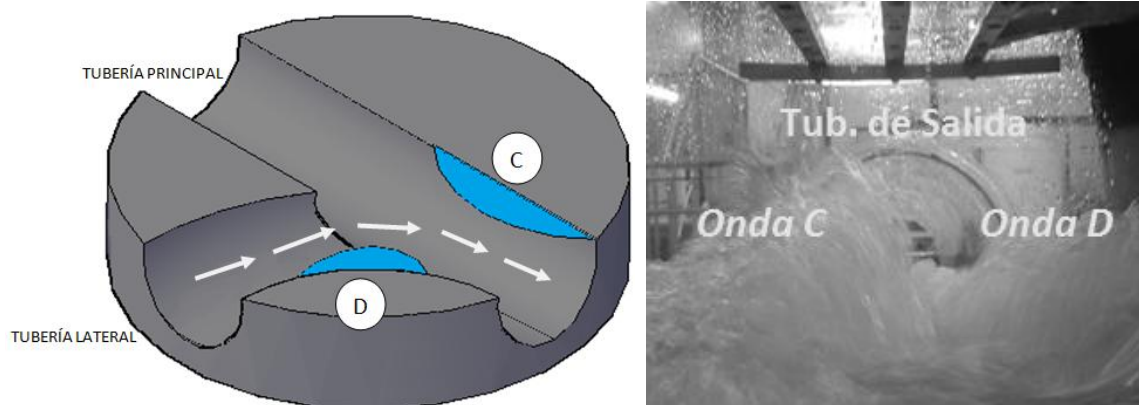
Para analizar la pérdida de energía se evalúa su relación con la altura de velocidad de la tubería de entrada, la altura de velocidad de la tubería de salida, la relación de llenado de la tubería de entrada, el número de Froude de la tubería de entrada y el caudal de la tubería de entrada. La relación entre el porcentaje de pérdida de energía y la altura de velocidad de la tubería de entrada es inversamente proporcional, descrita con una función lineal que representa el mejor ajuste. La relación entre el porcentaje de pérdida y la altura de velocidad de la tubería de salida también fue inversamente proporcional pero en este caso el mejor ajuste fue el de una función exponencial. La dependencia con la relación de llenado, el número de Froude y el caudal fue inversamente proporcional descrita con una función logarítmica como mejor ajuste. Para todas las relaciones se encontró un comportamiento ascendente entre las caídas, es decir, los mayores porcentajes de pérdidas se presentaron para caídas de mayor valor. Finalmente, se sugiere la relación multivariada para este caso como una relación entre el porcentaje de pérdida de energía, el número de Froude, la relación de llenado y la caída de la tubería de entrada principal, la altura de velocidad no se tuvo en cuenta debido a que tiene bajos coeficientes de correlación, y adicionalmente se encontró que la eliminación de este parámetro no afecta significativamente en la función.

## Flujo a 90°

Se encontró que se presentan dos tipos de onda. La primera llamada *Onda C* se forma debido al choque del flujo de entrada por la tubería lateral con la pared del canal de conducción principal de la cañuela. La segunda onda definida como *Onda D* se forma debido al choque del flujo de entrada por la tubería lateral con la pared interna del canal de conducción lateral de la cañuela. La Onda D nunca se desarrolló de forma individual; su formación se dio en conjunto con la Onda C y ocurrió únicamente para la configuración de mayor caída (caída de  $0.75 D_o$ ). Lo anterior permite afirmar que se presentan dos instancias de ondas: (1) desarrollo de la Onda C y (2) desarrollo de la Onda C y D. Finalmente, se define como onda hidráulicamente dominante la Onda C, debido a la presencia continua para un flujo de 90°.

El inicio de la onda C se presenta después del punto de unión entre el canal de conducción principal y lateral de la cañuela, y el final de la onda se presenta muy cerca a la tubería de salida lo que genera un estado de obstrucción para caudales altos. Esta onda se considera estática, debido a que su localización se desarrolla siempre en la misma zona sin importar el cambio de los parámetros independientes; sin embargo, presenta una tendencia creciente del punto de inicio para mayores relaciones de llenado. Esta condición es importante ya que indica que para mayores relaciones de llenado se presentan longitudes de onda menores y un desarrollo muy cercano a la tubería de salida que, acompañado de grandes alturas de onda, genera una condición de obstrucción y posible sobrecarga del sistema.

