



FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL Y AMBIENTAL
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL
Manejo de recursos hídricos e hidro-informática

Presentado por:

MARIA XIMENA TRUJILLO GÓMEZ

MODELACIÓN FÍSICA DE CÁMARAS DE UNIÓN BAJO FLUJO SUPERCRÍTICO

Asesorado por:

JUAN GUILLERMO SALDARRIAGA

14 de Junio de 2013

Contenido

1. Introducción	1
2. Objetivos	2
Objetivo General	2
Objetivos Específicos.....	2
3. Antecedentes	3
4. Marco Conceptual	6
4.1 Número de Froude en una sección circular fluyendo parcialmente llena.....	6
4.2 Ondas Superficiales.....	8
5. Diseño Experimental.....	10
5.1 Esquema General del Montaje Experimental.....	10
5.2 Metodología General de Medición de Ondas.....	10
5.2.1 Instrumentación para medición de caudales.....	11
5.2.2 Instrumentación para medición de niveles	11
6. Modelos Físicos	13
6. 1 Cámara de Polietileno	13
6.1.1 Configuración de Pruebas	14
6.1.2 Análisis de Ondas.....	17
6.2 Cámara de Acrílico.....	21
6. 2.1 Configuración de Pruebas	22
6.2.2 Análisis de Ondas	26
7. Conclusiones	30
8. Recomendaciones.....	31
9. Bibliografía	32
10. Anexo I-Caudales mínimos y máximos	33
10.1 Caudales mínimos probados Cámara de Polietileno	33
10.2 Caudales máximos probados Cámara de Polietileno	37
10.3 Caudales mínimos probados Cámara de Acrílico	41
9.4 Caudales máximos probados Cámara de Acrílico.....	46
11. Anexo II- Análisis de incertidumbre.....	51

Listado de Figuras

Figura 1. Propiedades geométricas de la sección circular.....	6
Figura 2. Esquema del patrón de ondas formadas en cámaras de unión de tres entradas para cada tipo de prueba (a) Flujo Directo, (b) Flujo Lateral, (c) Unión de flujo directo, (d) Unión de Flujos II.	9
Figura 3 . Esquema general del modelo experimental.	10
Figura 4. Montaje experimental de cámara de unión en polietileno (a) Fotografía del modelo físico (b) Características de la cañuela.....	13
Figura 5. Flujo Directo en cámara de polietileno (a) Ondas tipo A, (b) Onda tipo B.	14
Figura 6. Flujo Lateral en cámara de polietileno(a) Desarrollo de la Onda C y D en cámara de PE, (b) Onda Tipo C.	15
Figura 7. Unión de Flujos en cámara de polietileno (a) desarrollo de las ondas tipo A y tipo E, (b) detalle onda tipo A1, (c) detalle la onda tipo A2.....	15
Figura 8. Unión de Flujos II en cámara de polietileno (a) desarrollo de ondas tipo A y ondas tipo E, (b) desarrollo de onda tipo A2, (c) detalle onda tipo E1.	16
Figura 9. Montaje experimental con cámara de acrílico (a) fotografía del modelo, (b) características físicas de la cámara.	21
Figura 10. Flujo Directo en cámara acrílico a) Ondas tipo A b) Onda tipo B.....	22
Figura 11. Flujo lateral 1 en cámara de acrílico a) ondas tipo C y D, b) detalle Onda C, c) detalle Onda D.	23
Figura 12. Flujo lateral 2 en cámara de acrílico a) Ondas tipo C y D, b) detalle Onda C, c) detalle Onda D.	24
Figura 13. Unión de Flujos en cámara de acrílico a) patrón general de Ondas tipo A1, A2 y E, b) detalle Onda A1 c) acercamiento Onda E, d) detalle Onda A2.....	25
Figura 14. Unión de Flujos II en cámara de acrílico a) patrón de Ondas A1, A2, E1 y E2, b) detalle A1 yE1,c) detalle A2 y E2.	26
Figura 15. Efectos de las ondas superficiales sobre la tubería central y/o de menor pendiente a) Resalto Hidráulico, b) Curva de Remanso.	28

Listado de Gráficas

Gráfica 1. Relación entre h_{\max}/h_B en función de Y en cámara de polietileno (a) tubería Central (b) tubería Lateral 1. (*) Q_1 , (x) Q_2 , (▲) $Q_1- Q_2$, (■) $Q_1- Q_2-Q_3$	18
Gráfica 2. Perfiles axiales de nivel en la cámara de polietileno para la tubería Central (a) $Q_{L1}- Q_C$ (b) $Q_{L1}- Q_C- Q_{L2}$	20
Gráfica 3. Altura relativa de la curva de remanso en función de F_1 (▲) $Q_{L1}- Q_C$, (■) $Q_{L1}- Q_C- Q_{L2}$.	20
Gráfica 4. Relación entre h_{\max}/h_B en función de Y en cámara de Acrílico (a) Central (b) Lateral 1. (*) Q_1 , (x) Q_2 , (▲) $Q_1- Q_2$, (■) $Q_1- Q_2-Q_3$	27
Gráfica 5. Perfiles axiales de nivel en cámara de Acrílico para la tubería Central (a) $Q_{L1}- Q_C$ (b) $Q_{L1}- Q_C- Q_{L2}$	29
Gráfica 6. Altura relativa de la curva de remanso en función de F_1 (■) $Q_{L1}- Q_C$, (▲) $Q_{L1}- Q_C- Q_{L2}$.	29
Gráfica 7. Errores del perfil de nivel en la tubería de Central, la cámara y la tubería de salida para Flujo Directo.	51
Gráfica 8. Errores del perfil de nivel en la tubería Lateral 1, la cámara y la tubería de salida para Flujo Lateral 1.	51
Gráfica 9. Errores del perfil de nivel de la tubería Central, la cámara y la tubería de salida para Unión de Flujos.	51
Gráfica 10. Errores del perfil de nivel de la tubería de Lateral 1, la cámara y la tubería de salida para Unión de Flujo.....	51
Gráfica 11. Errores del perfil de nivel de la tubería Central, la cámara y la tubería de salida para Unión de Flujos II.	52
Gráfica 12. Errores del perfil de la tubería Lateral 1, la cámara y la tubería de salida para Unión de Flujos II.	52
Gráfica 13. Errores del perfil de nivel de la tubería Lateral 2, la cámara y la tubería de salida para Unión de Flujos II.	52

Listado de Tablas

Tabla 1. Ecuaciones para calcular el número de Froude en tuberías circulares fluyendo parcialmente llenas.	7
Tabla 2. Clasificación del flujo supercrítico a partir del número de Froude. Tomado de: <i>Gargano, R., Hager, W.H. (2002). Supercritical flow across sewer manholes. J. Hydraulic Eng. 128(11), 1014–1017.</i>	7
Tabla 3. Sensores de caudal del Laboratorio de Sistemas Hidráulicos.	12
Tabla 4. Características del sensor ultrasónico de nivel.....	12
Tabla 5. Características de los componentes del modelo cámara de polietileno.....	13
Tabla 6. Resultados estadísticos sobre la altura máxima de las ondas superficiales en la cámara de polietileno.....	17
Tabla 7. Características de los componentes del modelo cámara de acrílico.....	22
Tabla 8. Resultados estadísticos sobre la altura máxima de las ondas superficiales en la cámara de acrílico.....	27
Tabla 9. Resultados obtenidos con el caudal mínimo probado por la tubería Central para Flujo Directo (polietileno).	33
Tabla 10. Resultados obtenidos con el caudal mínimo probado por la tubería Lateral 1 para Flujo Lateral (polietileno).....	34
Tabla 11. Resultados obtenidos con el caudal mínimo probado por la tubería Central y Lateral 1 para Unión de Flujo (polietileno).	35
Tabla 12. Resultados obtenidos con el caudal mínimo probado por la tubería Central, Lateral 1 y Lateral 2 para Unión de Flujo II (polietileno).	36
Tabla 13. Resultados obtenidos con el caudal máximo probado por la tubería Central para Flujo Directo (polietileno).	37
Tabla 14. Resultados obtenidos con el caudal máximo probado por la tubería Lateral 1 para Flujo Lateral (polietileno).....	38
Tabla 15. Resultados obtenidos con el caudal máximo probado por la tubería Central y la Lateral 1 para Unión de Flujos (polietileno).	39
Tabla 16. Resultados obtenidos con el caudal máximo probado por la tubería Central, Lateral 1 y Lateral 2 para Unión de Flujos II (polietileno).....	40
Tabla 17. Resultados obtenidos con el caudal mínimo probado por la tubería Central para Flujo Directo (Acrílico).	41
Tabla 18. Resultados obtenidos con el caudal mínimo probado por la tubería Lateral 1 para Flujo Lateral (Acrílico).....	42
Tabla 19. Resultados obtenidos con el caudal mínimo probado por la tubería Lateral 2 para Flujo Lateral (Acrílico).....	43
Tabla 20. Resultados obtenidos con el caudal mínimo probado por la tubería Central y Lateral 1 para Unión de Flujo (Acrílico).	44
Tabla 21. Resultados obtenidos con el caudal mínimo probado por la tubería Central, Lateral 1 y Lateral 2 para Unión de Flujos II (Acrílico).....	45

Tabla 22. Resultados obtenidos con el caudal máximo probado por la tubería Central para Flujo Directo (Acrílico).	46
Tabla 23. Resultados obtenidos con el caudal máximo probado por la tubería Lateral 1 para Flujo Lateral (Acrílico).	47
Tabla 24. Resultados obtenidos con el caudal máximo probado por la tubería Lateral 2 para Flujo Lateral (Acrílico).	48
Tabla 25. Resultados obtenidos con el caudal máximo probado por la tubería Central y Lateral 1 para Unión de Flujos (Acrílico).	49
Tabla 26. Resultados obtenidos con el caudal máximo probado por la tubería Central, Lateral 1 y Lateral 2 para Unión de Flujos II (Acrílico).	50



Glosario de Términos

Aguas abajo: En hidráulica, hace referencia a la zona posterior a un volumen de control, en la dirección del flujo.

Aguas arriba: En hidráulica, hace referencia a la zona anterior a un volumen de control, en la dirección del flujo.

Aguas lluvias: Aguas provenientes de la precipitación pluvial.

Aguas residuales: Desechos líquido provenientes de residencias, edificios, locales comerciales, instituciones, fábricas o industrias.

Alcantarillado: Conjunto de obras para la recolección, conducción, tratamiento y disposición final de las aguas residuales o de las aguas lluvias.

Área mojada: Es el área de la sección transversal del flujo perpendicular a la dirección del flujo.

Cámara de caída: Estructura utilizada para dar continuidad al flujo cuando una tubería llega a una altura considerable respecto de la tubería de salida.

Cámara de inspección: Estructura de forma usualmente cilíndrica, que remata generalmente en su parte superior en forma tronco-cónica, y con tapa removible para permitir la ventilación, el acceso y el mantenimiento de las redes de alcantarillado.

Canal: Conducto descubierto que transporta agua a flujo libre.

Cañuela: Parte interior de una estructura de conexión o cámara de inspección, cuya forma orienta el flujo. Puede utilizarse en la cámara de unión o inspección a media banca cuando cubre la mitad de la altura de los conductos entrantes o a banca llena cuando cubre una altura mayor o igual que la altura de los conductos entrantes.

Capacidad hidráulica: Caudal máximo que puede manejar un componente o una estructura hidráulica conservando sus condiciones normales de operación.

Caudal: Cantidad de fluido que pasa por determinado elemento en la unidad de tiempo.

Conducto: Estructura hidráulica destinada al transporte de agua.

Cota de batea: Nivel del punto más bajo de la sección transversal interna de una tubería o colector.

Cota de clave: Nivel del punto más alto de la sección transversal externa de una tubería o colector.

Diámetro interno real: Diámetro interno de una tubería determinado con elementos apropiados.

Diámetro nominal: Es una denominación comercial con la cual se conoce comúnmente el diámetro de una tubería, a pesar de que algunas veces su valor no coincida con el diámetro real interno.

Ducto: Canal de cualquier sección transversal que puede transportar agua a superficie libre o a presión.

Flujo a presión: Aquel transporte en el cual el agua ocupa todo el interior del conducto, quedando sometida a una presión superior a la atmosférica.

Flujo crítico: Estado de flujo en el cual la energía específica es la mínima para un caudal determinado.

Flujo cuasicrítico: Estado de flujo en el cual la energía específica se acerca a su valor mínimo para un caudal determinado.

Flujo gradualmente variado: Flujo permanente cuya profundidad y velocidad varían de manera gradual a lo largo de la longitud del canal.

Flujo libre: Aquel transporte en el cual el agua presenta una superficie libre donde la presión es igual a la presión atmosférica.



Flujo no permanente: El flujo en un canal abierto es no permanente si la profundidad y la velocidad del flujo cambian durante el intervalo de tiempo en consideración.

Flujo subcrítico: Flujo en el cual las fuerzas gravitacionales son más importantes que las fuerzas inerciales.

Flujo supercrítico: Flujo en el cual las fuerzas inerciales son más importantes que las fuerzas gravitacionales.

Flujo turbulento: Se presenta cuando las fuerzas viscosas son débiles en relación con las fuerzas inerciales. Las partículas se mueven con trayectorias irregulares, que no son suaves ni fijas, pero que en conjunto todavía representan el movimiento hacia adelante de la corriente entera.

Flujo turbulento hidráulicamente liso: Flujo en el cual la altura de rugosidad es bastante menor que el espesor de la capa límite viscosa.

Flujo turbulento hidráulicamente rugoso: Flujo en el cual la altura de rugosidad es bastante mayor que el espesor de la capa límite viscosa.

Flujo uniforme: Flujo en el cual la profundidad de agua es la misma en cada sección de un canal.

Nivel: es la elevación o distancia vertical desde un nivel de referencia o datum hasta la superficie libre. Si el punto más bajo de la sección del canal se escoge como el nivel de referencia, el nivel es igual a la profundidad de flujo.

Número de Froude: Relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas gravitacionales, que representa el efecto de la gravedad sobre el estado de flujo.

Optimización: Proceso de diseño y/o construcción para lograr la mejor armonía y compatibilidad entre los componentes de un sistema o incrementar su capacidad o la de sus componentes, aprovechando al máximo todos los recursos disponibles.

Pared interna de la tubería: Zona de contacto entre la tubería y el flujo que pasa a través de ella y que genera las pérdidas de energía debido a la fricción.

Pendiente: Inclinación longitudinal de un canal o ducto.

Perímetro mojado: Es la longitud de la línea de intersección de la superficie de la tubería mojada y de un plano transversal del flujo perpendicular a la dirección del flujo.

Período de diseño: Tiempo para el cual se diseña un sistema o los componentes de éste, en el cual su(s) capacidad(es) permite(n) atender la demanda proyectada para este tiempo.

Precisión: Es el grado de exactitud con respecto a una medida.

Profundidad de flujo: Es la distancia vertical desde el punto más bajo de una sección del canal hasta la superficie libre.

Profundidad de flujo de la sección: Es la profundidad de flujo perpendicular a la dirección de éste, o la altura de la sección del canal que contiene el agua.

Profundidad hidráulica: Relación entre el área mojada de un conducto que transporta algún fluido y su perímetro mojado.

Radio hidráulico: Relación entre el área mojada y el perímetro mojado de una sección transversal de un ducto.

Relación de llenado: Relación existente entre la profundidad del flujo de la tubería y el diámetro real interno de la misma.

Resalto hidráulico: Fenómeno hidráulico en el cual se presenta un cambio abrupto de régimen de flujo, se pasa de una corriente rápida y con profundidad baja (flujo supercrítico) a una corriente lenta y profunda (flujo subcrítico).



Sistemas de Alcantarillado: Conjunto de elementos y estructuras cuya función es la recolección, transporte y evacuación hacia las plantas de tratamiento y/o cuerpos receptores de agua, de las aguas residuales y/o lluvias producidas en una ciudad o municipio.

Tramo: Conjunto de tuberías de alcantarillado comprendida entre dos cámaras de inspección o entre una cámara y un emisario final.

Tubería o tubos: Conducto prefabricado, o construido en sitio, de concreto, concreto reforzado, plástico, poliuretano de alta densidad, asbesto-cemento, hierro fundido, gres vitrificado, PVC, plástico con refuerzo de fibra de vidrio, u otro material cuya tecnología y proceso de fabricación cumplan con las normas técnicas correspondientes. Por lo general su sección es circular.

Lista de Variables

θ = Ángulo theta.

A = Área mojada.

D = Profundidad hidráulica.

d_m = Diámetro de la cámara.

d_o = Diámetro interno de la tubería.

F = No. de Froude.

g = Aceleración gravitacional.

H = Altura de la lámina de agua sobre el vertedero.

H_B = Altura del banco de la cañuela.

h_{max} = Altura máxima de la onda.

Q = Caudal de descarga.

S_1 = Pendiente de la tubería principal.

S_2 = Pendiente de la tubería lateral.

s'_1 = Caída de la tubería principal.

s'_2 = Caída de la tubería lateral.

Y = Relación de llenado.

Y_n = Profundidad del flujo.

Agradecimientos

A mis sobrinas Laura y Natalia que me han enseñado a cuidar nuestros pasos, pues ellas los van siguiendo.

Agradezco a Mexichem S.A.S. pues su apoyo fue indispensable para la realización de este proyecto.

A Diana Cano por haber construido el montaje en acrílico.

A Jhon Calvo, Juan David Uribe, Gloria Moscote, Diego Copete y Andrés López por su invaluable colaboración en el Laboratorio de Hidráulica.

Agradezco muy especialmente, a los investigadores del Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados de la Universidad de los Andes Diego Páez y Daniel Luna, y su director el profesor Juan Saldarriaga por sus valiosas enseñanzas.

1. Introducción

Los alcantarillados son un componente esencial de la infraestructura de las ciudades modernas, pues las aguas residuales de uso doméstico, industrial, comercial, etc., se disponen en esta estructura de manera segura. Por lo tanto, el mal funcionamiento de la red de alcantarillado puede llegar a tener un alto impacto en la salud pública y en las condiciones de higiene de una población (Hager & Gissoni, 2005).

Las cámaras de inspección son estructuras hidráulicas claves en el funcionamiento de los sistemas de alcantarillado, pues cumplen las siguientes funciones: (1) aireación del alcantarillado, (2) control de obstrucciones y (3) cambio de los parámetros de la red: diámetro, dirección, pendiente o descarga (Hager & Gissoni, 2005). Inicialmente su diseño respondía al supuesto bajo el cual se diseñan alcantarillados de flujo uniforme subcrítico (MVDT, 2011). No obstante, los materiales modernos tienen rugosidades bajas cuyo efecto facilita la presencia de flujo supercrítico. Además, en ciudades montañosas, con pendientes hidráulicas altas ($S_0 > 10\%$), es común que los números de Froude sean mayores a 1.5 y las velocidades sean superiores a 3 m/s. Por esto el flujo en el sistema a lo largo de su vida útil en realidad no es subcrítico sino supercrítico, e incurrir en esta imprecisión en el proceso de diseño puede llegar a generar daños en el sistema como: formación de ondas en las tuberías, choques en la tubería de aguas abajo, afectación del transporte de aire dentro del alcantarillado, transición a flujo presurizado, geiseres y efectos de submergencia en las conexiones de edificios, que bajo determinadas circunstancias pueden llegar a colapsar el sistema y exponer la población de las urbanizaciones a los contaminantes de las aguas servidas (Hager, 1994).

Por lo tanto, la simulación de las condiciones de unión de alcantarillados es una parte esencial de cualquier modelo que represente redes de tuberías fluyendo parcialmente llenas. Si la modelación de las uniones no refleja de manera apropiada las condiciones físicas reales, entonces se anulará el uso de las ecuaciones complejas para rastrear el flujo no permanente en las tuberías (Bridge, 1984). En general, las cámaras de inspección generan una singularidad en el flujo supercrítico que induce ondas superficiales, las cuales debido a los altos números de Froude se propagan hacia aguas abajo (Sturm, 2010). Las ondas superficiales, en hidráulica de canales han sido estudiadas para canales de irrigación con operación por compuertas, túneles en hidroeléctricas con turbinas y ondas aguas abajo del rompimiento de presas. Los problemas mencionados, resuelven las ecuaciones de Saint-Venant para flujos gradualmente variados inestables en canales prismáticos rectangulares, sin descargas laterales (Sturm, 2010). Estas condiciones son bastante diferentes a las cámaras donde los canales prismáticos tienen una sección transversal en U y reciben descargas laterales importantes.

