

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL



PROYECTO DE GRADO
INGENIERÍA AMBIENTAL

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO FÍSICO PARA EL
ESTUDIO DE CÁMARAS DE UNIÓN BAJO CONDICIONES DE
FLUJO SUPERCRÍTICO EN SISTEMAS DE DRENAJE URBANO.**

PRESENTADO POR:
DIANA CAROLINA CANO RAVELO

ASESOR:
ING. JUAN GUILLERMO SALDARRIAGA VALDERRAMA

BOGOTÁ D.C, JUNIO 2012



Contenido

Índice de ilustraciones	iii
Índice de gráficas	iv
Índice de tablas	v
1. Introducción	1
1.1. Objetivos	3
1.1.1. Objetivo General	3
1.1.2. Objetivos Específicos	3
2. Estado del Arte	4
2.1. Antecedentes	4
2.1.1. SUPERCRITICAL FLOW IN 45° JUNCTION MANHOLE por Giuseppe Del Giudice, Willi H. Hager (2001)	4
2.1.2. SUPERCRITICAL FLOW ACROSS SEWER MANHOLES por Rudy Gargano, Willi H. Hager (2002)	14
2.1.3. SUPERCRITICAL FLOW IN SEWER MANHOLES por Willi H. HAGER, Corrado GISONNI (2005)	19
2.1.5. COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE CÁMARAS (POZOS) DE CONEXIÓN DE GRANDES COLECTORES Por E. Quejada, M. Moreno y J. G. Saldarriaga (2010)	27
2.1.6. Hydraulics of Circular Drop Manholes por F. Granata, G. de Marinis, R. Gargano y W. Hager (2011)	35
2.1.7. COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE CÁMARAS DE INSPECCIÓN BAJO CONDICIONES DE FLUJO SUPERCRÍTICO por N. Bermúdez y J.G. Saldarriaga (2011)	45
2.2. Marco Teórico	61
2.2.1. Cámaras	61
2.2.2. Flujo supercrítico	62
2.2.3. Flujo supercrítico en cámaras de inspección	65
3. Descripción general del modelo	66
3.1. Ubicación	68
3.2. Sistema hidráulico	70
3.3. Diseño del modelo	72
3.4. Dimensiones de los componentes	79
3.5. Materiales de construcción y métodos de elaboración	80
4. Costos del proyecto	85



Montaje y resultados.....	87
4.1. Cámara 1	87
4.2. Cámara 2	90
Conclusiones y Recomendaciones.....	93
Glosario.....	95
Bibliografía.....	97



Índice de ilustraciones

Ilustración 1. Definición de una cámara de unión con tubería lateral a 45° (a) planta, (b) perfil.	5
Ilustración 2. Formación de ondas de choque en cámaras de paso continuo (a) perfil, (b) planta..	20
Ilustración 3. Cámara de curvatura mejorada con extensión (a) planta, (b) perfil.....	23
Ilustración 4. Cámara de unión (a) vistas en planta con ondas de choque A, B, C, D y E (b)perfil. ..	24
Ilustración 5. Esquema del montaje.....	36
Ilustración 6. Esquema del montaje del modelo.....	45
Ilustración 7. Modelo físico de estructura de conexión (cámara) y configuraciones de tapas removibles herméticas.....	46
Ilustración 8. Onda presente en una cámara con flujo de entrada únicamente en la tubería principal.....	47
Ilustración 9. Ondas presentes en una cámara con flujo de entrada únicamente en la tubería lateral.	50
Ilustración 10. Ondas presentes en una cámara con unión de los flujos.....	54
Ilustración 11. Relación de profundidad de flujo $Y_s = h_{max}/h_{min}$	65
Ilustración 12. Mapa de ubicación del edificio Mario Laserna	68
Ilustración 13. Esquema del funcionamiento del sistema hidráulico del Laboratorio de Hidráulica.	71
Ilustración 14. Esquema de medición para calcular la pendiente en las tuberías.....	92