Para el análisis de las dimensiones de las dimensiones de la onda C se tomó la longitud máxima de la onda (en relación con el diámetro de la cámara  $D_c$ ) y la altura máxima de onda (en relación con el porcentaje de la altura del banco de la cañuela  $H_b$ ). Se observó que para la mayor configuración de caída se tiene un valor constante del punto de inicio de onda, y por lo tanto una longitud constante; de igual forma para esta caída se presentan los menores valores de altura de onda y la formación de la onda D. Se encontró que una cámara con media caña no representa un adecuado canal de conducción para el flujo de entrada a 90°, ya que la altura máxima de onda es de  $2.78 H_b$ .



**Figura 4.-** Onda presente en una cámara con flujo de entrada 90°. Foto de desarrollo conjunto ondas C y D.

Para la evaluación de las pérdidas de energía presentadas en una estructura de conexión con flujo a 90°, se evaluó su relación con la altura de velocidad de la tubería de entrada lateral, la altura de velocidad de la tubería de salida, la relación de llenado de la tubería de entrada, el número de Froude de la tubería de entrada y el caudal de la tubería de entrada lateral.

La relación entre el porcentaje de pérdida de energía y la altura de velocidad de la tubería de entrada lateral es inversamente proporcional, descrita con una función logarítmica que representa el mejor ajuste, al igual que la relación con la altura de velocidad de la tubería de salida, la relación de llenado y el caudal. La relación del porcentaje de pérdida de energía y el número de Froude fue

directamente proporcional y representada por una función lineal. Se encontró un comportamiento ascendente entre las caídas, es decir, los mayores porcentajes de pérdidas se presentaron para caídas de mayor valor. Finalmente, se sugiere la relación multivariada para este caso como una relación entre el porcentaje de pérdida de energía (parámetro dependiente), el número de Froude, la relación de llenado y la caída de la tubería de entrada lateral. La altura de velocidad no se tuvo en cuenta debido a que tiene bajos coeficientes de correlación, y adicionalmente se encontró que la eliminación de este parámetro no afecta significativamente en la función.

## Unión de los Flujos

Se encontró que para la unión de los flujos supercríticos se presentan tres tipos de onda (ver Figura 5). La primera onda identificada se forma debido al choque del flujo de entrada por la tubería principal con el final de la pared interna del canal de conducción de la cañuela; comportamiento típico de la onda hidráulicamente dominante de un flujo directo (Onda A). La segunda onda se forma debido al choque del flujo de entrada por la tubería lateral con la pared del canal de conducción principal de la cañuela, comportamiento típico de la onda hidráulicamente dominante de un flujo a  $90^\circ$  (Onda C). La tercera onda, definida como Onda E se forma debido a la unión de los flujos en el punto de confluencia de los canales de conducción de la cañuela (principal y lateral).