El presente estudio pretende realizar una aproximación experimental a la hidráulica en las cámaras de unión con tres tuberías de entrada bajo flujo supercrítico, teniendo en cuenta que el campo de flujo está dominado por las ondas estacionarias que comprometen la capacidad de la cámara. El principal objetivo es determinar el patrón de ondas dentro de la estructura de unión y encontrar, por medio de experimentos, ecuaciones que permitan el diseño de la cámara. La metodología consistió en registrar las alturas de flujo en las tuberías de entrada, la cámara y la tubería de salida para cada variación de caudal, de esta manera se determina la influencia de la relación de llenado y el número de Froude de los conductos sobre las características de las ondas.

2. Objetivos

Objetivo General

Entender la hidráulica de las cámaras de unión de flujo de sistemas de alcantarillado con flujo supercrítico a partir de un modelo físico.

Objetivos Específicos

1. Identificar el patrón de ondas superficiales características de cámaras de unión con dos entradas laterales y una central.
2. Analizar la influencia de la relación de llenado de las tuberías de entrada sobre las alturas ondas superficiales y el desempeño hidráulico de la cámara de unión.

A fin de alcanzar el objetivo general y los objetivos específicos planteados anteriormente, se realizó una revisión del estado del arte de las cámaras de unión y los conceptos hidráulicos más importantes que permitieran comprender y describir la formación de las ondas dentro de la cámara de unión. En el Capítulo 3, se muestran los estudios antecedentes a esta tesis; se tuvieron en cuenta publicaciones científicas de revistas especializadas e informes realizados por la Universidad de los Andes. En el Capítulo 4, se describe el número de Froude para secciones circulares fluyendo parcialmente llenas, el modelo de onda dinámica y las características del flujo supercrítico para diferentes rangos de número de Froude. El Capítulo 5, se concentra en describir el esquema general de los montajes experimentales, la metodología utilizada y la instrumentación requerida para describir el patrón de ondas en la estructura de unión. Más adelante, el Capítulo 6, realiza la descripción y el análisis de los resultados obtenidos en el montaje con la cámara de polietileno y con la cámara de acrílico. El Capítulo 7, habla de las conclusiones puntuales obtenidas en cada montaje experimental y el Capítulo 8 se trata de dar recomendaciones y abrir posibles líneas de investigación relacionadas con la formación de ondas en las cámaras de unión y su efecto sobre los conductos de entrada.

3. Antecedentes

El estudio de unión de flujos en estructuras hidráulicas inició con el análisis de flujo en canales abiertos para una sección transversal rectangular. Más adelante, fue posible demostrar que el patrón de flujo era similar al presentado en un canal con sección transversal en forma de U, con la excepción que en los canales rectangulares no se experimentó el fenómeno de ahogamiento (Bermúdez & Quejada, 2011).

De acuerdo con la literatura el primero en analizar el flujo supercrítico en cámaras fue Bower (1950); éste incluyó el análisis de las condiciones para la formación de resaltos hidráulicos en la tubería de aguas arriba. Más adelante, Johnston & Volker (1990) encontraron que la eficiencia hidráulica de las cámaras de unión se puede mejorar instalando baffles en las caídas de las cámaras. Hager (1989) amplió este acercamiento y lo relacionó con una ecuación empírica que describe la altura máxima de la onda de acuerdo con el ángulo de unión. Christodoulou (1990) investigó resaltos hidráulicos incipientes en canales con uniones a 90° con observaciones adicionales en una discusión de Schwalt & Hager (1994). Una descripción detallada de los patrones de flujo supercrítico a través de canales rectangulares de unión fue presentada por Schwalt & Hager (1995). Un procedimiento de diseño y el número de choque, utilizado para determinar algunos patrones de flujo fueron posteriormente formulados por Schwalt (1996). La investigación del flujo supercrítico en una estructura de conexión fue resumida por Vischer y Hager (1998) e implementada en estudios posteriores. Los principales resultados sobre el flujo supercrítico en uniones de alcantarillado de canales rectangulares, están recolectados en el libro *Wastewater Hydraulics, Theory and Practice* de Willi H. Hager (2010).

Posterior a la publicación del libro de Hager se encontraron artículos donde se profundizaba en el estudio del flujo en diferentes tipos de cámaras, en donde se hacían algunas recomendaciones de diseño. Por ejemplo, Giudice, Gissoni, & Hager (2000) investigaron sobre el flujo supercrítico en cámaras con curvatura de 45° determinando varios aspectos relacionados con este fenómeno. Primero, determinaron que las características de los canales en U son el entrapamiento de aire y el desarrollo de olas aguas abajo. Segundo, detectaron que las cámaras con un ángulo de deflexión 90° , colapsan si su relación de llenado es mayor a 50%.

Tercero, recomendaron evitar los números de Froude entre 0.75 y 1.5 para no disminuir la eficiencia hidráulica de la estructura. Cuarto, plantearon utilizar una cobertura para disminuir el impacto de las ondas o reducir el flujo gobernante. Más adelante, Giudice & Hager (2001) en su estudio de cámaras de unión con ángulo de deflexión de 45° concluyen que cuando las descargas son menores a la mínima, hay una transición de flujo supercrítico a flujo subcrítico. Pero si la descarga es mayor a la máxima, la unión no tiene capacidad y el flujo se presuriza, causando geiseres. Las soluciones propuestas para este tipo de cámaras son coberturas o la reducción del flujo gobernante.

Luego, Gargano & Hager (2002) determinaron que en las cámaras de unión de alcantarillado ocurren ondas superficiales, que generan submergencia y presurización del sistema hacia aguas arriba. La recomendación fue utilizar en el proceso de diseño de alcantarillados con flujo supercrítico una relación de llenado del 75% en lugar de una del 85%. Por otro lado, el mismo autor estudió los resaltos hidráulicos ondulares en los conductos circulares, pues estos pueden inducir cambios en las características de flujo si la profundidad subsecuente alcanza la cota batea del conducto. Asimismo, determinó que hay cuatro tipos de resaltos ondulares dependiendo del número de Froude; estos se encuentran influenciados por la pendiente y la rugosidad de la tubería.

En cuanto al comportamiento de las cámaras con caída bajo flujo supercrítico, De Martino, Gissoni, & Hager (2002) determinaron que a pesar de evitar la submergencia, estas propenden por la formación del resalto hidráulico dentro de la cámara, por lo que no representan ningún tipo de ventajas hidráulicas. Simultáneamente, Gissoni & Hager (2002) concluyeron que el entrapamiento de aire en las cámaras disminuye la aplicabilidad de las ecuaciones convencionales al diseño de las cámaras, pues dificulta la estimación de la altura, longitud y ubicación de las ondas.

Finalmente, Hager & Gissoni (2005) presentaron un estado del arte sobre el flujo supercrítico en las cámaras de alcantarillado, incluyendo cámaras de inspección, deflexión y unión. Reconocen que la hidráulica de los alcantarillados abarca dos tipos de flujo diferentes: flujo gradualmente variado en las tuberías y espacialmente variado en las cámaras. Aclaran que perturbar el flujo supercrítico trae dos tipos de problemas: ondas superficiales y resaltos hidráulicos. También formulan un número de Froude más simple para las secciones circulares y proponen uno para las cañuelas de la cámara que son canales de sección en forma de U. Sin embargo, estas simplificaciones del número de Froude no son válidas para todas las condiciones de flujo. Más recientemente Zhao, Xhu, & Rajaratnam, (2008) a través de una modelación computacional y experimental establecieron que las cámaras de 90° se presentan patrones de olas, mezcla, separación, turbulencia y transición o coexistencia de flujo a superficie libre y a presión.

En general, los estudios internacionales sobre el comportamiento del flujo supercrítico en cámaras de unión concuerdan en cuatro aspectos. Primero, el flujo supercrítico en cámaras de unión causa la formación de ondas superficiales y resaltos hidráulicos. Segundo, los factores que más influyen son la relación de llenado y el número de Froude de la tubería de entrada. Tercero, el criterio de diseño de alcantarillados con la relación de llenado de 85%, no se cumple, por lo que debería reducirse a 75%. Cuarto, una solución es la ubicación de cubiertas para restringir la altura de las ondas.

Por otro lado, en el Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados de la Universidad de los Andes, ha venido realizando estudios sobre cámaras de inspección desde el 2005. A continuación se muestran algunos de los títulos más relacionados con este proyecto:

- *“Metodologías para el cálculo de pérdidas menores en cámaras de inspección”*. CIACUA, 2005.
- *“Estado del arte y tendencia mundial en la construcción de manholes”*. CIACUA, 2007.
- *“Determinación del comportamiento hidráulico de cámaras de Inspección Plásticas de 600 mm”*. CIACUA, 2007.
- *“Determinación del comportamiento hidráulico de cámaras de Inspección Plásticas de 1000 mm”* CIACUA, 2007.

Los anteriores informes han estado dirigidos al impacto de las estructuras de unión sobre las pérdidas menores que generan en el sistema bajo condiciones de flujo subcrítico. Por lo tanto hay una variedad de estudios dedicados a encontrar el coeficiente de pérdidas menores que multiplicado por una altura de velocidad mejor estime dichas pérdidas. Sin embargo, a lo largo de la experiencia profesional con empresas prestadoras de servicios públicos de alcantarillado y la evidencia científica internacional, la investigación cambió de enfoque, pues se empezó a notar que el supuesto de flujo uniforme subcrítico bajo el cual se diseñaron la mayoría de sistemas de alcantarillado, estaba completamente alejado de la realidad en ciudades con pendientes hidráulicas altas ($S_0 > 10\%$).

Por el contrario, en la mayoría de los casos el flujo que se presenta es el flujo supercrítico y la presencia de este tipo de flujo en las cámaras de inspección se caracteriza por el desarrollo de ondas, las cuales como se mencionó anteriormente, pueden ocasionar obstrucción en las tuberías de aguas abajo, fomentando la transición de flujo supercrítico a flujo a presión.

De modo que en Centro de Investigaciones de Acueductos y Alcantarillados (CIACUA) para el 2011 se desarrolló el informe “*Comportamiento hidráulico de cámaras de inspección bajo condiciones de flujo supercrítico*”, con el fin de responder a las deficiencias en los diseños de las cámaras de alcantarillado bajo condiciones de flujo supercrítico, puesto que la solución de las cubiertas, propuesta por Hager y & Geudice (2001), no se considera viable para la producción en masa de cámaras. El modelo físico implementado evaluó el comportamiento de la cámara para tres escenarios de flujo: directo, lateral y unión de flujos. Adicionalmente, para cada escenario se tenían cuatro posibles alturas de caída y se variaba la relación de llenado de las tuberías entre el 5% y 75%, rango dentro del cual es habitual el flujo supercrítico en tuberías de sistemas de alcantarillado.

Las principales conclusiones de este estudio apuntan a que hay tres tipos de ondas dominantes en las cámaras de unión. La primera, cuando la tubería principal se define como hidráulicamente dominante y el caudal de entrada lateral es inferior al 10% del caudal de la principal. La segunda, cuando la tubería principal es hidráulicamente dominante y el caudal lateral es 10% mayor al de la principal. Por último, cuando la tubería lateral es hidráulicamente dominante.

En cuanto a la formación de resalto hidráulico en la conexión, se recomendó que la caída mínima sea menor a 0.25 veces el diámetro de la tubería de entrada para $d_0 < 700$ mm. Por otro lado, se evidencia la importancia de establecer el alcance del chorro entrante para disminuir el impacto de este con la curvatura de unión entre los canales. Ahora bien, en cuanto a las pérdidas de energía se encontró que éstas corresponden al 10% de las pérdidas por fricción calculadas para un tramo de 100 m. Finalmente, se determinó que la fuerza resultante debido al flujo de entrada de la cámara es mayor para los escenarios sin caída en la tubería de entrada.

4. Marco Conceptual

4.1 Número de Froude en una sección circular fluyendo parcialmente llena

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 (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, la cual es físicamente basada y tiene en cuenta las ecuaciones de Newton para el movimiento y las teorías de capa límite de Prandtl.

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

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 (ν). A fin de caracterizar el número de Froude en una tubería, se realizó un esquema para determinar el área mojada (A) y la profundidad hidráulica (D) en función del ángulo que describe la sección transversal mojada (θ). (Ver Figura 1).

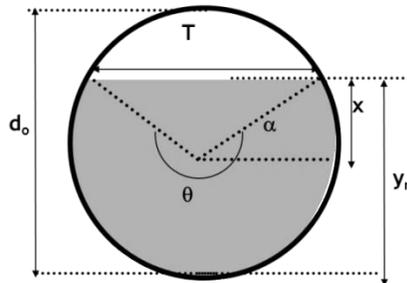


Figura 1. Propiedades geométricas de la sección circular.

Las ecuaciones obtenidas para calcular la velocidad en las tuberías, están en función de variables medidas en el laboratorio: la profundidad normal (y_n), el diámetro real interno de la tubería (d_0) y el caudal (Q) (Ver Tabla 1).

Una vez se tiene la definición del número de Froude para un canal 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 2).

Tabla 1. Ecuaciones para calcular el número de Froude en tuberías circulares fluyendo parcialmente llenas.

Propiedad	Expresión	Unidades
Ángulo que describe la sección transversal mojada (θ)	$\theta = \pi + 2 \operatorname{sen}^{-1} \left(\frac{y_n - \frac{D_0}{2}}{\frac{D_0}{2}} \right)$	[-]
Área mojada (A)	$A = \frac{1}{8} (\theta - \operatorname{sen} \theta) D_0^2$	[L ²]
Profundidad Hidráulica (D)	$D = \frac{(\theta - \operatorname{sen} \theta) D_0}{8 \cos \left(\operatorname{sen}^{-1} \left(\frac{y_n - \frac{D_0}{2}}{\frac{D_0}{2}} \right) \right)}$	[L]
Radio Hidráulico (R)	$R = \frac{D_0}{4} \left(1 - \frac{\operatorname{sen} \theta}{\theta} \right)$	[L]
Velocidad (v)	$v = -2 \sqrt{8gRS} \log_{10} \left(\left(\frac{k_s}{14.8R} \right) + \left(\frac{2.51v}{4R\sqrt{8gRS}} \right) \right)$	[L/T]
Número de Froude (F)	$F = \frac{v}{\sqrt{gD}}$	[-]

Tabla 2. Clasificación del flujo supercrítico a partir del número de Froude. Tomado de: Gargano, R., Hager, W.H. (2002). *Supercritical flow across sewer manholes. J. Hydraulic Eng. 128(11), 1014–1017.*

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 comportan 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.

La Tabla 2 muestra que una de las características típicas del flujo transicional es la presentación de ondas superficiales y resaltos hidráulicos, mientras que el flujo supercrítico empieza a tener características de flujo dinámico, es decir, que en la ecuación de conservación de momentum se tienen que tener en cuenta los efectos del remanso a través de las fuerzas de presión y las fuerzas inerciales, pues el flujo se puede acelerar o desacelerar en cualquier momento (Saldarriaga, 2012). 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 supercrítico se presenta debido al uso de materiales lisos y/o pendientes hidráulicas altas, pues existen ondas que se propagan hacia aguas arriba causadas por la operación de compuertas o cámaras (Saldarriaga, 2012).

4.2 Ondas Superficiales

Las ondas son características de los flujos inestables no uniformes. 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 W. , 1994):

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

El primer término de la ecuación representa la aceleración local y el segundo la aceleración convectiva, por lo tanto la suma de los dos primeros términos corresponde a las fuerzas inerciales. El tercer término de la ecuación presentada es la suma de las fuerzas de presión, fricción y pérdidas menores. El último término incluye el caudal lateral por unidad de longitud. Cuando la distribución de velocidad en el área transversal es muy diferente a una distribución uniforme de velocidades se incluye el término de Bousinesq (β) (Saldarriaga, 2011).

A continuación se muestran unos esquemas de las ondas en la estructura de unión con dos descargas laterales. Las ondas fueron clasificadas, de acuerdo con su localización y dirección del flujo de entrada, utilizando los esquemas reportados por Hager (1994) para cámaras con una descarga lateral o con una cámara de cambio de dirección, donde las ondas tipo A características de una entrada de caudal por la tubería central o Flujo Directo, las Ondas tipo C son producidas cuando ocurre un cambio de flujo o Flujo Lateral, y las ondas tipo E típicamente producidas por la unión de flujos en diferente dirección que pueden ser un flujo central y otro lateral, o un flujo central y dos laterales, denominados Unión de flujos I y Unión de flujos II respectivamente.

Las ondas que se presentan en los canales de la cámara o cañuelas son producidas por la expansión del flujo a la entrada de la cámara, el cambio de dirección y la unión de flujos en diferentes direcciones. En las cámaras de unión con dos descargas laterales, las ondas se caracterizaron por ser compactas, es decir, continuas y con una distribución hidrostática de presiones. Así mismo, se ha evidenciado que pueden ser solo agua o estar aireadas, dependiendo de la velocidad media, el número de Froude y la geometría de los canales en forma de U.

A continuación se muestran unos esquemas de las ondas en la estructura de unión con dos descargas laterales. Las ondas fueron clasificadas, de acuerdo a su localización y dirección del flujo de entrada, utilizando los esquemas reportados por Hager (1994) para cámaras con una descarga lateral o con una entrada donde ocurre un cambio de dirección (ver Figura 2).

En la Figura 2 se observan las ondas tipo A son características de una entrada de flujo directo, las Ondas tipo C son producidas por el impacto del flujo lateral con el final del canal lateral opuesto y las ondas tipo E son típicamente producidas por la unión de flujos en diferente dirección. En el caso de la Unión de Flujos II se presentan dos ondas tipo E, cada una al final de la unión de los canales laterales en forma de U, por lo que la onda dominante dependerá del conducto hidráulicamente dominante es decir el conducto que tenga un mayor momentum.

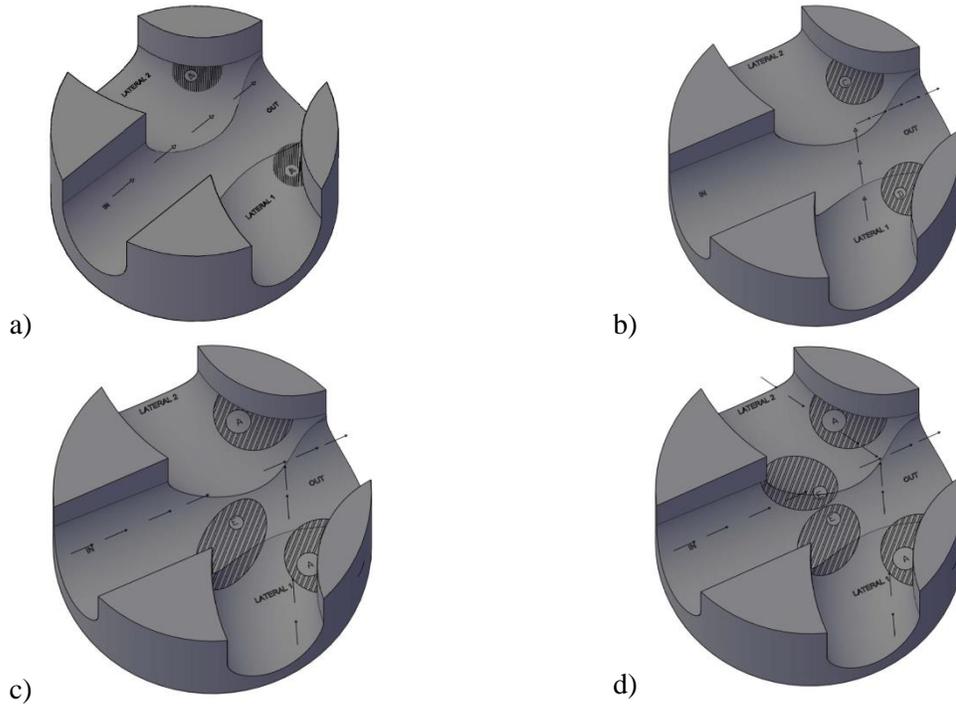


Figura 2. Esquema del patrón de ondas formadas en cámaras de unión de tres entradas para cada tipo de prueba (a) Flujo Directo, (b) Flujo Lateral, (c) Unión de flujo directo, (d) Unión de Flujos II.

5. Diseño Experimental

5.1 Esquema General del Montaje Experimental

El modelo utilizado en el presente estudio está localizado en el Laboratorio de Sistemas Hidráulicos de la Universidad de los Andes donde se han probado cámaras de unión de diferentes capacidades, materiales, ángulos de deflexión y número de tuberías de entrada. El esquema general consiste en tres tuberías de entrada unidas a una cámara de inspección, donde dos tuberías laterales entran con un ángulo de 90° , mientras que una tubería entra por el centro de la estructura de unión. La cuarta tubería es de salida, la cual desemboca el caudal en un tanque de desagüe (ver Figura 3).