Índice de gráficas

Gráfica 1. Onda A, máxima altura de la onda Ya como función de F0 para (a) solo flujo directo, (b) flujo supercrítico en ambas entradas.....	8
Gráfica 2. Altura de la onda B YB como función de FL para (a) solamente flujo lateral; (b) flujo supercrítico en ambas entradas; (c) flujo supercrítico en entrada directa; (d) flujo supercrítico en entrada lateral.....	9
Gráfica 3. Altura de la onda C como función de FL.....	10
Gráfica 4. Localización de la onda B XB como función de FL.....	11
Gráfica 5. Altura del oleaje como función del número.....	12
Gráfica 6. Relación entre el número de Froude y las relaciones de llenado de las tuberías de entrada.....	13
Gráfica 7. Altura de onda relativa en función de F0.....	15
Gráfica 8. Localización relativa de la onda en la cámara.....	16
Gráfica 9. Altura relativa del oleaje Ys.....	17
Gráfica 10. Altura relativa de la onda en la.....	18
Gráfica 11. Localización relativa de la onda en la tubería de salida.....	19
Gráfica 12. Pérdidas de energía en el modelo de la estructura de confluencia. Configuración 1....	32
Gráfica 13. Pérdidas de energía en el modelo de la estructura de confluencia. Configuración 2....	32
Gráfica 14. Relación entre pérdidas de energía del modelo y flujo relativo del conducto dominante.....	33
Gráfica 15. Perdida de energía relativa versus l	38
Gráfica 16. Coeficiente de perdida K versus l^{-2}	39
Gráfica 17. Coeficiente α versus D_M/s	39
Gráfica 18. Altura de la piscina en la cámara h_p/D out versus $Q^*/y_0^{0,7}$ para (a) $DM=1m$, $s=2m$ y lámina de 45%; (b) $DM=0,48m$, $s=1m$ y lámina de 80%.....	41
Gráfica 19. Altura de la piscina en la cámara h_p/D out versus $Q^*/y_0^{0,7}$ para (a) $DM=1m$, $s=1,5m$ y lámina de 40%; (b) $DM=0,48m$, $s=1,5m$ y lámina de 85%.....	41
Gráfica 20. Inicio del ahogamiento.....	42
Gráfica 21. Demanda relativa de aire β versus l	43
Gráfica 22. Demanda de aire máxima para Regímenes I y II.....	44
Gráfica 23. Efecto de la ausencia de suministro de aire en la altura relativa de la piscina.....	44



Índice de tablas

Tabla 1. Resumen de los datos experimentales.....	7
Tabla 2. Escalas de similaridad bajo el criterio de similitud de Froude.	29
Tabla 3. Dimensiones del modelo y prototipo.....	29
Tabla 4. Escenarios de caudal para las configuraciones 1 y 2.....	30
Tabla 5. Resumen de los resultados estadísticos.....	59
Tabla 6. Clasificación de los flujos según el número de Froude.	63
Tabla 7. Dimensiones de los componentes del modelo 1.....	79
Tabla 8. Dimensiones de los componentes del modelo 2.....	80
Tabla 9. Presupuesto final del proyecto.....	85



1. Introducción

La ciencia ha considerado que la presencia de agua en la tierra fue determinante para desarrollar vida en este planeta. Esto se basa en las teorías planteadas sobre el origen de la vida en la tierra, una de las más aceptadas, la teoría Quimiosintética, propuesta por Oparín y Haldane, describe la aparición de la vida como un proceso de formación de azúcares y aminoácidos a partir de compuestos como el metano (CH_4), el amoníaco (NH_3), el agua (H_2O) y la acción de una fuente de energía como la radiación ultravioleta, las descargas eléctricas, las erupciones volcánicas o la radioactividad. Debido a que hace 4.000 millones de años no existía la capa de ozono en la atmósfera, responsable de filtrar las radiaciones ultravioletas, la teoría considera que este proceso debió desarrollarse en el agua, pues esta actuaba como filtro, permitiendo el desarrollo de los primeros coacervados.

Millones de años después, desde el surgimiento de las primeras civilizaciones, el agua sigue siendo una fuente vital para la supervivencia de la humanidad. No por ende estas grandes civilizaciones surgieron en las inmediaciones de grandes cuerpos de agua como son el Éufrates, el Nilo, el Tigris, el Amarillo, entre otros. Una vez establecidos los asentamientos de estas civilizaciones, nace la necesidad de aprender a controlar el agua. Dicho punto se evidencia en el inicio del desarrollo de los sistemas de riego en China, India, Mesopotamia, Pakistán y Egipto entre los años 4000 al 2000 A.C. De la misma manera hacia el año 500 A.C. se empezaron a construir los primeros acueductos en Grecia y se dio inicio al desarrollo de fórmulas para estos sistemas¹.