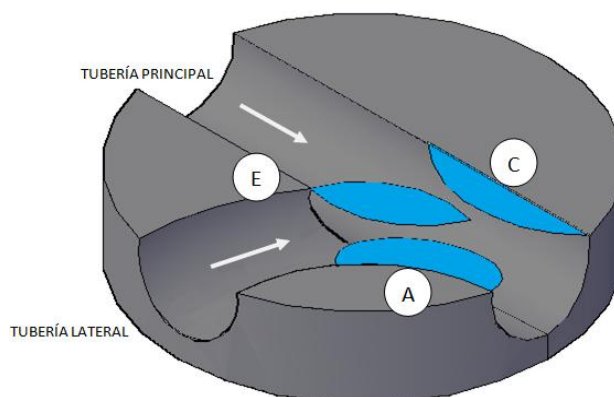


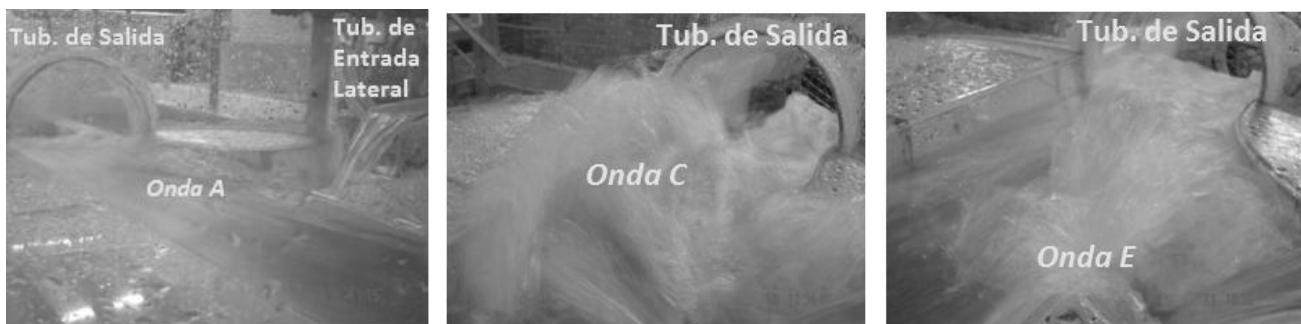
Figura 5.- Onda presente en una cámara con unión de flujos.

La Onda A propia de un flujo directo se presenta cuando el caudal de entrada por la tubería lateral es menor al 10% del caudal de la tubería principal. Al igual que el análisis realizado para flujo directo se encontró que la localización de la Onda A es independiente de los parámetros de entrada, ya que se desarrolla siempre para un valor promedio de inicio de  $0.73 D_c$  y un valor promedio de finalización de  $1.0 D_c$ ; por lo anterior se define como una onda estática. De todas las ondas identificadas en la configuración de unión de los flujos la Onda A es la que presenta una menor altura máxima de onda, la cual no superó nunca el valor de  $1.08 H_b$  (para las pruebas de flujo directo y unión de los flujos). Como ya se ha mencionado anteriormente, al ser la dimensión de longitud máxima de la onda función de las abscisas inicial y final se considera constante, registrando un valor promedio de  $0.27 D_c$ . Lo anterior dejó como única variable a analizar la altura máxima de onda.

La Onda C propia de un flujo a  $90^\circ$  se presenta cuando el conducto hidráulicamente dominante es la tubería lateral. Al igual que el análisis realizado para flujo a  $90^\circ$  se encontró una tendencia de formación de la Onda D, que en presencia de grandes caudales obstruía la tubería de salida y ocasionaba una sobrecarga en la estructura de conexión (cámara). La localización de la Onda C se desarrolla para un valor promedio de inicio de  $0.54 D_c$  y un valor promedio de finalización de  $0.98 D_c$ ; lo anterior la define como una onda estática. De todas las ondas identificadas en la configuración de unión de los flujos la Onda C es la que presenta una mayor altura máxima de onda, la cual supera el valor obtenido para la configuración de flujo a  $90^\circ$  con

2.33  $H_b$ . Se observó que la presencia de esta onda afecta a la tubería principal cuando esta no tiene caída y cuando la caída de la tubería lateral (conducto hidráulicamente dominante) es igual o superior; ya que genera un resalto hidráulico en la salida de la tubería principal y en presencia de grandes caudales el resalto se desplaza al interior de la tubería incrementando el nivel de la lámina de agua y causando un efecto de presurización. De igual forma que para la configuración de flujo a  $90^\circ$  la Onda C presenta un valor promedio de longitud máxima de la onda de  $0.45 D_c$ ; para la presente configuración no se encontró una relación significativa entre esta variable (longitud máxima de la onda) y los parámetros de entrada, la cual dejó como única variable a analizar la altura máxima de onda.

La Onda E se considera propia de un flujo supercrítico en una cámara de alcantarillado con tuberías de entrada principal y lateral; se presenta cuando el conducto hidráulicamente dominante es la tubería principal y el caudal de la tubería lateral supera el 10% del caudal de la tubería principal. La Onda E presenta su inicio en  $0.45 D_c$ , punto de unión de los canales de conducción de la cañuela y en consecuencia de los flujos de entrada a la cámara; presenta un valor promedio de finalización de  $0.90 D_c$ . Al igual que las anteriores ondas identificadas, la localización de la Onda E es independiente de los parámetros de entrada, lo cual la define como una onda estática. La Onda E representa el valor medio de altura máxima de la onda de todas las ondas presentes en la configuración de unión de los flujos con una altura máxima de onda de  $1.33 H_b$ . Se observó que la presencia de esta onda afecta la tubería lateral cuando no tiene caída ó la caída de la tubería principal (conducto hidráulicamente dominante) es igual o superior, ya que genera un resalto hidráulico en la salida de la tubería lateral. Aunque este resalto no se desplazó aguas arriba de la tubería lateral por condiciones físicas del modelo evaluado, en el cual la tubería lateral presenta mayores pendientes, se considera que tendrá un comportamiento similar al resalto ocasionado por la Onda C para la configuración de unión de los flujos, en donde el resalto se desplaza aguas arriba de la tubería, incrementa el nivel de la lámina de agua y ocasiona un efecto de presurización en la misma. Como ya se ha mencionado anteriormente, al igual que las demás ondas la dimensión de longitud máxima de la onda se considera constante al ser función de las abscisas inicial y final, registrando un valor promedio de  $0.47 D_c$  y representando el mayor valor entre todas las ondas identificadas. Lo anterior deja como única variable a analizar la altura máxima de onda.