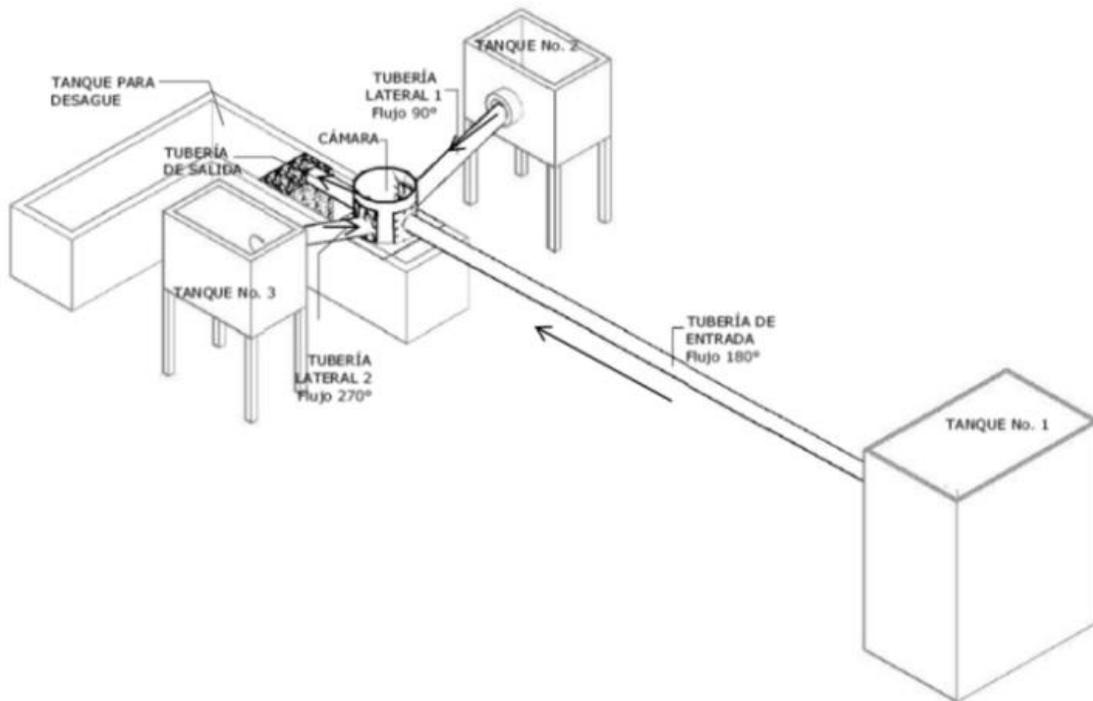


Figura 3 . Esquema general del modelo experimental.

5.2 Metodología General de Medición de Ondas

Los experimentos consistían en escoger diferentes caudales para cada tubería y operar el montaje bajo diferentes configuraciones de flujo:

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

La metodología consistió en registrar las alturas de flujo en las tuberías de entrada, la cámara y la tubería de salida para cada variación de caudal. La operación del montaje se realizó mediante el siguiente procedimiento: (1) Seleccionar el número de tuberías de entrada a la cámara y su dirección. (2) Medir el caudal que ingresa a cada una de las tuberías con los medidores electromagnéticos y ultrasónicos (Water Master y UF801-P). (3) Tomar la lectura de la profundidad de flujo en cada una de las tuberías de entrada, de salida y en la cámara de inspección. (4) Obtener los datos del sensor ultrasónico de nivel (U-GAGE T30), con una frecuencia de 228 kHz, y procesarlos con el fin de obtener la evolución temporal y espacial del flujo. Esto permite caracterizar la dinámica de las ondas superficiales en el interior del dominio.

5.2.1 Instrumentación para medición de caudales

La medición de los caudales que fluyen por cada una de las tuberías de entrada se hizo utilizando algunos de los sensores de la red elevada del Laboratorio de Hidráulica de la Universidad de los Andes y un sensor ultrasónico no intrusivo (UF 801-P). La alta precisión de los sensores permitió obtener resultados con un bajo nivel de incertidumbre y la frecuencia de medición fue lo suficientemente alta como para detectar la variación del caudal, resultante de la manipulación de las válvulas reguladoras de caudal (ver Tabla 3).

5.2.2 Instrumentación para medición de niveles

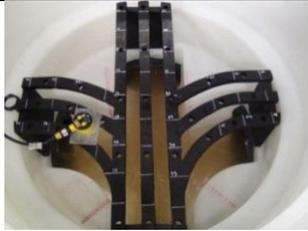
Los niveles del flujo se determinaron utilizando sensores U-GAGE T30, los cuales tienen una zona muerta de aproximadamente 7 cm (ver Tabla 4- Características del sensor), por lo que se construyeron dos estructuras, una diseñada para medir el nivel en las tuberías y otra para la cámara. Ambas estructuras permitían trasladar el sensor por todos los puntos de medición, cumpliendo con las recomendaciones del fabricante.

La estructura de medición de las tuberías, consistía en una tubería de polietileno blanca, de 10 cm de longitud, con un diámetro de 4", donde estaba instalado el sensor en posición vertical. De manera que las tuberías de entrada y salida fueron perforadas en la parte superior para poder fijar el sensor en el punto de medición durante un período de tiempo determinado (ver Tabla 4- Tubería). En cuanto a la estructura del sensor que se encontraba en la cámara, se diseñó un riel de madera, donde se podía ir fijando el sensor en cada uno de los puntos de medición establecidos en los planos de los diferentes montajes probados (ver Tabla 4- Cámara).

Tabla 3. Sensores de caudal del Laboratorio de Sistemas Hidráulicos.

Tanque	Sensor	Características
Principal		<i>Water Master</i> Es un medidor de flujo electromagnético de alta precisión, para fluidos conductores. Temperatura: [-20°C, 60°C] Frecuencia: 50 a 60 Hz Precisión: ±5%
Lateral 1		<i>UF 801-P</i> Es un sensor de caudal portátil, que mide la diferencia de tiempo entre el tránsito de ondas ultrasónicas a través de fluidos como el agua. Temperatura: [-10°C, 50°C] Resolución temporal: 0.1 ns Precisión: ± 5%
Lateral 2		<i>Water Master</i> Es un medidor de flujo electromagnético de alta precisión, para fluidos conductores. Temperatura: [-20°C, 60°C] Frecuencia: 50 a 60 Hz Precisión: ±5%

Tabla 4. Características del sensor ultrasónico de nivel.

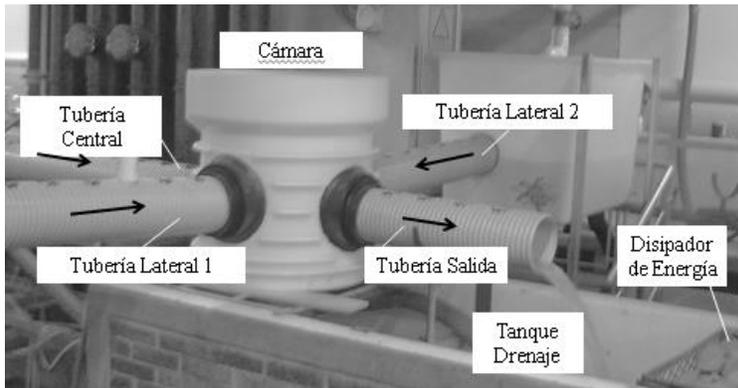
Estructura de medición-Tubería	Estructura de medición-Cámara
	
Características del sensor- U-GAGE T30	
<p>Sensor ultrasónico para medición de nivel de líquido en tanques. Hermético y resistente a la humedad relativa de 100%. Rango: 150mm-1m Frecuencia : 228kHz Tiempo de respuesta : 48 milisegundos Resolución: ±0.25% de la distancia medida. Temperatura:[-20°C,70°C] Zona muerta: 7 cm</p>	

6. Modelos Físicos

6.1 Cámara de Polietileno

El modelo experimental estaba compuesto por tres tanques de almacenamiento (2 laterales y 1 principal) conectados a una cámara de unión fabricada en polietileno a través de tuberías de PVC Novafort. Las tuberías laterales se denominaron Lateral 1 y Lateral 2; la tercera tubería es la entrada Central. Aguas abajo de la unión, el flujo desemboca a un tanque de desagüe por medio de otra tubería de PVC Novafort (ver Figura 4).

a)



b)

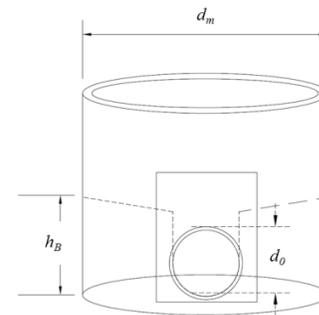


Figura 4. Montaje experimental de cámara de unión en polietileno (a) Fotografía del modelo físico (b) Características de la cañuela.

Tabla 5. Características de los componentes del modelo cámara de polietileno.

Estructura	Dimensión	Valor	Unidades
Cámara PE	Diámetro externo	0.780	m
	Altura	0.780	m
	Espesor	0.050	m
	Conexiones	9.000	"
	Caída	0.000	m
Tubería Principal	Diámetro	8.000	"
	Diámetro real interno	0.182	m
	Longitud PVC Novafort	6.000	m
	Longitud PVC Novafort	3.780	m
	Pendiente		-
Tubería Lateral 1	Diámetro	8.000	"
	Diámetro real interno	0.182	m
	Longitud PVC Novafort	1.300	m
	Pendiente		-
Tubería Lateral 2	Diámetro	8.000	"
	Diámetro real interno	0.182	m
	Longitud PVC Novafort	1.080	m
	Pendiente		-
Tubería Salida	Diámetro	8.000	"
	Diámetro real interno	0.182	m
	Longitud PVC Novafort	0.810	m

La cámara de unión tiene características geométricas como el diámetro de la cámara (d_m) que es mayor al diámetro de la tubería (d_0) y las paredes verticales de las cañuelas en forma de U o bancas tiene un alto (h_B), cuando las bancas son mayores al diámetro de las tuberías de entrada se le denomina cámara con cañuela completa. La tubería de entrada tiene una longitud total de 9.78 m pero por facilidad de construcción, transporte y costos se determinó que para este montaje tendrá dos tramos: el primero de 6.00 m y el segundo de 3.78 m. Las características específicas de los componentes del montaje se describen en la Tabla 5.

6.1.1 Configuración de Pruebas

6.1.1.1 Flujo Directo

El flujo directo por la cámara de unión, es la configuración más sencilla. Se encontró que se generan dos ondas tipo A (ver Figura 5a), esto se debe al impacto del flujo con el final de los canales laterales. Así mismo se observó que a la salida de la cámara se forma una onda tipo B, la cual nunca fue más alta que las ondas tipo A debido a que es la confluencia de ambas (Figura 5b). En esta configuración se observó que la cañuela completa en forma U es adecuada para la entrada directa del flujo pues la altura máxima de la onda nunca fue mayor $0.5h_B$, donde h_B es la altura de la cañuela, indicando que las cámaras con cañuela completa evitan que se rebose el caudal transportado.

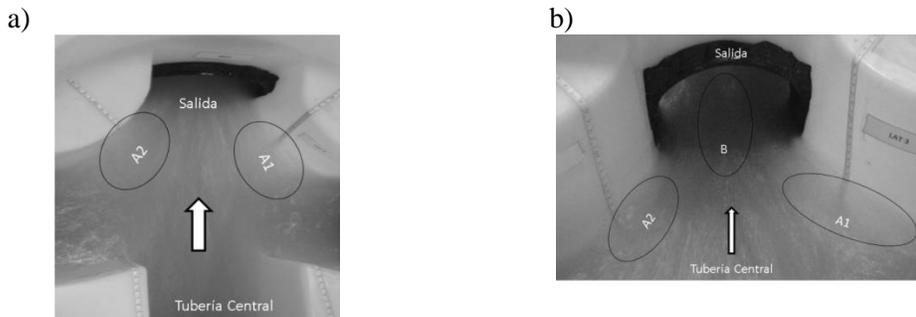


Figura 5. Flujo Directo en cámara de polietileno (a) Ondas tipo A, (b) Onda tipo B.

6.1.1.2 Flujo Lateral

El flujo por la entrada Lateral I representa una configuración típica de un sistema de alcantarillado, donde el flujo hace un cambio de dirección de 90° , pues las redes usualmente siguen el trazado de las vías y es común encontrar un cambio de dirección en las mismas. Principalmente, se observaron dos tipos de ondas denominadas C y D (ver Figura 6a).

La onda tipo C se forma cuando el flujo lateral impacta el final de la pared lateral opuesta (Ver Figura 6b). Por otro lado, la onda tipo D se forma cuando el flujo en 90° choca contra la pared interna del canal lateral por el cambio de dirección (Ver Figura 6a), de manera que la onda tipo D no se desarrolla por sí misma, sino como una respuesta a la onda tipo C. En esta configuración se puede notar un aumento considerable en la profundidad del flujo en la salida con respecto al flujo directo, lo que se atribuye al cambio en la dirección.

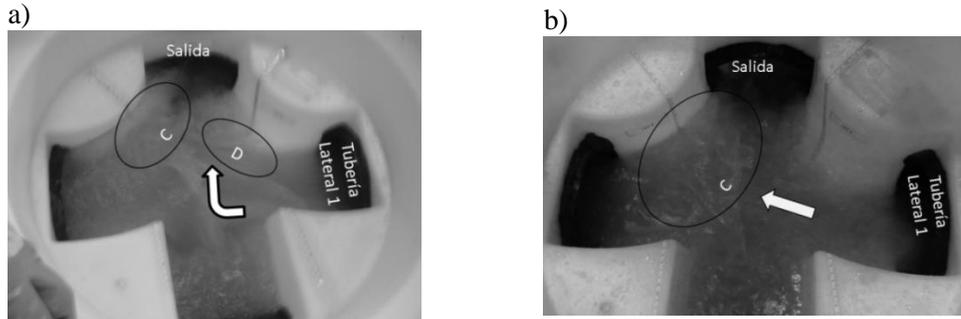


Figura 6. Flujo Lateral en cámara de polietileno(a) Desarrollo de la Onda C y D en cámara de PE, (b) Onda Tipo C.

La relación de los parámetros independientes mostró que (1) la onda dominante es la onda tipo C y su altura máxima depende de la relación de llenado de la tubería de entrada. La altura máxima de la onda fue $0.38h_B$ indicando que la cañuela completa mantiene la eficiencia hidráulica de la estructura.

6.1.1.3 Unión de Flujos I

La coexistencia de un flujo lateral con el caudal que entra por la tubería central recrea la situación en la que la red de alcantarillado recolecta aguas residuales o fluviales en diferentes puntos de un centro urbano.

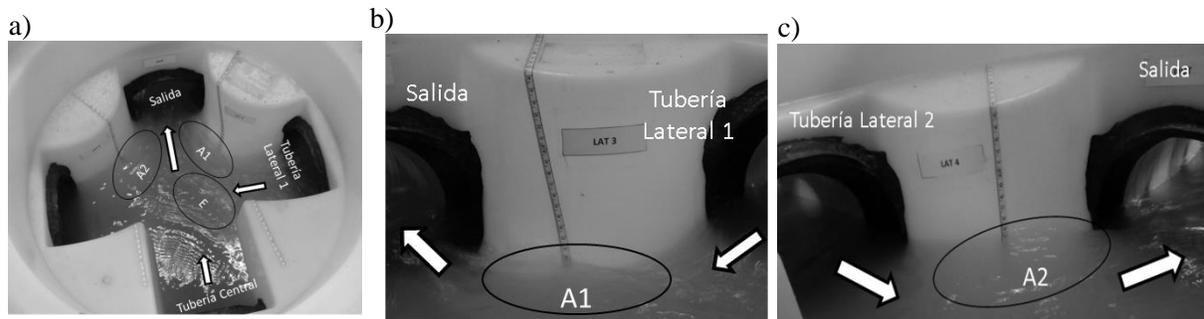


Figura 7. Unión de Flujos en cámara de polietileno (a) desarrollo de las ondas tipo A y tipo E, (b) detalle onda tipo A1, (c) detalle la onda tipo A2.

El patrón de flujo de esta configuración incluye la formación de tres ondas (ver Figura 7a): la onda tipo E que se forma por la combinación de flujos en el punto de unión de los canales en forma de U, la onda tipo A1 consecuencia del impacto del flujo central con el final del canal lateral 1 (Figura 7b) y la onda tipo A2 que ocurre cuando el caudal central impacta con el final del canal lateral 2 (Figura 7c).

Las ondas tipo A parecen ser hidráulicamente dominantes en la tubería central cuando la descarga lateral es 10% menor a la descarga de la tubería central. Sin embargo, para todas las configuraciones de flujo la onda tipo E fue la que tuvo una altura máxima mayor equivalente a $0.72h_B$. Esta onda es típica en la unión de flujos supercríticos en diferente dirección, pues la única manera de conservar el momentum en este caso es aumentar la profundidad.

Una consecuencia de cambios de profundidad significativos es la desaceleración del flujo, lo que termina afectando la tubería central, pues facilita la formación de una curva de remanso cuya longitud se desplaza hacia la tubería de menor pendiente.

6.1.1.4 Unión de Flujos II

La unión de tres flujos representa la condición crítica en cuanto a la eficiencia hidráulica de la estructura de unión, pues ingresan tres flujos supercríticos y ocurren dos cambios de dirección simultáneamente. Se observó que la unión de tres flujos en la cámara provoca la formación de cuatro ondas (ver Figura 8a): la onda tipo A1 que se forma porque el caudal lateral 2 impacta contra el final del canal lateral 1, la onda tipo A2 que ocurre cuando el caudal lateral 1 impacta con el final del canal lateral 2 (Figura 8b). Finalmente, las ondas tipo E1 y E2 que se forman en los puntos de unión de los canales en forma de U (Figura 8c). En los perfiles de flujo realizados para cada una de las pruebas se puede observar cómo la coexistencia de estas cuatro ondas aumenta significativamente el nivel del agua, formando un perfil ondulado continuo. Por lo tanto, el riesgo de que se sobrecargue la tubería de menor pendiente como consecuencia de la formación de una curva de remanso aumenta considerablemente con respecto a la configuración de Unión de Flujos I.

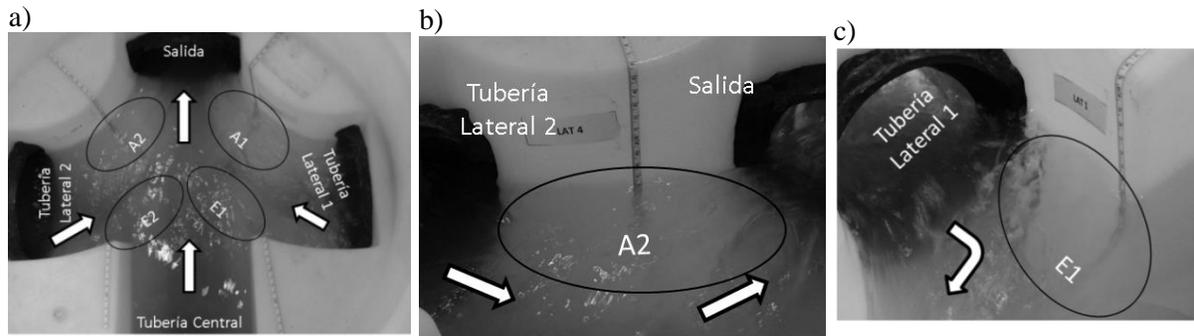


Figura 8. Unión de Flujos II en cámara de polietileno (a) desarrollo de ondas tipo A y ondas tipo E, (b) desarrollo de onda tipo A2, (c) detalle onda tipo E1.

Las ondas tipo A1 y A2 se forman cuando el flujo directo impacta las paredes curvas de las cañuelas laterales y también cuando las descargas laterales son menores al 10% de la descarga central. La altura máxima de las ondas tipo E dependen de las condiciones de los conductos laterales, el conducto hidráulicamente dominante o con mayor momentum para todas las pruebas fue la tubería lateral 2, debido a que tiene la mayor pendiente ($S=6\%$). En consecuencia, la onda E1 fue la que obtuvo mayores alturas máximas de onda cercanas a $0.73h_B$.

La presencia de estas ondas afectó el flujo en la tubería central, pues se generó un resalto hidráulico a la entrada de la cámara que para descargas laterales más grandes éste se desplazaba en la dirección de la tubería de menor pendiente, la longitud de la curva de remanso alcanzó a ingresar hasta 4 m dentro del conducto central.