Como toda ciencia la hidráulica ha buscado la determinación de teorías y ecuaciones que rijan el comportamiento del agua a través de estructuras necesarias para su aprovechamiento. Durante la evolución de esta ciencia han surgido grandes líderes como: Arquímedes (287-212 A.C.) quien estableció los principios elementales de la flotación de cuerpos, Leonardo da Vinci (1452-1519) expuso los principios elementales de la continuidad y sugirió diseños de máquinas hidráulicas, E. Torricelli (1608-1647) describió la forma de los chorros de agua en caída libre, Isaac Newton (1642-1727) descubre la contracción de chorros y realizó estudios sobre resistencia fluida, Daniel Bernoulli (1700-1782) describió el movimiento de un fluido a lo largo de una línea de corriente, Leonhard Euler (1707-1783) formuló ecuaciones básicas sobre resistencia fluida y explicó cómo actuaba la presión en el flujo, Antoine Chezy (1718-1798) trabajó en hidráulica de canales abiertos, J. Saint Venant (1797-1886) estableció ecuaciones para flujo laminar y turbulento, Henri Darcy (1803-1858) estableció ecuaciones para calcular pérdidas por fricción, Julius Weisbach (1806-

¹ Tomado de: Diseño en Ingeniería hidráulica. Universidad de los Andes. 2012-1. Saldarriaga, Juan G. Clase 1.



1871) estableció patrones de flujo, William Froude (1810-1879) estableció un número adimensional que relaciona las fuerza inerciales con las fuerzas gravitacionales que afectan un fluido y estableció relaciones básicas entre modelo y prototipo, Robert Manning (1816-1897) propuso ecuaciones de resistencia fluida en canales abiertos, Osborne Reynolds (1842-1912) realizó experimentos sobre cavitación y resistencia de tuberías, entre otros².

Pero a pesar de este conocimiento el comportamiento del agua en las estructuras de aprovechamiento sigue siendo complejo, por ende se requiere que el diseño se base en experimentaciones a través de un modelo físico, sobretodo en estructuras complejas y de gran envergadura presentes en los sistemas de acueducto y drenaje urbano. Un ejemplo de ello son las cámaras de unión utilizadas en los sistemas de drenaje urbano.

El diseño tradicional de cámaras de inspección se basa en estudios realizados en ciudades planas y con materiales de tubería de alta rugosidad. Estas condiciones permiten que los sistemas de drenaje se caractericen principalmente por flujo subcrítico. Pero dado las condiciones topológicas de algunas ciudades en donde la pendiente en los sistemas de drenaje es mucho mayor y el incremento en el uso de materiales para tuberías poco rugosos es cada vez mayor, se ha encontrado que en la actualidad los sistemas de drenaje presentan principalmente condiciones de flujo supercrítico.

En flujo subcrítico la unión presentada en la cámara de inspección puede ser tratada bajo la noción de acercamiento unidimensional, pero para el caso de flujo supercrítico la unión debe analizarse bajo un acercamiento bidimensional; de este modo no solo se debe tener en cuenta las variaciones en la dirección del flujo sino además las variaciones presentadas en la profundidad del mismo. Por lo tanto la limitada base teórica en el tema debido al complejo comportamiento, hace necesario el estudio experimental a fin de disminuir la deficiencia en el diseño de las cámaras de alcantarillado bajo condiciones de flujo supercrítico.

Con el objetivo de generar un mayor conocimiento del comportamiento de las cámaras de unión bajo condiciones de flujo supercrítico, el presente trabajo mostrará el diseño y la construcción de una cámara de unión junto con sus tuberías de conexión y el montaje de otra cámara de unión proporcionada por la empresa PAVCO S.A. Este proyecto de grado permitirá la realización de pruebas sobre los modelos construidos para determinar posibles recomendaciones de diseño. Debido a la elaboración de dos cámaras de diferentes dimensiones durante la elaboración de este proyecto, se hará referencia a la cámara realizada en acrílico con diámetro interno de 0,85 m y a la cámara proporcionada por la empresa PAVCO S.A como la cámara 1 y cámara 2, respectivamente.

² Tomado de: Diseño en Ingeniería hidráulica. Universidad de los Andes. 2012-1. Saldarriaga, Juan G. Clase 1.