**Figura 6.-** Foto Izquierda desarrollo de la onda A para unión de los flujos. Foto central desarrollo de la onda C para unión de los flujos. Foto derecha desarrollo de la onda E para unión de los flujos.

Para analizar en qué condiciones se forma cada tipo de onda se evaluó su relación en función de los parámetros independientes anteriormente descritos llegando a las siguientes conclusiones:

- La Onda A sólo tiene presencia en la configuración de unión de los flujos cuando la influencia de la tubería lateral es mínima y se presenta un comportamiento típico del flujo directo descrito con las mismas características.
- La Onda C, aunque muestra las mismas características de ubicación de una onda típica de un flujo a  $90^\circ$ , sus características de dimensión (principalmente la altura máxima de la onda) en la configuración de unión de los flujos se ve influenciada por los parámetros de entrada tanto de la tubería principal como lateral; por lo anterior es necesario diferenciar la formación de esta onda de acuerdo con la configuración donde se desarrolla.



- La Onda E fue el tipo de onda con mayor presencia en la configuración de unión de los flujos, sin embargo, no se considera como una onda que represente peligro para el sistema, ya que su altura máxima de onda se encuentra en un valor intermedio con respecto a las Onda A y Onda C. No se desarrolla cerca a la tubería de salida, lo cual disminuye el riesgo de sobrecarga del sistema y nunca se registraron datos en los cuales el flujo sobrepasara los bancos de la cañuela.

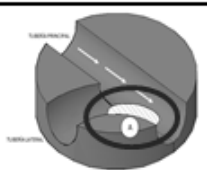
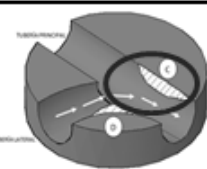
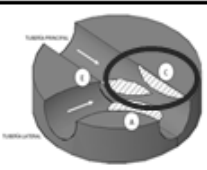
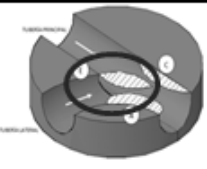
Las pérdidas de energía se analizaron para dos condiciones: (1) si la tubería principal es el conducto hidráulicamente dominante y (2) si la tubería lateral es el conducto hidráulicamente dominante siguiendo un procedimiento similar al realizado para flujo directo y flujo a 90°. Ambas condiciones se encontró que la pérdida de energía muestra una relación directamente proporcional con el número de Froude e inversamente proporcional con la relación de llenado de la tubería de entrada principal, y al igual que en los casos anteriores se encontró un comportamiento ascendente entre las caídas y los porcentajes de pérdidas.

## RECOMENDACIONES DE DISEÑO

Una vez analizado el comportamiento y relación existente entre las variables independientes y dependientes planteadas, se procedió a desarrollar un análisis estadístico con el software Statgraphics para cada onda identificada: Onda A (Flujo Directo), Onda C (Flujo a 90°), Onda C-UF (la cual corresponde a la Onda C desarrollada para la configuración de Unión de los Flujos) y Onda E (Unión de los Flujos). Y otro análisis para las pérdidas en cada tipo de flujo.

A continuación se presenta la tabla de resumen de resultados estadísticos correspondientes a las ondas identificadas (ver Tabla 1). La primera columna contiene el tipo de onda; la segunda el resultado de la ecuación encontrada; la tercera detalla las variables independientes tenidas en cuenta para el ajuste del modelo y la cuarta contiene el R-cuadrado para cada ecuación encontrada; para lo anterior se excluyeron las pruebas que se identificaron como atípicas.