6.1.2 Análisis de Ondas

6.1.2.1 Análisis estadístico

Las ecuaciones de diseño se obtuvieron mediante un análisis estadístico utilizando el software *Minitab*®, para cada una de las ondas dominantes en las diferentes configuraciones de flujo: las ondas tipo A dominantes del Flujo Directo, las ondas tipo C que tuvieron las mayores alturas máximas para el Flujo Lateral 1 y Flujo Lateral 2, las ondas tipo E dominantes en I Unión de Flujos I y las ondas tipo E1 que fueron las de mayor altura en la Unión de Flujos II.

Se realizaron regresiones multiparamétricas, donde las variables independientes eran la relación de llenado (Y) y el número de Froude (F) aguas arriba. La variable dependiente era la altura máxima de la onda con respecto a la altura de la pared del canal en forma de U (h_{max}):

- Altura máxima de onda tipo A
$$h_{maxA} = \frac{h_A}{h_B} \quad (1)$$

- Altura máxima de onda tipo C
$$h_{maxC} = \frac{h_C}{h_B} \quad (2)$$

- Altura máxima de onda tipo E
$$h_{maxE} = \frac{h_E}{h_B} \quad (3)$$

- Altura máxima de onda tipo E1
$$h_{maxE1} = \frac{h_{E1}}{h_B} \quad (4)$$

La Tabla 6 muestra un resumen de los resultados estadísticos; la primera columna contiene el tipo de onda; la segunda columna muestra la ecuación obtenida y la tercera columna muestra el coeficiente de correlación.

Tabla 6. Resultados estadísticos sobre la altura máxima de las ondas superficiales en la cámara de polietileno

Tipo de Onda	Ecuación	R ²
	$h_{maxA} = 0.808 * Y_C^{0.875} * F_C^{0.173}$	99.93%
	$h_{maxC} = 0.201 * Y_{L1}^{0.594} * F_{L1}^{1.624}$	99.86%
	$h_{maxE} = 1.79 * \frac{Y_{L1}^{0.231} * F_{L1}^{0.161}}{F_C^{2.031}}$	95.11%
	$h_{maxE-II} = 0.06 * F_C^{0.940} * Y_{L2}^{0.7188} * F_{L2}^{1.146}$	15.57%

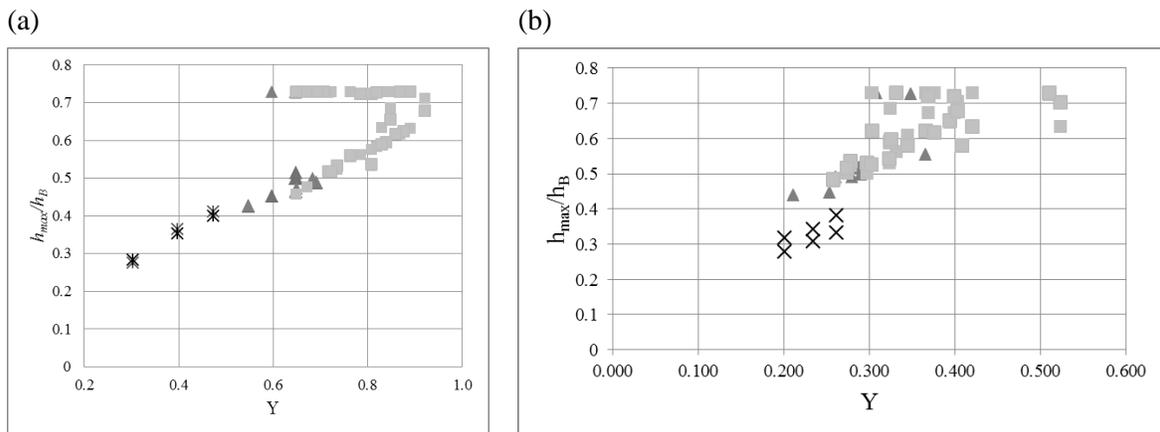
Al observar los coeficientes de correlación obtenidos para cada una de las configuraciones, se puede ver que son superiores a 0.9, es decir que la variabilidad de la altura máxima de las ondas dominantes se explica en gran proporción por los parámetros escogidos. Sin embargo, la ecuación obtenida para la onda E-II tiene una correlación baja; esto se explica debido a que el patrón de ondas desacelera considerablemente el caudal de entrada, por lo que es difícil determinar la variación de la altura máxima de esta onda en particular con respecto a la variación de las variables independientes medidas en las tuberías Lateral 1, Lateral 2 y Central.

Al comparar los exponentes de cada uno de los parámetros se puede determinar que cuando sólo ocurre una descarga en las cámaras de unión el número de Froude tienen exponentes menores que cuando hay confluencia de caudales de entrada, pues los exponentes del número de Froude para las Ondas A y las Ondas C son menores que los de las ondas E y E-II.

6.1.2.2 Análisis hidráulico

El análisis hidráulico para las diferentes configuraciones de flujo en la tubería Central y la tubería Lateral 1, consistió en analizar la relación entre la altura máxima de las ondas (h_{max}) respecto a la relación de llenado en los conductos de entrada aguas arriba de la unión (Y) para todas las pruebas realizadas.

En la tubería central la altura máxima de las ondas dominantes (h_{max}) tiene una correlación positiva y lineal si $Y < 0.6$ (ver Gráfica 1a), pero para relaciones de llenado mayores la tendencia es parabólica. Lo anterior, responde a la configuración de flujo, pues cuando hay un o dos descargas por la tubería Central y/o Lateral 1, hay una relación unívoca y lineal entre los parámetros. Pero cuando se unen los caudales de las tres tuberías de entrada se forma una cuarta onda que afecta la correlación entre los parámetros haciendo que la relación entre h_{max} y Y sea parabólica. Por otro lado, se puede apreciar que a pesar de que el escenario con los tres caudales de entrada representa la situación crítica del funcionamiento de la estructura, la altura máxima de las ondas nunca superó $0.72h_B$. De manera que se recomienda que el diseño de las cámaras de unión de alcantarillado tenga las paredes de las cañuelas más altas que el diámetro de las tuberías de entrada, para mantener la capacidad de la cámara y prevenir que la estructura se rebose.



Gráfica 1. Relación entre h_{max}/h_B en función de Y en cámara de polietileno (a) tubería Central (b) tubería Lateral 1. (*) Q_1 , (×) Q_2 , (▲) Q_1-Q_2 , (■) $Q_1-Q_2-Q_3$

En cuanto a la relación entre h_{\max} con respecto a Y en la tubería Lateral 1, se puede observar que cuando llegan dos o más descargas con $0.2 < Y < 0.3$, h_{\max} aumenta un 10% para con respecto a cuándo ocurre una sola descarga lateral (ver Gráfica 1b). De igual forma, cuando entra un caudal lateral se aprecia una correlación lineal y positiva entre los parámetros evaluados, mientras que cuando hay dos o más descargas aparece una relación parabólica entre los parámetros. También se puede evidenciar que la altura máxima obtenida fue de aproximadamente $0.73h_B$, de manera que se mantuvo la eficiencia hidráulica de la estructura incluso con la ocurrencia de flujos que cambian de dirección.

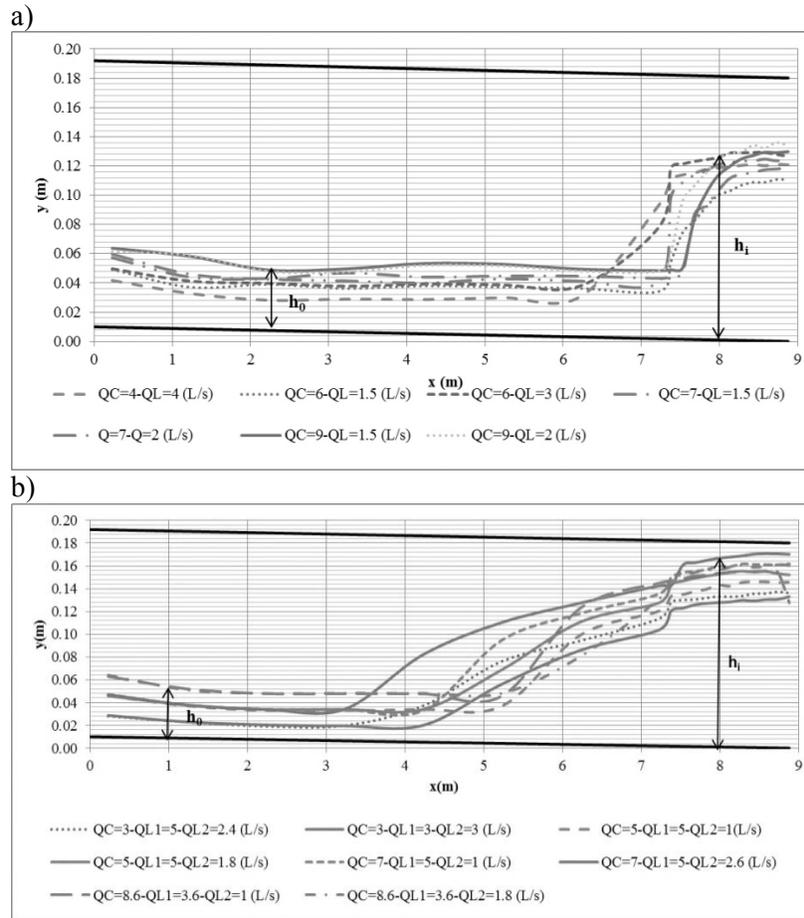
6.1.2.3 Análisis de la curva de remanso

Considerando que la onda tipo E1 genera un resalto hidráulico que se mueve a través de la tubería central y que este eventualmente puede provocar sobrecarga en la tubería de menor pendiente, se analizaron los perfiles axiales de flujo en la tubería central para la Unión de Flujos I (Ver Gráfica 2a) y la Unión de Flujos II (Gráfica 2b). Las pruebas realizadas 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, formando una curva de remanso que alcanza a desplazarse hasta 5 m aguas arriba de la entrada a la cámara de unión.

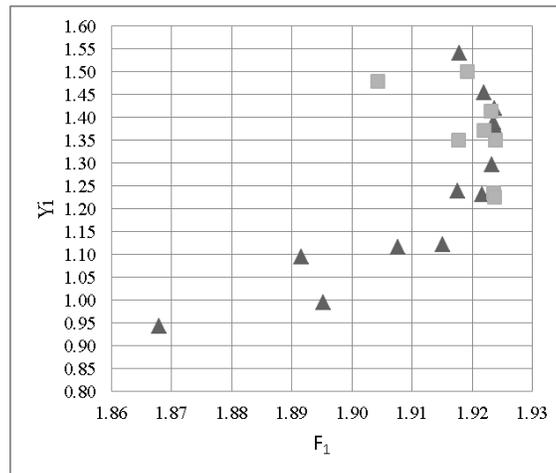
Una observación relevante respecto a la capacidad máxima de una cámara de polietileno con un $d_m = 3.5d_0$, y es que tiene una capacidad máxima de recepción de caudal de 14.5 L/s, antes de que la tubería central se sobrecargue inmediatamente aguas arriba de la cámara.

A fin de determinar la influencia de las condiciones aguas arriba sobre la formación del resalto hidráulico, se evaluó la relación entre la altura relativa de la propagación de la onda $Y_i = (h_i - h_0)/h_i$ en función del número de Froude supercrítico (F_1) y se encontró una relación parabólica entre los parámetros. Las alturas relativas fueron mayores a 0.25 indicando el riesgo de sobrecarga en la tubería de entrada debido a la curva de remanso (ver Gráfica 3).

La tendencia observada en la Gráfica 3 contrasta con la ecuación cuadrática que describe la relación entre las alturas subsecuentes del resalto y el número de Froude, dada por la siguiente expresión: $\frac{y_1}{y_2} = \frac{1}{2} [-1 + \sqrt{1 + 8F^2}]$. De manera que la relación de entre las profundidades subsecuentes de la curva de remanso en un canal circular es parabólica, mientras que en un canal rectangular dicha relación es cuadrática.



Gráfica 2. Perfiles axiales de nivel en la cámara de polietileno para la tubería Central (a) $Q_{L1}-Q_C$ (b) $Q_{L1}-Q_C-Q_{L2}$.



Gráfica 3. Altura relativa de la curva de remanso en función de F_1 (\blacktriangle) $Q_{L1}-Q_C$, (\blacksquare) $Q_{L1}-Q_C-Q_{L2}$.

6.2 Cámara de Acrílico

El segundo modelo experimental está compuesto por tres tanques de almacenamiento (2 laterales y 1 principal) conectados a una cámara de acrílico, por medio de tuberías de acrílico y PVC Novafort (ver Figura 9a). Aguas abajo de la unión, el flujo desemboca a un tanque de desagüe por medio de otra una tubería de salida.

Las características físicas de la cámara de acrílico son diferentes a las de polietileno, ya que esta cámara se le fabricaron dos tapas de acople para las tuberías laterales de entrada. Por lo que era posible obtener pruebas con diferentes pendientes (S) y observar los efectos de las entradas con caídas en el patrón de ondas (ver Figura 9b).

La cámara de acrílico tiene un diámetro (d_m) mayor al diámetro de las tuberías de entrada (d_o); ambas tapas construidas tienen anchos (b_T) y altos (h_T) iguales. Pero tienen diferentes alturas de caída ($s_1=0.12m$, $s_2=0.06m$). En cuanto a la tubería central de 9.78 m de longitud, se dividió en tres tramos: dos en PVC Novafort y uno en acrílico. En la Tabla 7 se describen las características de cada componente del modelo físico.

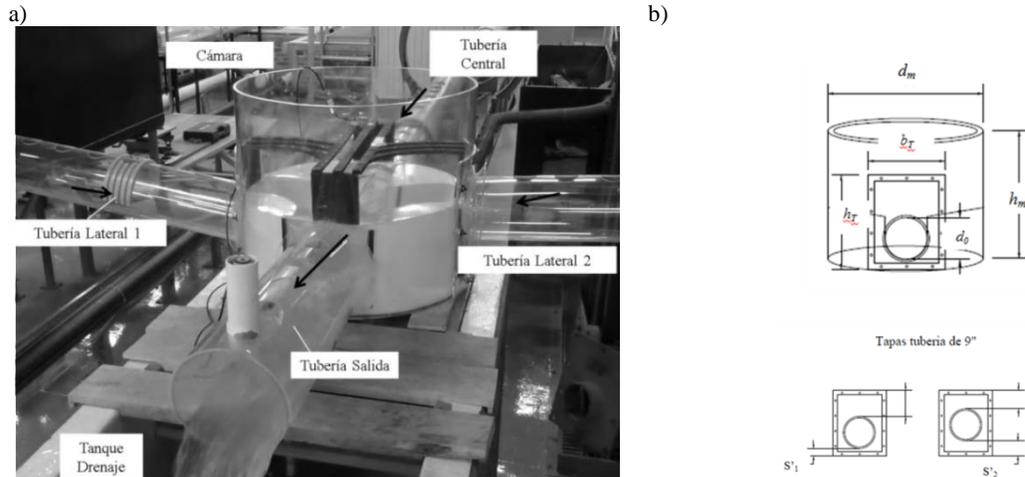


Figura 9. Montaje experimental con cámara de acrílico (a) fotografía del modelo, (b) características físicas de la cámara.

Tabla 7. Características de los componentes del modelo cámara de acrílico.

Estructura	Dimensión	Valor	Unidades
Cámara Acrílico	Diámetro externo	0.851	m
	Altura	0.720	m
	Espesor	0.010	m
Tapa acople caída 1	Caída	0.035	m
	Alto	0.520	m
	Ancho	0.420	m
Tapa acople caída 2	Caída	0.095	m
	Alto	0.520	m
	Ancho	0.420	m
Tubería Principal	Diámetro	9.000	"
	Diámetro real interno	0.218	m
	Longitud Tramo PVC Novafort	6.000	m
	Longitud Tramo PVC Novafort	2.230	m
	Longitud Tramo Acrílico	1.550	m
Tubería Lateral 1	Diámetro	9.000	"
	Diámetro real interno	0.218	m
	Longitud Acrílico	1.400	m
Tubería Lateral 2	Diámetro	1.200	"
	Diámetro real interno	0.218	m
	Longitud Acrílico	1.400	m
Tubería Salida	Diámetro	11.000	"
	Diámetro real interno	0.262	m
	Longitud Acrílico	1.500	m

6. 2.1 Configuración de Pruebas

6.2.1.1 Flujo Directo

Cuando ocurre una descarga por la tubería de entrada central se forman dos ondas tipo A sobre el final de cada uno de los canales laterales. Estas ondas no afectan la capacidad de la estructura de unión pues son bastante compactas; sin embargo tienen efectos sobre la tubería de salida pues como respuesta a la formación de las ondas tipo A aparece una onda tipo B en la salida de la cámara.

Las ondas tipo A formadas en la estructura de acrílico no son completamente simétricas debido a una ligera desviación en la tubería de entrada que hace que el flujo impacte contra la pared izquierda de la cañuela. Si bien esta característica es particular de este montaje, en las instalaciones de sistemas de alcantarillados es común observar este tipo de errores que se presentan en la etapa de construcción.

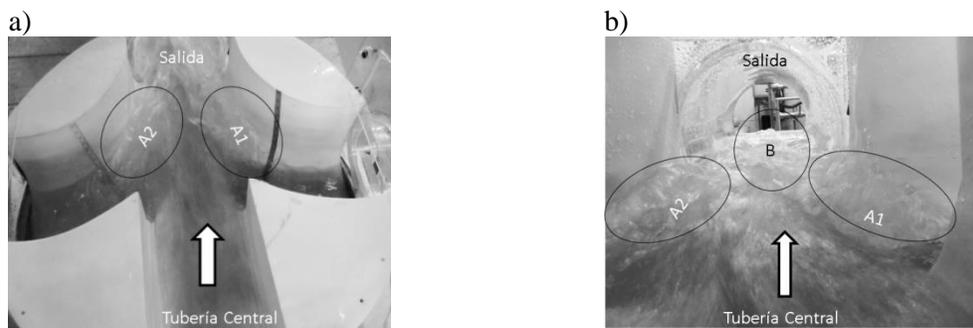


Figura 10. Flujo Directo en cámara acrílico a) Ondas tipo A b) Onda tipo B.

Las ondas Tipo A presentadas en las pruebas, a pesar de ser dominantes tan solo alcanzaron una altura máxima cercana a $0.3h_B$, por lo que no tienen implicaciones sobre diseño de la estructura. Por otra parte, si bien la Onda B no parece afectar las condiciones del flujo dentro de la cámara, se desconocen sus efectos aguas abajo, es decir, en una red de alcantarillado probablemente la tubería de salida de la cámara aguas abajo se conectaría a otra cámara o a una salida de un vertedero, y los efectos que tenga la formación de la onda B sobre las mismas no se han estudiado.

6.2.1.2 Flujo Lateral

El flujo lateral en la cámara de acrílico tuvo en cuenta ambas entradas laterales, debido a que las tuberías de laterales pueden tener diferentes caídas y pendientes. La entrada Lateral 1 tiene una altura de caída de 0.06 m, mientras que la entrada Lateral 2 entra a la cámara con una caída de 0.12 m. En la cámara coexistieron dos zonas diferentes. La primera, estaba localizada en el punto donde la descarga puntual caía al fondo de la cámara, ahí la se favorecía la formación de la onda C, la cual era bastante aireada. La segunda zona, se ubica en el canal en forma de U de la tubería central, donde se forma una curva de remanso muy desacelerada donde el flujo estaba prácticamente estancado.

6.2.1.2.1 Flujo Lateral 1

La tubería Lateral 1 con una entrada de 0.06 m tenía una caída de 12.8%. El cambio de dirección del flujo generaron ondas tipo C y D (ver Figura 11a). Se observó que las uniones de los canales en U tenían bordes muy agudos que al interactuar con el flujo causaron una mayor aireación de la onda C, de modo que la geometría de las cañuelas afecta la caracterización de las ondas. En general, es preferible que la estructura de unión tenga una geometría suave que permita el paso del flujo sin que este sea muy intervenido.

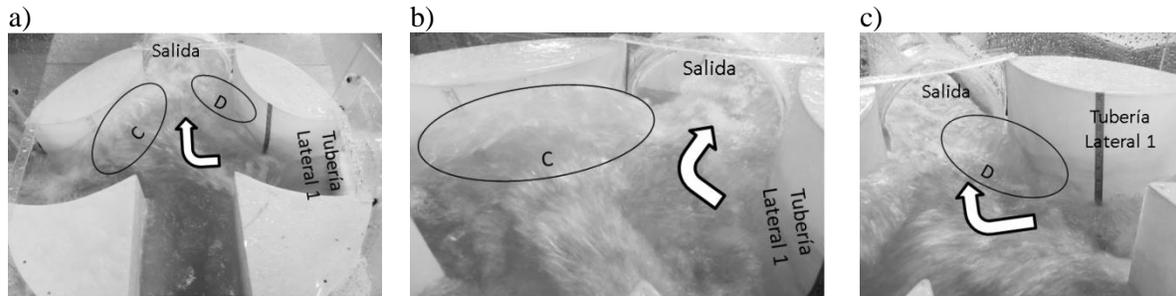


Figura 11. Flujo lateral 1 en cámara de acrílico a) ondas tipo C y D, b) detalle Onda C, c) detalle Onda D.

La altura máxima de la onda tipo C observada fue $0.85h_B$, de manera que esta onda tiene un potencial para poner en riesgo la capacidad hidráulica de la estructura de unión, si llegan a entrar caudales laterales mayores a 14 L/s en una cámara con características similares a la probada en el laboratorio (ver Figura 11b). Por otro lado, se evidenció que la onda D no es dominante, pues surge como una respuesta al impacto de la onda C con el final del canal lateral 2, de manera que esta podría no ser un parámetro relevante para el diseño de la estructura y tampoco provoca aceleraciones o desaceleraciones del flujo que pudieran afectar la eficiencia de la cámara.

6.2.1.2.2 Flujo Lateral 2

La tubería lateral 2 tenía una pendiente de 10.8% al instalar la tapa con una caída de 0.12 m. Igualmente, las ondas C y D características del cambio de dirección del flujo lateral se presentaron en todas la pruebas realizadas (ver Figura 12a).

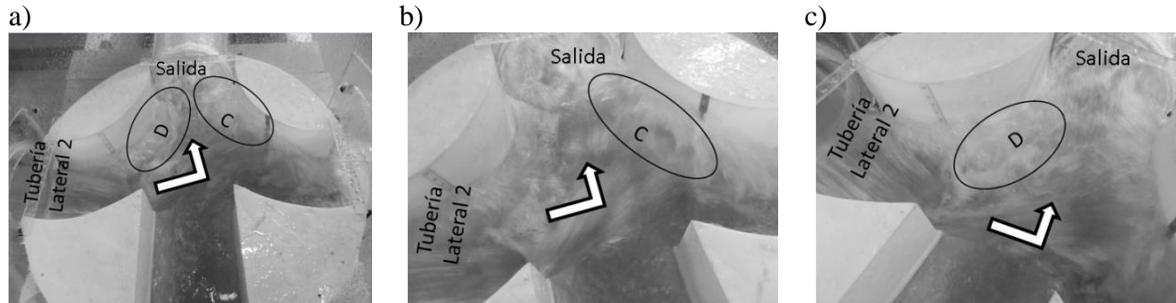


Figura 12. Flujo lateral 2 en cámara de acrílico a) Ondas tipo C y D, b) detalle Onda C, c) detalle Onda D.

La onda C formada por el impacto del flujo Lateral 2 con el final del canal Lateral 1 alcanzó una altura máxima de $0.58h_B$, mientras que la onda D alcanzó una altura máxima de $0.35h_B$. En consecuencia, el incremento de la caída no solo disminuye la pendiente con la que entra la tubería lateral sino también la altura máxima de las ondas debido a que aumenta la capacidad de almacenamiento de la cámara, creando zonas de estancamiento, de modo que no se observan aumentos en la altura de la onda sino aumento del nivel de agua dentro de la cámara.

6.2.1.3 Unión de Flujos I

La unión de flujos representa una situación donde se recolectan aguas servidas en diferentes puntos de la red de alcantarillado. En la cámara de acrílico cuando llegaba el caudal por la tubería Central y por la tubería Lateral 1, se presentaban ondas tipo A al final de los canales laterales y una Onda E en la unión de los canales en forma de U (ver Figura 13a).

Las ondas A1 y A2 que se observaron en esta configuración eran mucho más continuas que las que se presentaron en el flujo directo (ver Figura 13b y Figura 13d). La Onda E que se presentó, es la consecuencia de la confluencia de caudales en diferente dirección; esta se caracterizó por ser una onda continua, con aireación baja, localizada en el punto de unión de los canales en forma de U (ver Figura 13c).

La onda E fue dominante en esta configuración de flujo con una altura máxima de $0.86h_B$ y su localización en dentro de la cámara altera el patrón de flujo y podría llegar a comprometer la capacidad de la cámara. Por otro lado la caída del Lateral 2 de 0.12 m, previno que se pasara el caudal para la tubería pues el nivel de flujo no alcanzaba la entrada de la tubería; sin embargo esto afectó las características que la onda A2, pues junto a esta se formaba un remolino y en ese canal en U se generó una zona de desaceleración, donde se podría estancar el flujo y almacenar caudal (ver Figura 13d). El riesgo principal riesgo de las zonas de desaceleración es la generación de gases tóxicos y corrosivos dentro de las estructuras de la red que podrían provocar daños en el sistema.

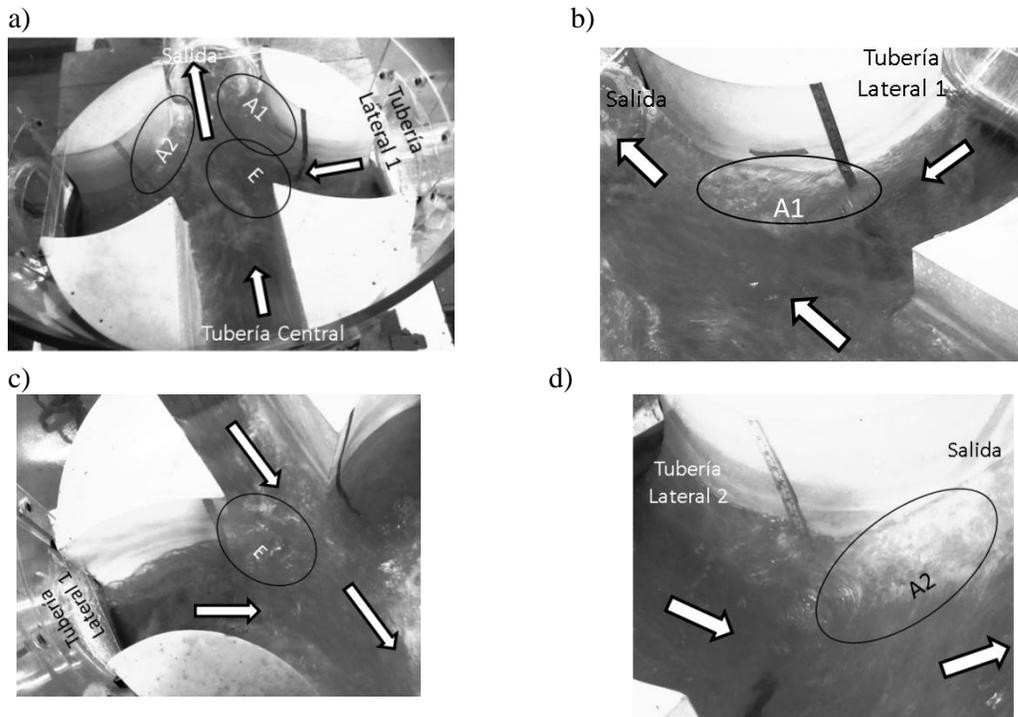


Figura 13. Unión de Flujos en cámara de acrílico a) patrón general de Ondas tipo A1, A2 y E, b) detalle Onda A1 c) acercamiento Onda E, d) detalle Onda A2.

Unión de Flujos II

La unión de dos flujos laterales y uno central recrea una situación en la que la red de alcantarillado recolecta las aguas residuales a través de diferentes tuberías; esta configuración generó cuatro tipos de onda: A1, A2, E1 y E2 (Figura 14a). Las ondas A1 y A2 son una respuesta al impacto del flujo por el canal central con el final de los canales laterales, mientras que las ondas E1 y E2 son una respuesta a la unión de los flujos en diferentes direcciones (ver Figura 14b y Figura 14c).

En los registros fotográficos se puede apreciar cómo los bordes agudos favorecen la aireación de las ondas superficiales, pues el patrón de flujo dentro de la cámara se observa muy turbulento. El anterior efecto es indeseable en las estructuras de unión pues el nivel de flujo en la cámara se hace más difícil de determinar y controlar, favoreciendo la sobrecarga de las tuberías de entrada. Por lo que la principal recomendación para la fabricación de cámaras de unión de flujo supercrítico, es que la geometría sea lo suficientemente suave como para que el flujo sea lo menos alterado posible.

En general, la onda E1 fue la onda dominante con una altura máxima de $0.96h_B$, por lo que esta onda y la confluencia de caudales en las tres entradas, favorecieron la formación de un resalto hidráulico que alcanzó una longitud de 4 m aguas arriba de la entrada de la tubería central. Por esta razón, las ondas tipo E son muy relevantes en el momento de plantear un diseño de la estructura de unión, pues son las que tienen consecuencias sobre las condiciones de flujo en las tuberías de entrada.

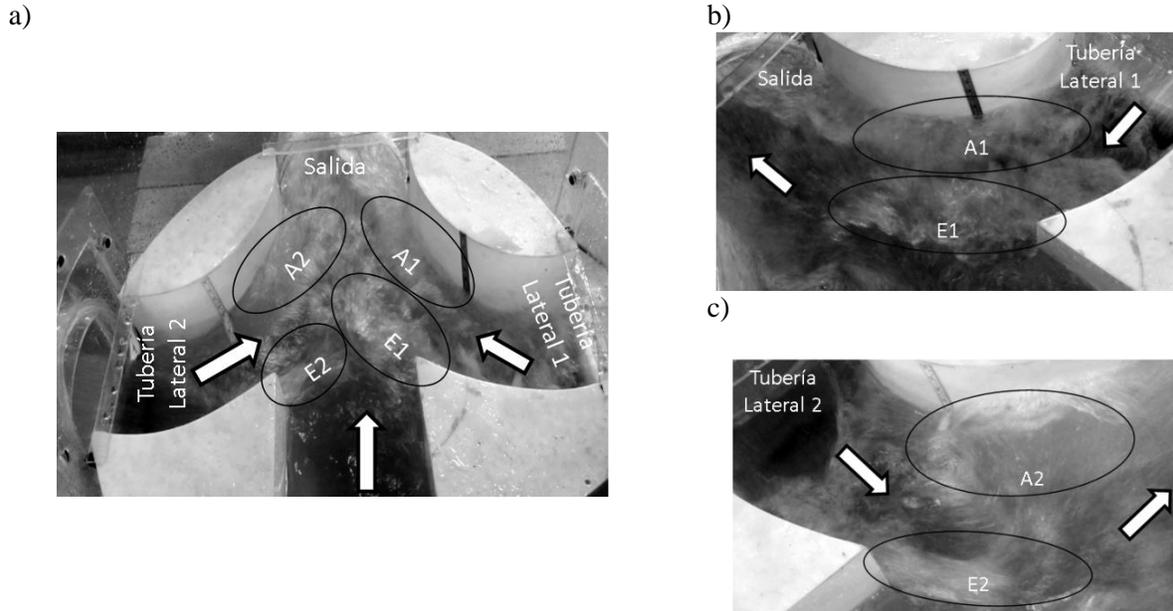


Figura 14. Unión de Flujos II en cámara de acrílico a) patrón de Ondas A1, A2, E1 y E2, b) detalle A1 y E1, c) detalle A2 y E2.

6.2.2 Análisis de Ondas

6.2.2.1 Análisis estadístico

Con el objetivo de encontrar ecuaciones que permitieran identificar la correlación entre la altura máxima de las ondas (h_{max}), la relación de llenado (Y) y el número de Froude (F) se realizaron una serie de regresiones multivariadas utilizando el software Minitab®, cuya variable dependiente fuera la altura máxima de las ondas dominantes en cada una de las pruebas realizadas:

- Altura máxima de onda tipo A
$$h_{maxA} = \frac{h_A}{h_B} \quad (1)$$

- Altura máxima de onda tipo C
$$h_{maxC} = \frac{h_C}{h_B} \quad (2)$$

- Altura máxima de onda tipo E
$$h_{maxE} = \frac{h_E}{h_B} \quad (3)$$

- Altura máxima de onda tipo E1
$$h_{maxE1} = \frac{h_{E1}}{h_B} \quad (4)$$

La Tabla 8 muestra los resultados obtenidos para cada una de las pruebas. En la primera columna aparece el nombre de la onda dominante y el tipo de prueba. La segunda columna muestra la ecuación obtenida. En la tercera columna se muestran los coeficientes de correlación correspondientes a cada ecuación.

Los coeficientes de correlación de las ecuaciones obtenidas son mayores a 0.8, es decir, las ecuaciones describen en una gran proporción la variación de los datos obtenidos en el laboratorio. Es importante resaltar que la forma y los exponentes de las ecuaciones que describen las ondas A, C y E, correspondientes a Flujo Directo, Flujo Lateral y Unión de Flujos I respectivamente en la cámara de acrílico y polietileno son muy similares.

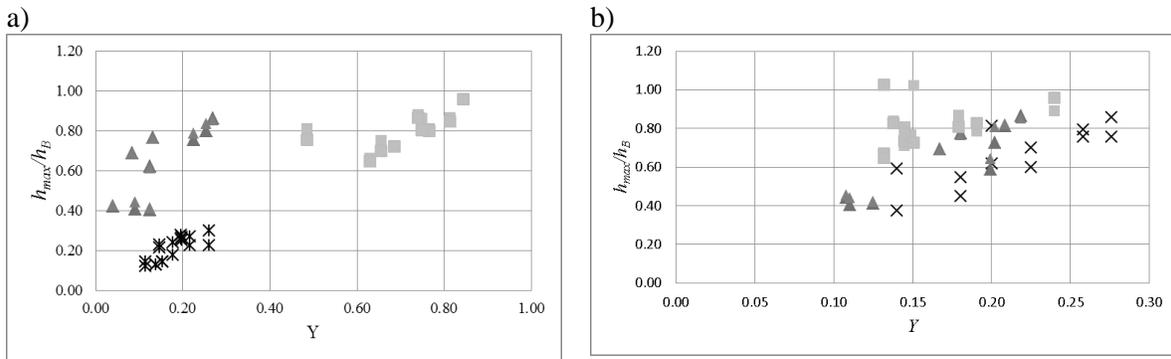
Tabla 8. Resultados estadísticos sobre la altura máxima de las ondas superficiales en la cámara de acrílico

Tipo de Onda	Ecuación	R ²
	$h_{maxA} = 0.280 * Y_C^{0.068} * F_C^{0.576}$	73.23%
	$h_{maxC} = 2.18 * Y_{L1}^{0.671} * F_{L1}^{0.438}$	80.91%
	$h_{maxE} = 0.850 * \frac{Y_C^{0.333} * Y_{L1}^{0.276}}{F_C^{1.947}}$	89.40%
	$h_{maxE-II} = 0.1267 * \frac{Y_{L2}^{0.733}}{F_{L2}^{3.17} * F_C^{1.77} * Y_C^{0.615}}$	90.96%

En cuanto la correlación de la ecuación encontrada en E-II, se puede ver que mejoró considerablemente, lo que implica que la turbulencia generada por los bordes afecta el patrón de flujo y hace que la altura de la onda E1 sea mucho más variable con respecto a las variables independientes.

6.2.2.2 Análisis hidráulico

A fin de determinar la relación entre la relación de llenado de la tubería Central y la Lateral 1 y la altura máxima de las ondas dominantes, se graficaron las alturas máximas obtenidas de cada tipo de onda en las diferentes pruebas.



Gráfica 4. Relación entre h_{max}/h_B en función de Y en cámara de Acrílico (a) Central (b) Lateral 1. (*) Q_1 , (x) Q_2 , (▲) Q_1-Q_2 , (■) $Q_1-Q_2-Q_3$.

6.2.2.3 Análisis de la curva de remanso

La principal ventaja de haber construido tuberías de entrada en acrílico fue que se podían apreciar los cambios entre el flujo de entrada y el flujo de salida, los pasos de caudal a tuberías que no se estaban operando y la formación de resaltos hidráulicos en tuberías (Figura 15a). Asimismo, era posible observar de manera inmediata si había curvas de remanso que afectaran la tubería central por ser la de menor pendiente (ver Figura 15b).

Los resaltos hidráulicos se presentaban en la Unión de Flujos I y II cuando la tubería lateral era el conducto hidráulicamente dominante. Mientras que la curva de remanso se presentaba cuando el flujo entraba por las tuberías laterales.

Para analizar los anteriores resultados hidráulicos se graficaron los perfiles axiales de flujo de la tubería Central para las diferentes pruebas (ver Gráfica 5a y Gráfica 5b).

Al comparar los perfiles axiales de nivel de la cámara de acrílico con los de la cámara de polietileno se evidencia el incremento en la capacidad de almacenamiento de caudal de la cámara con caída, pues las longitudes del perfil de la curva de remanso disminuyeron aproximadamente 2 m.

En aras a complementar el análisis de la curva de remanso se graficó la relación entre la altura relativa de la curva de remanso $Y_i = (h_i - h_0)/h_i$ como función del número de Froude aguas arriba (F_1). Se puede observar cómo para un rango de Froude entre 0.75 y 1, la altura relativa de la curva de remanso es considerablemente mayor para la Unión de Flujos II, con respecto a Unión de Flujos I (ver Gráfica 6).

La gran diferencia de Y_i se debe a la caída que afecta el patrón de flujo dentro de la cámara y aumenta su capacidad de almacenamiento. No obstante, en ambas series de datos se observa una relación parabólica entre los parámetros que contrasta con la relación entre cuadrática entre alturas subsecuentes de un resalto hidráulico en un canal rectangular.

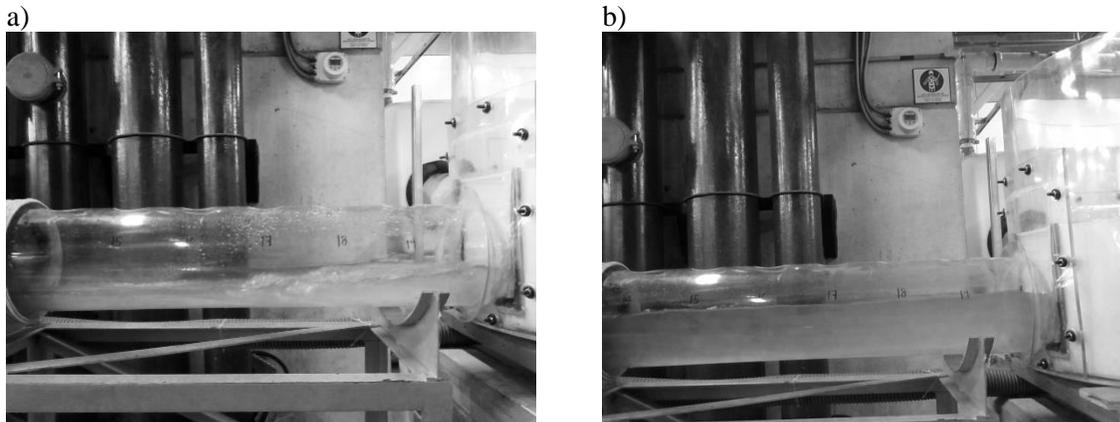
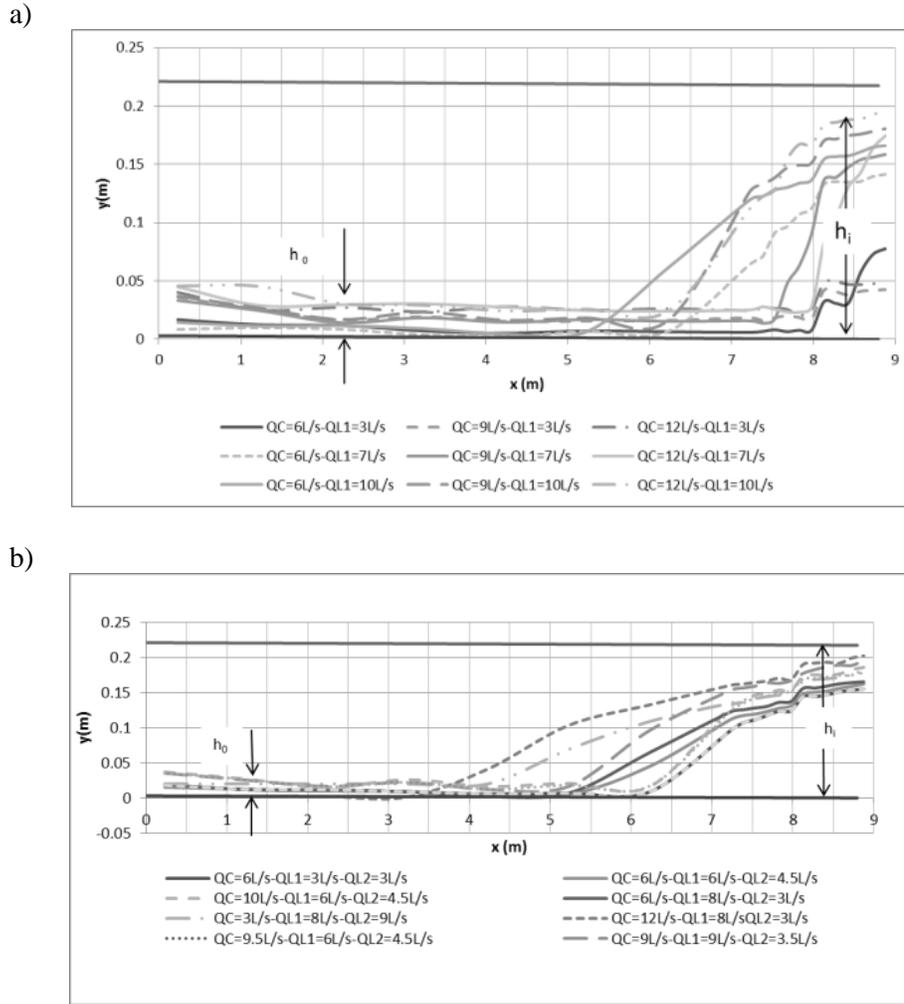
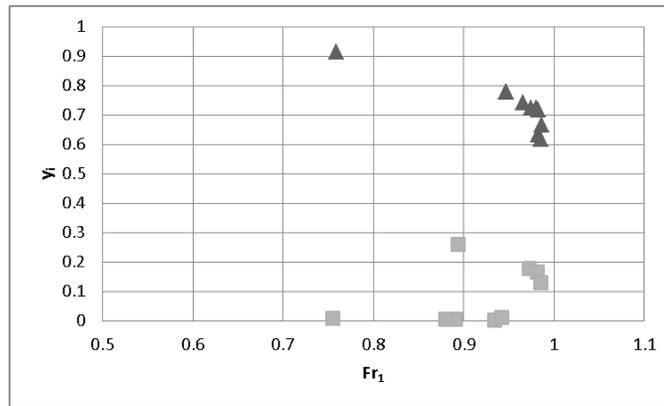


Figura 15. Efectos de las ondas superficiales sobre la tubería central y/o de menor pendiente a) Resalto Hidráulico, b) Curva de Remanso.