**Tabla 1.** Resumen de resultados estadísticos para ondas.

TIPO DE ONDA	ECUACIÓN	VARIABLES EN X	R <sup>2</sup> [%]
 <p>Onda A - Flujo Directo</p>	$h_{maxA} = 2.92Y_1^{1.02} F_1^{-0.025} S_1^{-0.07}$	Todas	83,4292
	$h_{maxA} = 2.46Y_1^{1.049} F_1^{0.14}$	Y y F	83,3382
 <p>Onda C - Flujo a 90°</p>	$h_{maxC} = 3.41Y_2^{0.85} F_2^{0.41} S_2^{-0.13}$	Todas	78,7461
	$h_{maxC} = 3.11Y_2^{0.86} F_2^{0.45}$	Y y F	76,6135
 <p>Onda C - Unión de Flujos</p>	$h_{maxC-UF} = 2.66Y_1^{0.17} Y_2^{0.58} F_1^{0.056} F_2^{0.42} S_1^{-0.008} S_2^{-0.098}$	Todas	86,6027
	$h_{maxC-UF} = 3.13Y_1^{0.17} Y_2^{0.49} F_1^{0.043} F_2^{0.22}$	Y y F	84,723
 <p>Onda E - Unión de Flujos</p>	$h_{maxE} = 3.91Y_1^{0.22} Y_2^{0.56} F_1^{0.12} F_2^{0.08} S_1^{-0.033} S_2^{-0.13}$	Todas	90,6876
	$h_{maxE} = 3.32Y_1^{0.2} Y_2^{0.62} F_1^{0.035} F_2^{0.3}$	Y y F	85,3434



Para la Tabla 1, la definición de las variables dependientes es:

- Altura máxima de la onda A  $h_{maxA} = \frac{h_A}{H_B} = \frac{2h_A}{D_o}$
- Altura máxima de la onda C  $h_{maxC} = \frac{h_C}{H_B} = \frac{2h_C}{D_o}$
- Altura máxima de la onda C-UF  $h_{maxC-UF} = \frac{h_{C-UF}}{H_B} = \frac{2h_{C-UF}}{D_o}$
- Altura máxima de la onda E  $h_{maxE} = \frac{h_E}{H_B} = \frac{2h_E}{D_o}$

donde:  $h$  = Altura máxima de la onda.

$H_B$  = Altura del banco de la cañuela.  $H_B = \frac{D_o}{2}$

$D_o$  = Diámetro interno la tubería de entrada.

- Caída de la tubería de entrada  $S = \frac{D_o - h}{D_o}$

donde:  $h$  = Distancia vertical entre la cota batea de la tubería de entrada correspondiente y el fondo de la cámara.

A continuación se presenta la tabla de resumen de resultados estadísticos correspondientes a las pérdidas de energía (ver Tabla 2). La primera columna contiene el tipo de flujo; la segunda la definición de la variable dependiente y la tercera el resultado de la ecuación encontrada.

**Tabla 2.** Resumen de resultados estadísticos para pérdidas de energía.

TIPO DE FLUJO	VARIABLE DEPENDIENTE	ECUACIÓN
Flujo Directo	$\Delta E_{FD} = \frac{E_{s1} - E_s}{E_{s1}}$	$\Delta E_{FD} = 0.368F_1^{-0.266}Y_1^{-0.469}S_1^{-0.109}$
Flujo a 90°	$\Delta E_{FN} = \frac{E_{s2} - E_s}{E_{s2}}$	$\Delta E_{FN} = 0.224F_2^{0.533}Y_2^{-0.196}S_2^{-0.278}$
Unión de flujos. Tubería Principal hidráulicamente dominante	$\Delta E_{PD} = \frac{E_{s1} - E_s}{E_{s1}}$	$\Delta E_{PD} = 0.233F_1^{0.084}Y_1^{-0.363}S_1^{-0.276}$
Unión de flujos. Tubería Lateral hidráulicamente dominante	$\Delta E_{LD} = \frac{E_{s2} - E_s}{E_{s2}}$	$\Delta E_{LD} = 0.192F_2^{0.512}Y_2^{-0.161}S_2^{-0.291}$

## CONCLUSIONES

Aunque todas las ondas identificadas se definieron como ondas estáticas, ya que no se observó desplazamiento, las Ondas C (para cualquier configuración) y A presentan un estado crítico frente a caudales altos, ya que su finalización tiene lugar en una distancia igual a un diámetro de la tubería de entrada, medido después de la curvatura de intersección entre los canales de conducción (lateral y principal), muy cerca a la tubería de salida, lo cual genera un estado inminente de obstrucción. Por lo anterior es necesario verificar que esta distancia sea mayor a un diámetro de la tubería de entrada.