Gráfica 5. Perfiles axiales de nivel en cámara de Acrílico para la tubería Central (a) Q_{L1} - Q_C (b) Q_{L1} - Q_C - Q_{L2} .



Gráfica 6. Altura relativa de la curva de remanso en función de F_1 (\blacksquare) Q_{L1} - Q_C , (\blacktriangle) Q_{L1} - Q_C - Q_{L2} .

7. Conclusiones

Modelo Cámara de Polietileno

En conclusión, la presencia de ondas superficiales en las cámaras de unión bajo flujo supercrítico es inevitable, pues se observaron en todas las configuraciones de flujo. Las ondas tipo A son características del Flujo Directo y no representan ningún tipo de riesgo para la eficiencia de la estructura de unión. Las ondas tipo C son típicas de un cambio de dirección en el flujo de entrada; sin embargo no son dominantes cuando se presenta la unión de flujos. 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 y resaltos hidráulicos, cuyas profundidades relativas pueden llegar a sobrecargar la tubería de menor pendiente.

Asimismo, para evitar que se disminuya la eficiencia hidráulica de la cámara por la formación de ondas se recomienda que las estructuras de unión tengan cañuelas con paredes más altas que los diámetros de las tuberías de entrada. Por otro lado, se puede concluir que la altura máxima de las ondas varía linealmente con respecto a la relación de llenado del conducto de entrada cuando en la cámara no ocurren uniones de tres caudales de entrada.

En cuanto a la capacidad máxima de la cámara de polietileno, se determinó que el caudal de entrada total que puede ingresar por diferentes entradas es 14 L/s. De lo contrario es posible que se sobrecargue la tubería de menor pendiente.

Modelo Cámara de Acrílico

En conclusión, en una cámara de unión de dos flujos laterales y uno central, con caídas se aumenta la capacidad de almacenamiento de la estructura de unión de caudal. Lo anterior, implica una reducción de la longitud de la curva de remanso respecto a una sin caídas, por lo que las condiciones de flujo supercrítico en los conductos de entrada se mantienen hasta que llegan inmediatamente aguas arriba de la cámara.

Otra conclusión de las cámaras con caída es que, a pesar de que la capacidad de almacenamiento de volumen de caudal aumenta, se observaron zonas muertas o de desaceleración del flujo que podrían tener consecuencias indeseables en cuanto a generación de gases tóxicos característicos de las aguas residuales.

En lo que respecta a la capacidad máxima de la cámara de acrílico, se puede determinar que una cámara con 0.85 m de diámetro no puede recibir descargas por las tres entradas mayores a 23 L/s. De manera que la capacidad hidráulica de estas estructuras se debe determinar con la suma de los caudales de entrada, pues cuando ocurre flujo directo las ondas que se forman no comprometen la eficiencia de la estructura.

8. Recomendaciones

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. Sin embargo se recomienda 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 continuar probando diferentes caídas en la cámara de acrílico para caracterizar mejor el efecto de las entradas elevadas. Adicionalmente se pueden realizar pruebas con cámara de dos entradas y cañuela completa para comprobar el efecto del número de entradas en la cámara. 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.

Finalmente, se corroboró que es indispensable que las paredes de los canales en forma de U sean más altas que los diámetros de las tuberías de entrada a fin de mantener un flujo continuo, con baja aireación y turbulencia que puedan llegar a aumentar el nivel del flujo dentro de la cámara y eventualmente sobrecargar la tubería.

9. Bibliografía

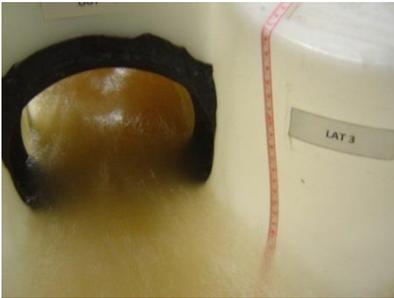
- Bridge S, 1984. A study of unsteady flow wave attenuation in partially filled pipe networks. A thesis submitted for the degree of Doctor Philosophy. Department of Mechanical Engineering, Brunel University, 104-199.
- Del Giudice, G., Hager, W.H. (2001). Supercritical flow in 45° junction manhole. *J. 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.
- Gissoni, C., Hager, W.H. (2002). Supercritical flow in manholes with a bend extension. *Exp. Fluids* 32(3), 357–365.
- Gissoni, 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.
- Vischer, D.L., Hager, W.H. (1998). *Dam hydraulics*. Wiley, Chichester.
- Zhao, C., Zhu, D., Rajaratnam, N. (2004). Supercritical sewer flows at a combining junction: A model study of the Edworthy Trunk Junction, Calgary, Alberta. *J. Envir. Eng. Science* 3(5), 343–353.
- Ministerio de Vivienda y Desarrollo Territorial, República de Colombia (MVDT). Reglamento de Agua y Saneamiento Básico, Título D. (2011)

10. Anexo I-Caudales mínimos y máximos

10.1 Caudales mínimos probados Cámara de Polietileno

Tabla 9. Resultados obtenidos con el caudal mínimo probado por la tubería Central para Flujo Directo (polietileno).

180° Prueba 1: Q= 10 L/s															
Parámetros															
TUBERÍA	DIÁMETRO [m]	L [m]	PENDIENTE	Q [m ³ /s]	Yn [m]	Y/D	θ [Rad]	A [m ²]	D [m]	R	v [m/s]	Q [m ³ /s]	No. de Froude	Tipo de Flujo	
PRINCIPAL	0.182	8.880	0.010	0.010	0.055	30.3%	2.334	0.007	0.040	0.031	1.196	0.008	1.913	Supercrítico	
SALIDA	0.182	0.300	0.007	0.010	0.062	34.0%	2.489	0.008	0.045	0.034	1.049	0.008	1.575	Supercrítico	

Comportamiento Hidráulico	
<p>Onda formada en la línea izquierda</p> 	<p>Onda formada en la línea derecha</p> 

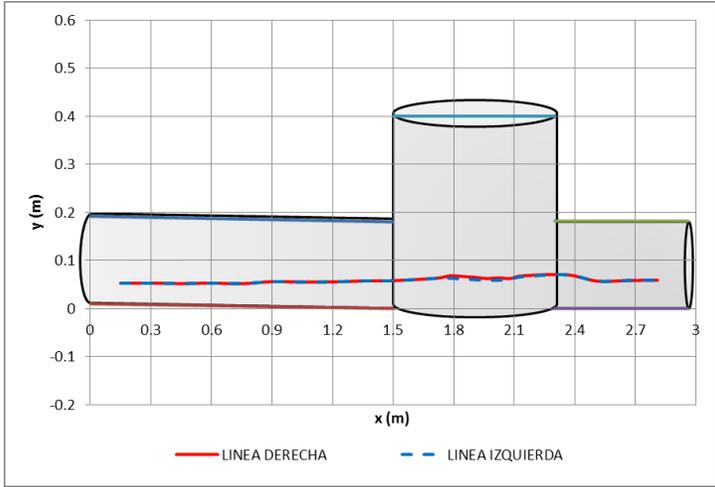
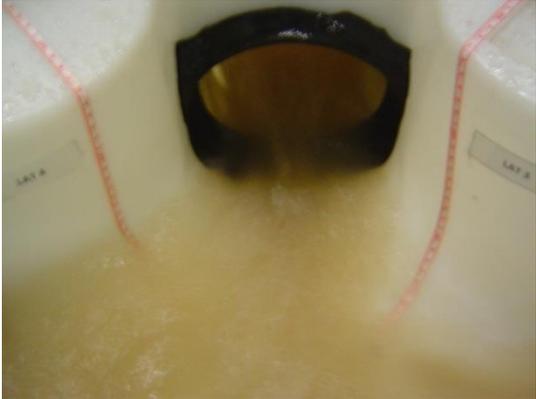
Perfil de flujo


Tabla 10. Resultados obtenidos con el caudal mínimo probado por la tubería Lateral 1 para Flujo Lateral (polietileno).

F.90° Prueba 1: Q= 3 L/s															
Parámetros															
TUBERÍA	DIÁMETRO [m]	L [m]	PENDIENTE	Q [m ³ /s]	Yn [m]	V/D	θ [Rad]	A [m ²]	D [m]	R	v [m/s]	Q [m ³ /s]	No. de Froude	Tipo de Flujo	
PRINCIPAL	0.182	8.880	0.010	0.010	0.055	30.3%	2.334	0.007	0.040	0.031	1.196	0.008	1.913	Supercrítico	
SALIDA	0.182	0.300	0.007	0.010	0.062	34.0%	2.489	0.008	0.045	0.034	1.049	0.008	1.575	Supercrítico	

Comportamiento Hidráulico	
Onda formada en la línea izquierda	Onda formada en la línea derecha
	

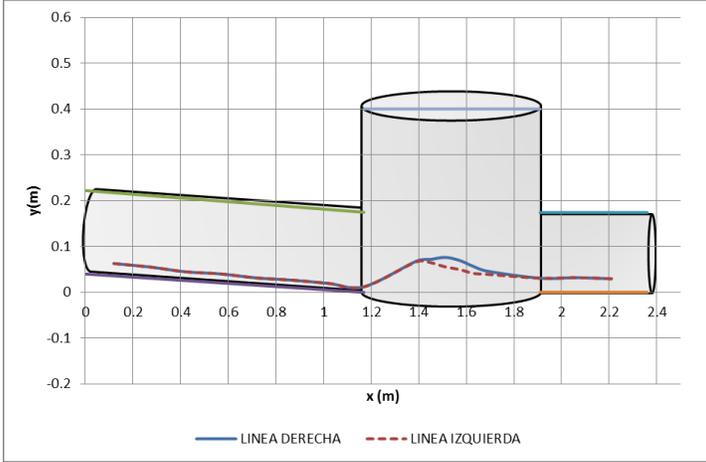
Perfil de flujo


Tabla 11. Resultados obtenidos con el caudal mínimo probado por la tubería Central y Lateral 1 para Unión de Flujo (polietileno).

<i>Flujo 90° Q= 1.5 L/s y Flujo 180° Q= 6 L/s</i>														
<i>Parámetros</i>														
TUBERÍA	DIÁMETRO [m]	L [mt]	PENDIENTE	Q [m ³ /s]	Yn [m]	Y/D	θ [Rad]	A [m ²]	D [m]	R	v [m/s]	Q [m ³ /s]	No. de Froude	Tipo de Flujo
PRINCIPAL	0.182	8.800	0.01	0.006	0.072	39.3%	2.711	0.009	0.053	0.038	1.377	0.013	1.903	Supercrítico
LATERAL 1	0.182	1.17	0.04	0.0015	0.038	21.1%	1.909	0.004	0.027	0.023	2.110	0.008	4.105	Hipercrítico
SALIDA	0.182	0.300	0.007	0.008	0.056	31.0%	2.363	0.007	0.041	0.032	0.998	0.007	1.577	Supercrítico

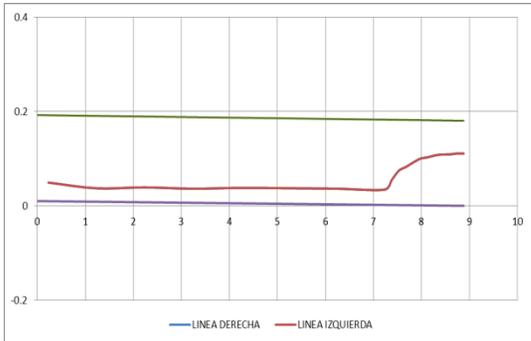
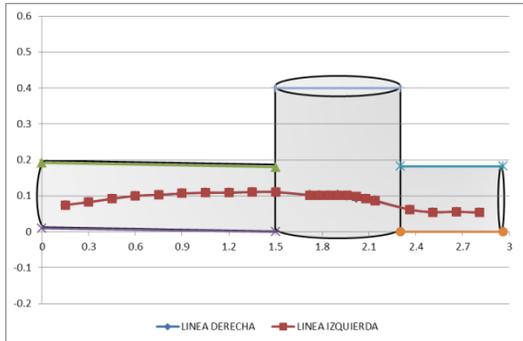
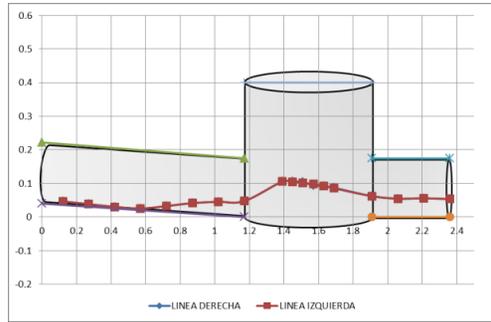
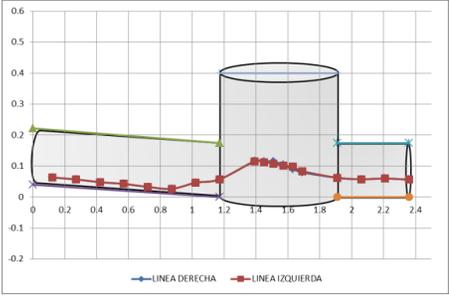
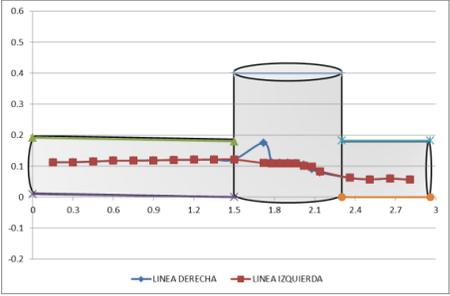
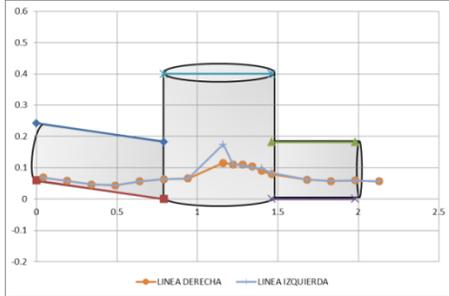
<i>Comportamiento Hidráulico</i>		
<p>Onda formada en la línea izquierda</p> 		<p>Onda formada en la línea derecha</p> 
<p>Perfil de Flujo 180° - Tubería entrada</p> 	<p>Perfil de Flujo 180° - Cámara</p> 	<p>Perfil de Flujo 90°</p> 

Tabla 12. Resultados obtenidos con el caudal mínimo probado por la tubería Central, Lateral 1 y Lateral 2 para Unión de Flujo II (polietileno).

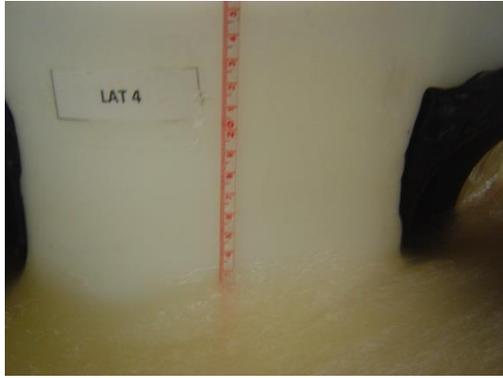
<i>Flujo 90° Q=3.0 L/s , Flujo 180° Q= 3.0 L/s y Flujo 270° Q=1.5 L/s</i>														
<i>Parámetros</i>														
TUBERÍA	DIÁMETRO [m]	LONGITUD [m]	PENDIENTE	Q [m ³ /s]	Yn [m]	Y/D	θ [Rad]	A [m ²]	D [m]	R	v [m/s]	Q [m ³ /s]	No. de Froude	Tipo de Flujo
PRINCIPAL	0.182	8.800	0.01	0.003	0.118	64.8%	3.741	0.018	0.102	0.052	2.363	0.042	2.357	Supercrítico
LATERAL 1	0.182	1.17	0.04	0.003	0.047	25.7%	2.128	0.005	0.033	0.027	3.251	0.017	5.688	Hipercrítico
LATERAL 2	0.182	0.94	0.06	0.0015	0.058	31.7%	2.392	0.007	0.042	0.033	4.401	0.031	6.872	Hipercrítico
SALIDA	0.182	0.300	0.007	0.008	0.059	32.5%	2.426	0.007	0.043	0.033	1.521	0.011	2.342	Supercrítico

<i>Comportamiento Hidráulico</i>		
<p>Onda formada en la línea izquierda</p> 		<p>Onda formada en la línea derecha</p> 
<p>Perfil de Flujo 90°</p> 	<p>Perfil de Flujo 180°</p> 	<p>Perfil de Flujo 270°</p> 

10.2 Caudales máximos probados Cámara de Polietileno

Tabla 13. Resultados obtenidos con el caudal máximo probado por la tubería Central para Flujo Directo (polietileno).

<i>Flujo 180°: Q= 19 L/s</i>															
<i>Parámetros</i>															
TUBERÍA	DIÁMETRO [m]	LONGITUD [mt]	PENDIENTE	Q [m ³ /s]	Yn [m]	Y/D	θ [Rad]	A [m ²]	D [m]	R	v [m/s]	Q [m ³ /s]	No. de Froude	Tipo de Flujo	
PRINCIPAL	0.182	8.880	0.010	0.019	0.086	47.4%	3.036	0.012	0.067	0.044	1.495	0.018	1.847	Supercrítico	
SALIDA	0.182	0.300	0.007	0.019	0.091	50.2%	3.150	0.013	0.072	0.046	1.265	0.017	1.507	Supercrítico	

<i>Comportamiento Hidráulico</i>	
Onda formada en la línea izquierda	Onda formada en la línea derecha
	

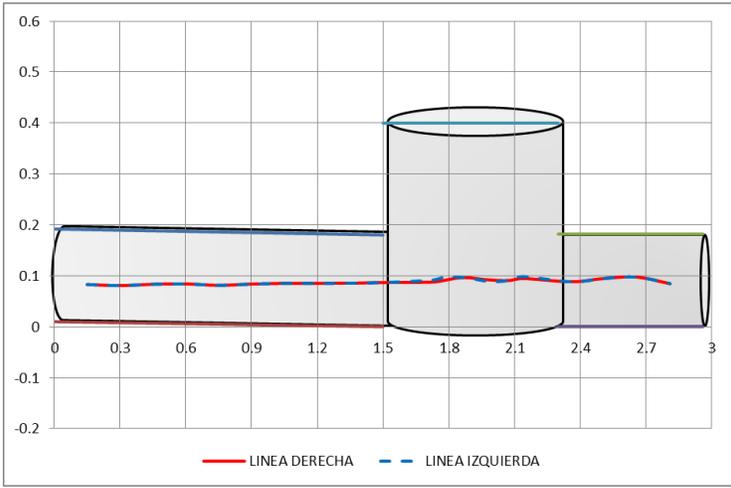
Perfil de flujo


Tabla 14. Resultados obtenidos con el caudal máximo probado por la tubería Lateral 1 para Flujo Lateral (polietileno).

<i>Flujo 90°: Q= 5 L/s</i>														
<i>Parámetros</i>														
TUBERÍA	DIÁMETRO [m]	LONGITUD [m]	PENDIENTE	Q [m³/s]	Yn [m]	Y/D	θ [Rad]	A [m²]	D [m]	R	v [m/s]	Q [m³/s]	No. de Froude	Tipo de Flujo
PRINCIPAL	0.182	1.170	0.040	0.005	0.048	26.2%	2.149	0.005	0.034	0.028	2.388	0.013	4.140	Hipercrítico
SALIDA	0.182	0.300	0.007	0.005	0.042	23.2%	2.009	0.005	0.030	0.025	0.845	0.004	1.564	Supercrítico

<i>Comportamiento Hidráulico</i>	
Onda formada en la línea izquierda	Onda formada en la línea derecha
	

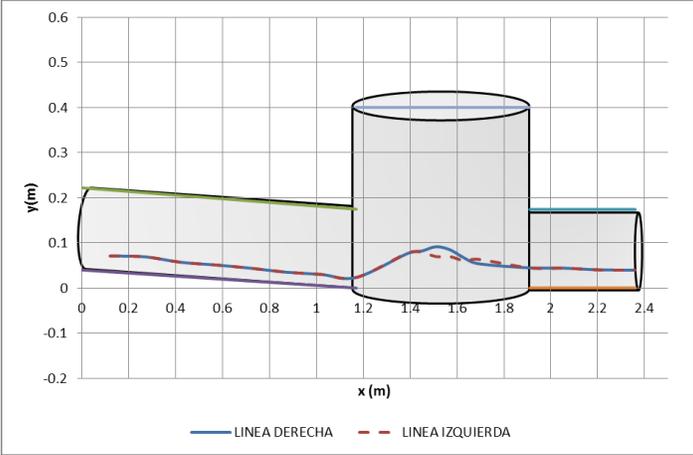
Perfil de flujo


Tabla 15. Resultados obtenidos con el caudal máximo probado por la tubería Central y la Lateral 1 para Unión de Flujos (polietileno).

Flujo 90° Q=2 L/s y Flujo 180° Q= 9 L/s														
Parámetros														
TUBERÍA	DIÁMETRO [m]	L [mt]	PENDIENTE	Q [m ³ /s]	Yn [m]	Y/D	θ [Rad]	A [m ²]	D [m]	R	v [m/s]	Q [m ³ /s]	No. de Froude	Tipo de Flujo
PRINCIPAL	0.182	8.800	0.01	0.009	0.090	49.6%	3.124	0.013	0.071	0.045	1.533	0.020	1.841	Supercrítico
LATERAL 1	0.182	1.17	0.04	0.002	0.067	36.6%	2.598	0.009	0.049	0.036	2.855	0.025	4.112	Hipercrítico
SALIDA	0.182	0.300	0.007	0.011	0.072	39.7%	2.725	0.010	0.054	0.039	1.135	0.011	1.560	Supercrítico

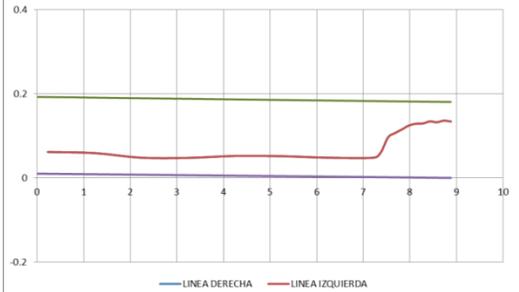
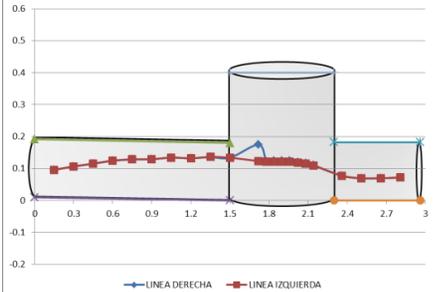
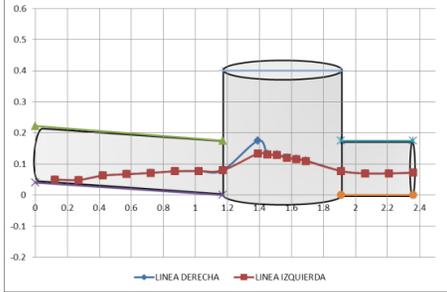
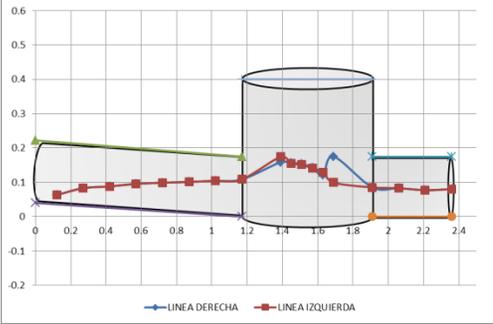
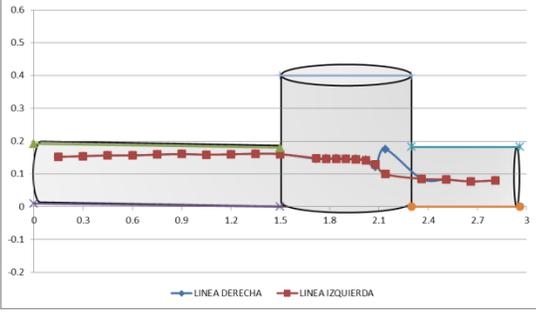
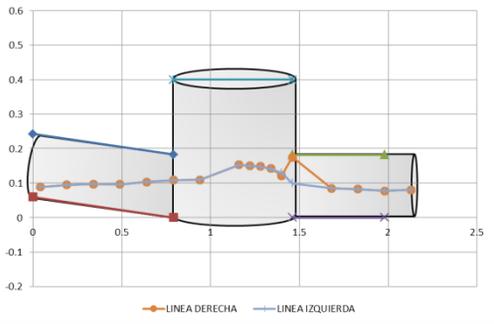
Comportamiento Hidráulico		
Onda formada en la línea izquierda 		Onda formada en la línea derecha 
Perfil de Flujo 180°-Tubería entrada 	Perfil de Flujo 180°-Cámara 	Perfil de Flujo 90° 

Tabla 16. Resultados obtenidos con el caudal máximo probado por la tubería Central, Lateral 1 y Lateral 2 para Unión de Flujos II (polietileno).

<i>Flujo 90° Q=3.6 L/s , Flujo 180° Q=8.6 L/s y Flujo 270° Q=1.8 L/s</i>														
<i>Parámetros</i>														
TUBERÍA	DIÁMETRO [m]	LONGITUD [m]	PENDIENTE	Q [m ³ /s]	Yn [m]	Y/D	Θ [Rad]	A [m ²]	D [m]	R	v [m/s]	Q [m ³ /s]	No. de Froude	Tipo de Flujo
PRINCIPAL	0.182	8.800	0.01	0.0086	0.158	86.8%	4.796	0.024	0.195	0.055	2.429	0.058	1.758	Supercrítico
LATERAL 1	0.182	1.17	0.04	0.0036	0.093	51.0%	3.180	0.013	0.073	0.046	4.390	0.058	5.179	Hipercrítico
LATERAL 2	0.182	0.94	0.06	0.0018	0.100	54.8%	3.335	0.015	0.081	0.048	5.514	0.081	6.200	Hipercrítico
SALIDA	0.182	0.300	0.007	0.0140	0.081	44.7%	2.929	0.011	0.062	0.042	1.747	0.020	2.236	Supercrítico

<i>Comportamiento Hidráulico</i>		
Onda formada en la línea izquierda 		Onda formada en la línea derecha 
Perfil de Flujo 90° 	Perfil de Flujo 180° 	Perfil de Flujo 270° 

10.3 Caudales mínimos probados Cámara de Acrílico

Tabla 17. Resultados obtenidos con el caudal mínimo probado por la tubería Central para Flujo Directo (Acrílico).

Flujo 180°: Q= 9 L/s														
Parámetros														
TUBERÍA	DIÁMETRO [m]	L [mt]	PENDIENTE	Q [m ³ /s]	Yn [m]	Y/D	θ [Rad]	A [m ²]	D [m]	R	v [m/s]	Q [m ³ /s]	No. de Froude	Tipo de Flujo
PRINCIPAL	0.218	8.880	0.003	0.0090	0.025	11.4%	1.377	0.002	0.017	0.016	0.380	0.001	0.932	Transicional
SALIDA	0.262	0.600	0.005	0.0090	0.060	23.0%	1.999	0.009	0.042	0.036	0.891	0.008	1.382	Supercrítico

Comportamiento Hidráulico	
<p>Patrón de ondas</p> 	<p>Ondas Tipo A</p> 

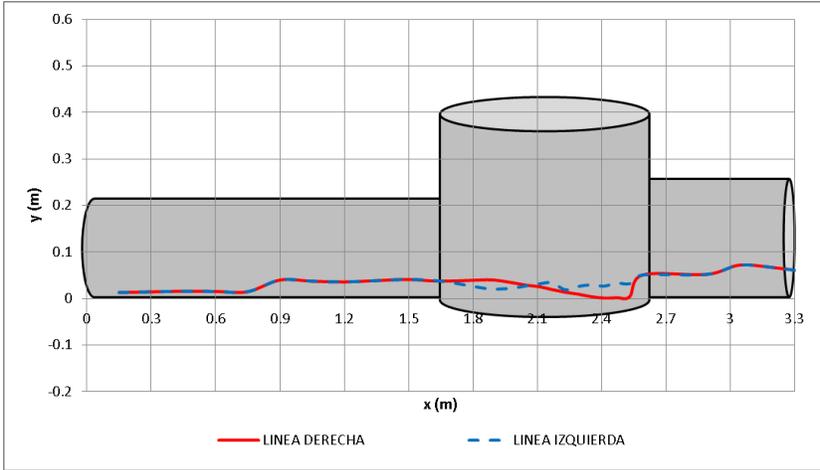
Perfil de flujo	
	

Tabla 18. Resultados obtenidos con el caudal mínimo probado por la tubería Lateral 1 para Flujo Lateral (Acrílico).

<i>Flujo 90°: Q= 6.5 L/s</i>														
<i>Parámetros</i>														
TUBERÍA	DIÁMETRO [m]	L [mt]	PENDIENTE	Q [m ³ /s]	Y _n [m]	Y/D	θ [Rad]	A [m ²]	D [m]	R	v [m/s]	Q [m ³ /s]	No. de Froude	Tipo de Flujo
PRINCIPAL	0.218	1.050	0.124	0.0065	0.031	14.0%	1.534	0.003	0.021	0.019	3.474	0.011	7.654	Hipercrítico
SALIDA	0.262	0.600	0.005	0.0065	0.091	34.7%	2.518	0.017	0.067	0.050	1.121	0.019	1.387	Transicional

<i>Comportamiento Hidráulico</i>		
Onda formada en la línea izquierda 	Patrón de Ondas 	Onda formada en la línea derecha 

Perfil de flujo

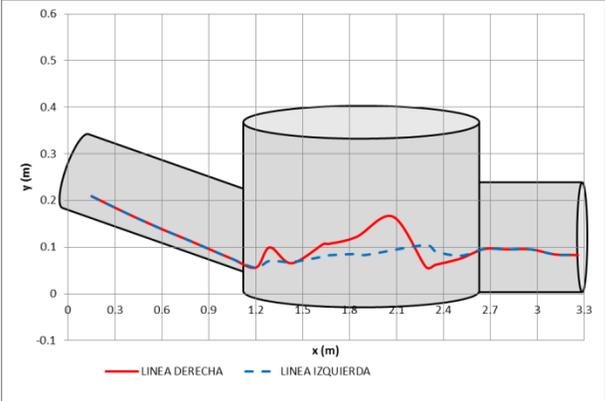


Tabla 19. Resultados obtenidos con el caudal mínimo probado por la tubería Lateral 2 para Flujo Lateral (Acrílico).

<i>Flujo 270°: Q= 3 L/s</i>														
<i>Parámetros</i>														
TUBERÍA	DIÁMETRO [m]	L [mt]	PENDIENTE	Q [m ³ /s]	Yn [m]	Y/D	θ [Rad]	A [m ²]	D [m]	R	v [m/s]	Q [m ³ /s]	No. de Froude	Tipo de Flujo
PRINCIPAL	0.218	0.750	0.108	0.0030	0.006	2.5%	0.640	0.000	0.004	0.004	1.035	0.000	5.428	Hipercrítico
SALIDA	0.262	0.600	0.005	0.0030	0.052	19.7%	1.839	0.008	0.036	0.031	0.813	0.006	1.368	Transicional

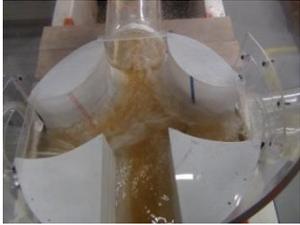
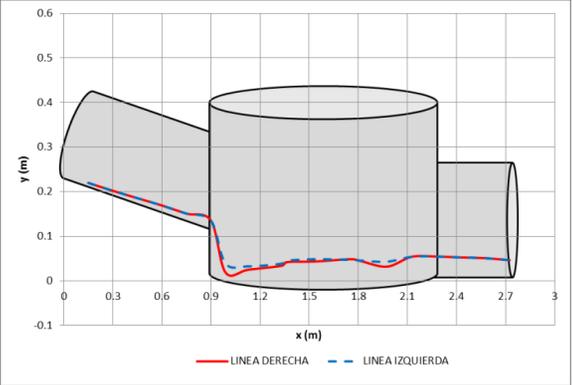
<i>Comportamiento Hidráulico</i>		
Onda formada en la línea izquierda 	Patrón de ondas 	Onda formada en la línea derecha 
Perfil de flujo 		

Tabla 20. Resultados obtenidos con el caudal mínimo probado por la tubería Central y Lateral 1 para Unión de Flujo (Acrílico).

<i>Flujo 90° Q= 3 L/s y Flujo 180° Q= 6 L/s</i>														
<i>Parámetros</i>														
TUBERÍA	DIÁMETRO [m]	L [mt]	PENDIENTE	Q [m ³ /s]	Yn [m]	Y/D	θ [Rad]	A [m ²]	D [m]	R	v [m/s]	Q [m ³ /s]	No. de Froude	Tipo de Flujo
PRINCIPAL	0.218	8.650	0.003	0.0060	0.009	4.0%	0.807	0.001	0.006	0.006	0.182	0.000	0.757	Transicional
LATERAL 1	0.218	1.050	0.128	0.0030	0.024	11.0%	1.353	0.002	0.016	0.015	0.372	0.001	0.927	Transicional
SALIDA	0.262	0.600	0.005	0.0090	0.121	46.1%	2.987	0.024	0.093	0.062	1.288	0.031	1.348	Transicional

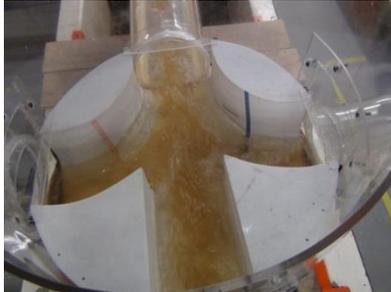
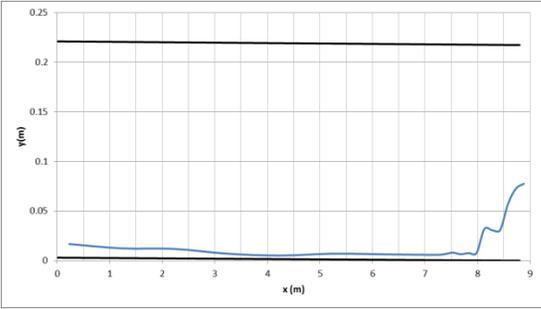
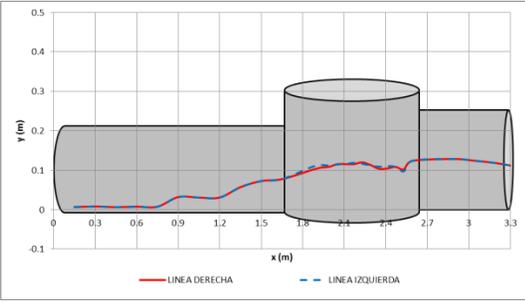
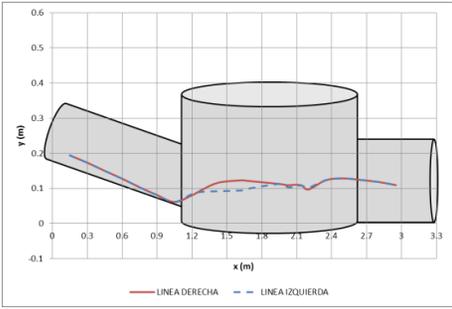
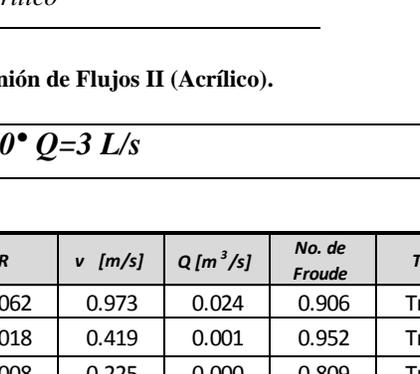
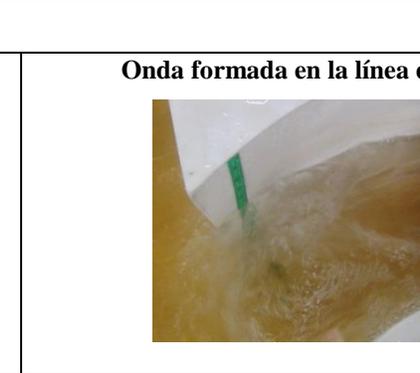
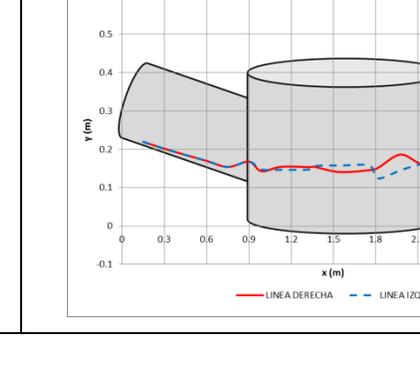
<i>Comportamiento Hidráulico</i>		
Onda formada en la línea izquierda 		Onda formada en la línea derecha 
Perfil de Flujo 180°-Tubería entrada 	Perfil de Flujo 180°-Cámara 	Perfil de Flujo 90° 

Tabla 21. Resultados obtenidos con el caudal mínimo probado por la tubería Central, Lateral 1 y Lateral 2 para Unión de Flujos II (Acrílico).

<i>Flujo 90° Q=6.0 L/s , Flujo 180° Q= 6.0 L/s y Flujo 270° Q=3 L/s</i>															
<i>Parámetros</i>															
TUBERÍA	DIÁMETRO [m]	L [mt]	PENDIENTE	Q [m ³ /s]	Yn [m]	Y/D	θ [Rad]	A [m ²]	D [m]	R	v [m/s]	Q [m ³ /s]	No. de Froude	Tipo de Flujo	
PRINCIPAL	0.218	8.650	0.003	0.0060	0.137	62.9%	3.664	0.025	0.117	0.062	0.973	0.024	0.906	Transicional	
LATERAL 1	0.218	1.050	0.128	0.0060	0.029	13.2%	1.486	0.003	0.020	0.018	0.419	0.001	0.952	Transicional	
LATERAL 2	0.218	0.75	0.108	0.003	0.011677	5.4%	0.934	0.001	0.008	0.008	0.225	0.000	0.809	Transicional	
SALIDA	0.262	0.600	0.005	0.0120	0.158	60.3%	3.558	0.034	0.133	0.073	1.431	0.049	1.254	Transicional	

<i>Comportamiento Hidráulico</i>		
Onda formada en la línea izquierda		Onda formada en la línea derecha
Perfil de Flujo 90°	Perfil de Flujo 180°	Perfil de Flujo 270°
		

9.4 Caudales máximos probados Cámara de Acrílico

Tabla 22. Resultados obtenidos con el caudal máximo probado por la tubería Central para Flujo Directo (Acrílico).