Se pudo concluir que la pérdida de energía presente en una estructura de conexión de un sistema de alcantarillado, para cualquier configuración de entrada de los flujos, puede ser descrita

de manera adecuada por el No. de Froude y la relación de llenado de la tubería de entrada o tubería hidráulicamente dominante (cuando hay más de un conducto de entrada). Se encontró una relación directamente proporcional entre la pérdida de energía presente en la cámara y el No. de Froude e inversamente proporcional con la relación de llenado.

Se encontró una relación ascendente entre la pérdida de energía presente en la cámara y la caída de la tubería de entrada o tubería hidráulicamente dominante (cuando hay más de un conducto de entrada); es decir, las menores pérdidas de energía se presentaron para la configuración sin caída y las mayores pérdidas de energía para la configuración de caída de 0.75 Do (Do corresponde al diámetro de la tubería de entrada).

Se identificó una pérdida de energía en la estructura de conexión entre el 45 – 55%, en el cual el mayor porcentaje corresponde a los escenarios donde la tubería lateral es la hidráulicamente dominante. Lo anterior, comprueba lo expuesto por Zhao & Zhu (2004), donde registraron que la pérdida de energía presente en una cámara de alcantarillado bajo condiciones de flujo supercrítico es cerca al 35 – 55%.

Las pérdidas de energía presentes en la estructura de conexión se identificaron en promedio como el 10% de las pérdidas por fricción, calculadas en las tuberías de entrada a la estructura para un tramo de 100 m, distancia máxima permitida entre cámaras de inspección. Lo anterior, refleja el porcentaje de relevancia de las pérdidas de energía presente en una estructura de conexión bajo condiciones de flujo supercrítico para el diseño de un sistema de alcantarillado.

Finalmente, se encontró que la fuerza resultante debido al flujo de entrada en la cámara de inspección es mayor para los escenarios sin caída de la tubería de entrada. Para los escenarios con caída, las fuerzas resultantes son similares para un mismo caudal de entrada; es decir, para dos caídas diferentes de la tubería de entrada con un mismo caudal, se presenta un valor similar de fuerza resultante.

## REFERENCIAS

- Schwalt, M., and Hager, W. H.** (1995). “Experiments to Supercritical Junction Flow.” *Experiments in Fluids*, 18, 429–437.
- Del Giudice, G., Gisonni, C., and Hager, W. H.** (2000). “Supercritical Flow in Bend Manhole.” *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 1, 48–56.
- Del Giudice, G., and Hager, W.H.** (2001). “Supercritical flow in 45° junction manhole.” *J. Irrig. Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 127, 100–108.
- Gisonni, C., and Hager, W. H.** (2002). “Supercritical flow in manholes with a bend extension.” *Experiments in Fluids*, 32, 357–365.
- Gisonni, C., and Hager, W.H.** (2002). “Supercritical flow in the 90° junction.” *Urban Water*, 4, 363–372.
- Gargano, R., and Hager, W. H.** (2002). “Supercritical flow across sewer manholes.” *Journal of Hydraulic Engineering*, 128, 1014–1017.
- De Martino, F., Gisonni, C., and Hager, W.H.** (2002). “Drop in Combined Sewer Manhole for Supercritical Flow.” *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 6, 397–400.
- De Martino, F., Gisonni, C., and Hager, W.H.** (2002). “Discussion of: Drop in Combined Sewer Manhole for Supercritical Flow” and “Closure to: Drop in Combined Sewer Manhole for Supercritical Flow” *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 6, 171–172.
- Gisonni, C., and Hager, W.H.** (2002). “Supercritical Flow in Sewer Manholes” *ACQUA E CITTÀ. I CONVEGNO NAZIONALE DI IDRAULICA URBANA*.
- Zhao, C., Zhu, D., and Rajaratnam, N.** (2004). “Supercritical Sewer Flows at a Combining Junction: A Model Study of the Edworthy Trunk Junction, Calgary, Alberta” *J. Environ. Eng.*, 3, 343–353.
- Hager, W.H.** (2010). *Wastewater Hydraulics*. Springer: Berlin, New York.