<i>Flujo 180° Q= 22 L/s</i>														
<i>Parámetros</i>														
TUBERÍA	DIÁMETRO [m]	L [m]	PENDIENTE	Q [m ³ /s]	Yn [m]	Y/D	θ [Rad]	A [m ²]	D [m]	R	v [m/s]	Q [m ³ /s]	No. de Froude	Tipo de Flujo
PRINCIPAL	0.218	8.880	0.003	0.0220	0.068	31.1%	2.364	0.010	0.049	0.038	0.706	0.007	1.019	Transicional
SALIDA	0.262	0.600	0.005	0.0220	0.120	45.7%	2.970	0.024	0.092	0.062	1.283	0.031	1.350	Supercrítico

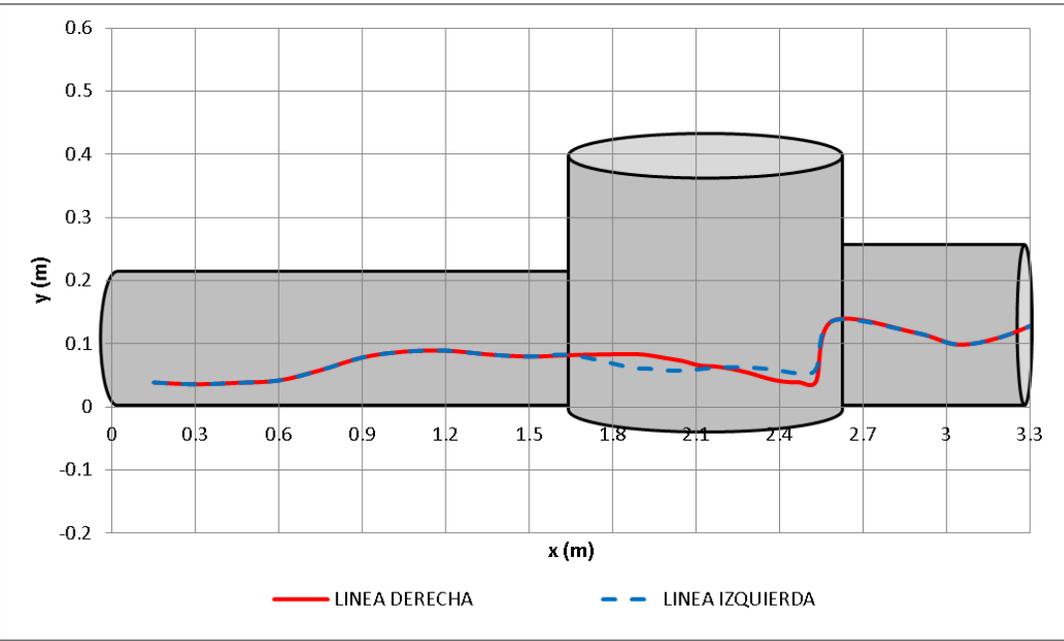
<i>Comportamiento Hidráulico</i>	
<p>Patrón de ondas en la cámara</p> 	<p>Ondas Tipo A</p> 
<p>Perfil de flujo</p> 	

Tabla 23. Resultados obtenidos con el caudal máximo probado por la tubería Lateral 1 para Flujo Lateral (Acrílico).

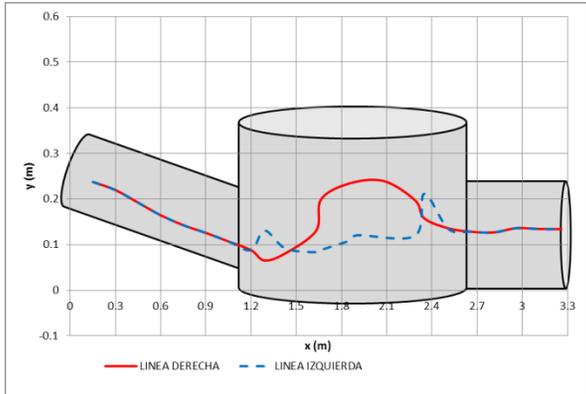
<i>Flujo 90°: Q= 14 L/s</i>														
<i>Parámetros</i>														
TUBERÍA	DIÁMETRO [m]	L [mt]	PENDIENTE	Q [m ³ /s]	Yn [m]	Y/D	θ [Rad]	A [m ²]	D [m]	R	v [m/s]	Q [m ³ /s]	No. de Froude	Tipo de Flujo
PRINCIPAL	0.218	1.050	0.124	0.0140	0.060	27.6%	2.213	0.008	0.043	0.035	5.150	0.043	7.926	Hipercrítico
SALIDA	0.262	0.600	0.005	0.0140	0.132	50.4%	3.156	0.027	0.104	0.066	1.337	0.036	1.325	Supercrítico
<i>Comportamiento Hidráulico</i>														
Onda formada en la línea izquierda			Patrón de Ondas						Onda formada en la línea derecha					
														
Perfil de flujo														
														

Tabla 24. Resultados obtenidos con el caudal máximo probado por la tubería Lateral 2 para Flujo Lateral (Acrílico).

<i>Flujo 270°: Q= 11.5 L/s</i>														
<i>Parámetros</i>														
TUBERÍA	DIÁMETRO [m]	L [mt]	PENDIENTE	Q [m ³ /s]	Yn [m]	Y/D	θ [Rad]	A [m ²]	D [m]	R	v [m/s]	Q [m ³ /s]	No. de Froude	Tipo de Flujo
PRINCIPAL	0.218	0.750	0.108	0.0115	0.043	19.6%	1.837	0.005	0.030	0.026	3.942	0.020	7.278	Hipercrítico
SALIDA	0.262	0.600	0.005	0.0115	0.124	47.5%	3.040	0.025	0.096	0.063	1.304	0.033	1.341	Transicional

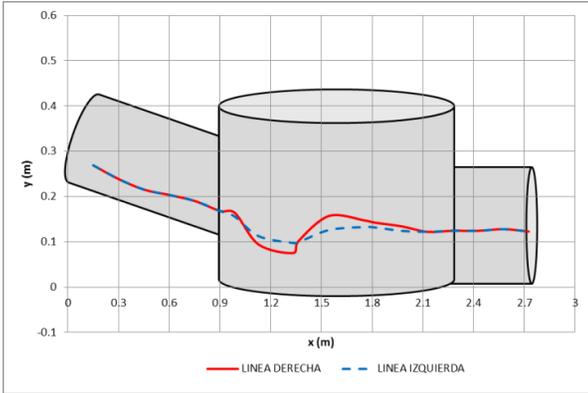
<i>Comportamiento Hidráulico</i>		
<p>Onda formada en la línea izquierda</p> 	<p>Patrón de Flujo</p> 	<p>Onda formada en la línea derecha</p> 
<p>Perfil de flujo</p> 		

Tabla 25. Resultados obtenidos con el caudal máximo probado por la tubería Central y Lateral 1 para Unión de Flujos (Acrílico).

<i>Flujo 90° Q= 10 L/s y Flujo 180° Q= 12 L/s</i>														
<i>Parámetros</i>														
TUBERÍA	DIÁMETRO [m]	L [mt]	PENDIENTE	Q [m ³ /s]	Yn [m]	Y/D	θ [Rad]	A [m ²]	D [m]	R	v [m/s]	Q [m ³ /s]	No. de Froude	Tipo de Flujo
PRINCIPAL	0.218	8.650	0.003	0.0120	0.059	27.0%	2.184	0.008	0.042	0.034	0.652	0.005	1.017	Transicional
LATERAL 1	0.218	0.900	0.128	0.0100	0.048	21.9%	1.947	0.006	0.034	0.028	0.576	0.003	1.006	Transicional
SALIDA	0.262	0.600	0.005	0.0220	0.191	72.8%	4.088	0.042	0.180	0.078	1.501	0.063	1.129	Transicional

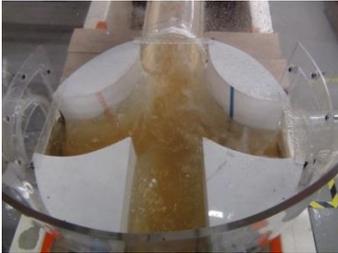
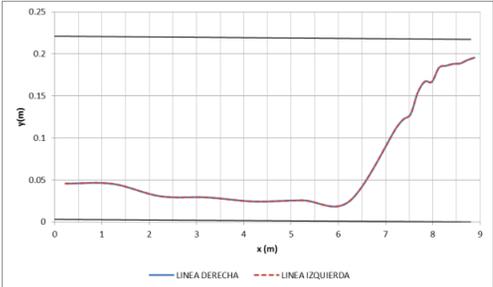
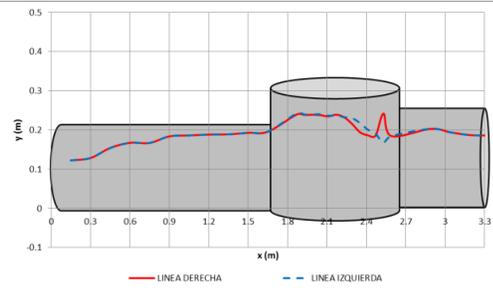
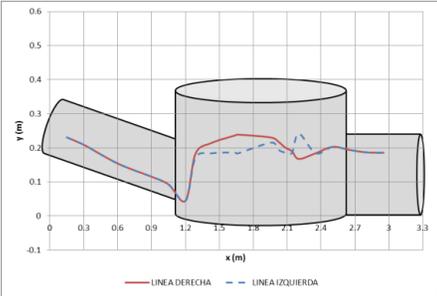
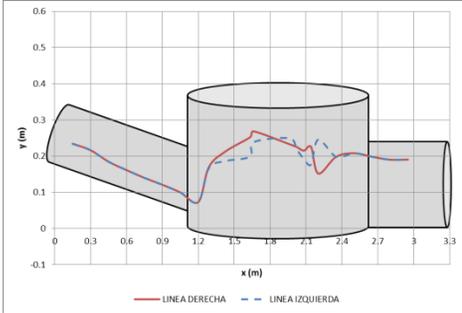
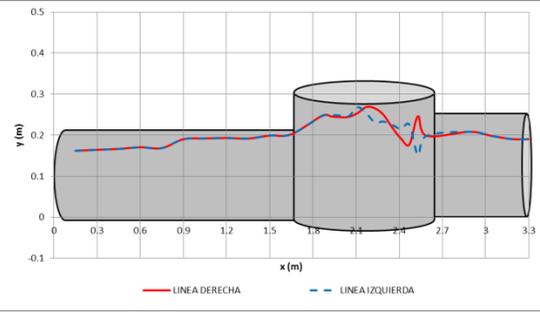
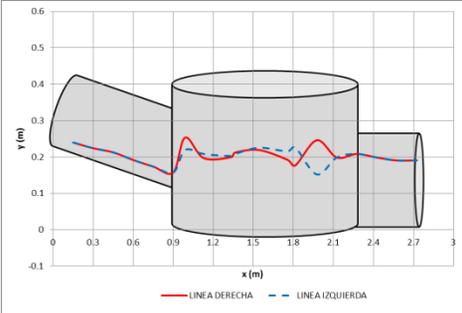
<i>Comportamiento Hidráulico</i>		
Onda formada en la línea izquierda 		Onda formada en la línea derecha 
Perfil de Flujo 180°-Tubería entrada 	Perfil de Flujo 180°-Cámara 	Perfil de Flujo 90° 

Tabla 26. Resultados obtenidos con el caudal máximo probado por la tubería Central, Lateral 1 y Lateral 2 para Unión de Flujos II (Acrílico).

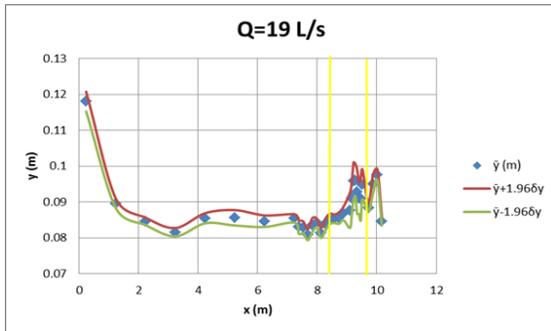
<i>Flujo 90° Q=8 L/s , Flujo 180° Q= 12 L/s y Flujo 270° Q=3 L/s</i>															
<i>Parámetros</i>															
TUBERÍA	DIÁMETRO [m]	L [mt]	PENDIENTE	Q [m ³ /s]	Yn [m]	Y/D	θ [Rad]	A [m ²]	D [m]	R	v [m/s]	Q [m ³ /s]	No. de Froude	Tipo de Flujo	
PRINCIPAL	0.218	8.650	0.003	0.0120	0.184	84.3%	4.655	0.034	0.212	0.066	1.016	0.034	0.705	Transicional	
LATERAL 1	0.218	1.050	0.128	0.0080	0.052	24.0%	2.046	0.007	0.037	0.031	0.609	0.004	1.011	Transicional	
LATERAL 2	0.218	0.75	0.108	0.003	0.028573	13.1%	1.482	0.003	0.020	0.018	0.417	0.001	0.952	Transicional	
SALIDA	0.262	0.600	0.005	0.0200	0.197	75.3%	4.201	0.044	0.193	0.079	1.508	0.066	1.098	Transicional	

<i>Comportamiento Hidráulico</i>		
Onda formada en la línea izquierda 	Patrón de Flujo 	Onda formada en la línea derecha 
Perfil de Flujo 90° 	Perfil de Flujo 180° 	Perfil de Flujo 270° 

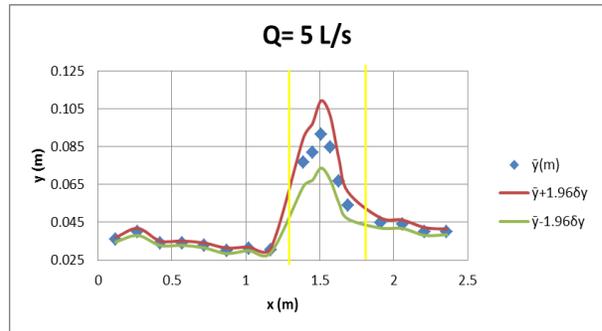
11. Anexo II- Análisis de incertidumbre

A fin de determinar la incertidumbre asociada a cada medición y asumiendo que los datos se distribuyen normalmente alrededor de la media, se graficaron los niveles de flujo promedio, 1.96 desviaciones por encima y por 1.96 desviaciones por debajo a lo largo de cada configuración de flujo. Las líneas amarillas indican la ubicación de la cámara en el perfil axial de flujo.

Los perfiles de flujo de Flujo Directo y Flujo Lateral 1, son los que presentan una menor dispersión a lo largo de las tuberías, mientras que en las cámaras se observa cómo la desviación de los datos aumenta (Gráfica 7 y Gráfica 8 respectivamente).

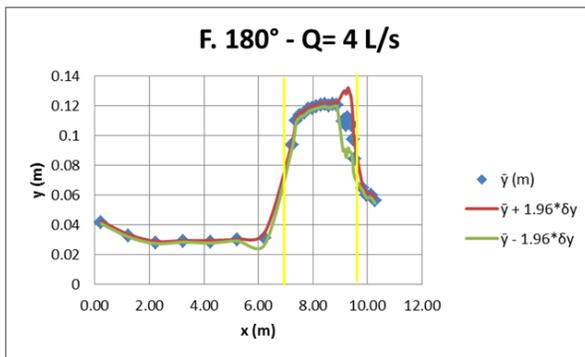


Gráfica 7. Errores del perfil de nivel en la tubería de Central, la cámara y la tubería de salida para Flujo Directo.

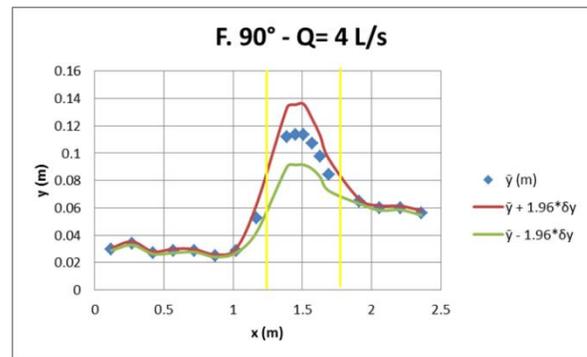


Gráfica 8. Errores del perfil de nivel en la tubería Lateral 1, la cámara y la tubería de salida para Flujo Lateral 1.

La incertidumbre asociada a la Unión de flujos también fue muy baja a lo largo de todo el perfil de flujo, especialmente en la tubería central (ver Gráfica 9). Mientras que se observa un aumento en la desviación de los datos para el perfil de la tubería lateral, lo cual se debe al aumento de la turbulencia del flujo que se presentó por la formación de ondas más dinámicas (ver Gráfica 10).



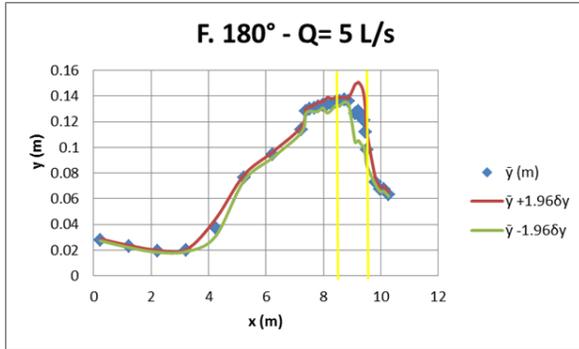
Gráfica 9. Errores del perfil de nivel de la tubería Central, la cámara y la tubería de salida para Unión de Flujos.



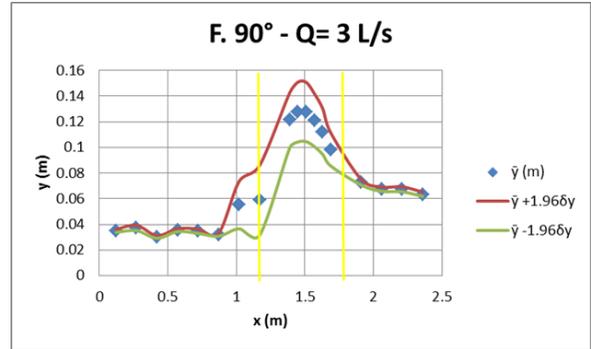
Gráfica 10. Errores del perfil de nivel de la tubería de Lateral 1, la cámara y la tubería de salida para Unión de Flujo.

La incertidumbre para las pruebas de Unión de Flujos II mostró un comportamiento similar al de las pruebas de Unión de Flujos, poca desviación en las mediciones de las tuberías donde el flujo es bastante continuo y un aumento en las desviación de las mediciones en la cámara de unión,

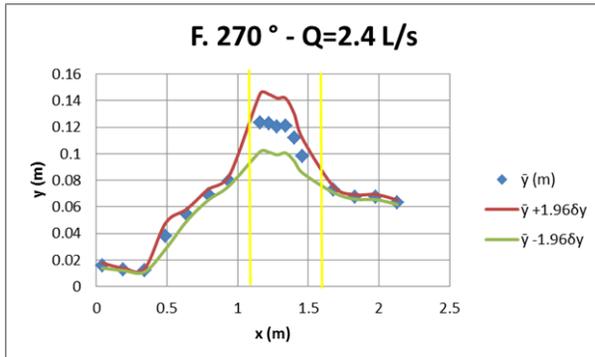
asociado al aumento de la turbulencia y a la aireación de las ondas que disminuye la precisión en los registros del sensor.



Gráfica 11. Errores del perfil de nivel de la tubería Central, la cámara y la tubería de salida para Unión de Flujos II.



Gráfica 12. Errores del perfil de la tubería Lateral 1, la cámara y la tubería de salida para Unión de Flujos II.



Gráfica 13. Errores del perfil de nivel de la tubería Lateral 2, la cámara y la tubería de salida para Unión de Flujos II.

En general, desde la Gráfica 7 hasta la Gráfica 13, se puede apreciar la alta precisión del equipo. De manera que una frecuencia de medición de 228 Khz parece arrojar resultados bastante confiables, pues el equipo es capaz de detectar cambios en la altura del agua en 48 milisegundos. Para todos los casos, se observó que la dispersión de datos aumenta dentro de la cámara, debido a que las ondas afectan el perfil de nivel, generan turbulencia y aireación, dificultando la toma de datos. En consecuencia, si las ondas se desplazan dentro de los conductos, la incertidumbre de la medición aumenta.