1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo General

Realizar el diseño, la construcción y el montaje de dos cámaras de unión con tuberías de conexión adaptadas para generar flujo supercrítico a través de ellas, mediante cambios en la pendiente de las tuberías, cambios en la altura de caída de la conexión de las tuberías a la cámara de unión y variaciones de caudal con control mediante vertederos.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Consultar información sobre modelos de cámaras de unión bajo flujo supercrítico realizados anteriormente.
- Diseñar los componentes del montaje con base en la disponibilidad de espacio en el laboratorio de hidráulica.
- Realizar planos de detalle de las estructuras a construir para asegurar su adecuada elaboración
- Auditar el proceso de construcción de cada uno de los componentes del montaje, llevando un registro histórico durante su construcción.
- Permitir la medición del nivel del agua en varias zonas de la tubería de entrada y salida, así como el nivel del flujo en la cámara.
- El montaje debe permitir realizar cambios en la pendiente de las tuberías de entrada, cambios en el caudal y en la altura de caída en la conexión de las tuberías con la cámara de unión.



2. Estado del Arte

2.1. Antecedentes

El análisis de cámaras de inspección bajo flujo supercrítico comenzó en el año de 1950 en donde se analizó las condiciones necesarias para la formación de resaltos hidráulicos en la tubería aguas arriba, a partir de allí investigaciones hechas principalmente por William Hager, se han enfocado en la determinación de ecuaciones empíricas para el diseño de cámaras de inspección bajo condiciones de flujo supercrítico. A continuación se presenta un resumen de publicaciones recientes realizadas sobre cámara bajo flujo supercrítico.

2.1.1. SUPERCRITICAL FLOW IN 45° JUNCTION MANHOLE por Giuseppe Del Giudice, Willi H. Hager (2001)

En esta investigación se comparó el diseño tradicional de cámaras con curva con dos tipos de adiciones propuestas: (1) ubicación de coberturas con el objetivo de conducir la descarga presurizada a través de la cámara y (2) ubicación de una extensión en la cámara con el objetivo de aumentar la distancia entre la localización de la máxima onda de choque y la estructura de salida de la cámara. Ambas estructuras tienen fenómenos similares dado que el flujo es desviado en la estructura y la conexión de salida puede ahogarse.

El propósito de este estudio fue: (1) distinguir los diferentes patrones de flujo en una cámara de curva; (2) determinar los parámetros más importantes del flujo y (3) adelantar un procedimiento de diseño de estas estructuras incluyendo información como capacidad de descarga, características de las ondas, transición de flujo supercrítico a subcrítico y comparaciones con cámaras de curva previamente analizadas.

El modelo utilizado consistió de dos tuberías de entrada con diámetro $D=0,24m$, una sección transversal con forma de "U" y una tubería de salida de igual diámetro D . Dadas las investigaciones previas realizadas por los mismos autores se adicionó una extensión de longitud $2D$ al final de la curva de entrada porque fue demostrado que para cámaras con unión a 45° esta extensión permitía un importante incremento en la capacidad de descarga. La geometría de la cámara se basó en aplicaciones típicas, como son un radio de curvatura $R_c=3D$ y una pendiente inferior en la cámara de 1% para compensar la fricción en las paredes. De los 300 experimentos llevados a cabo, los investigadores determinaron que los parámetros más

importantes fueron las relaciones de llenado del flujo directo (y_o) y del flujo lateral (y_L) y los números de Froude (F_o y F_L) para ambos flujos de entrada.

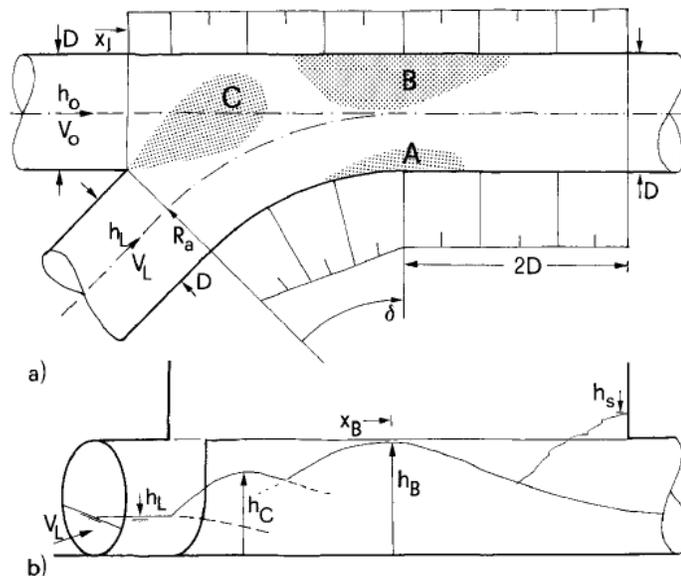
Condiciones de flujo

Para uniones de flujo en general se puede distinguir varios tipos de flujo:

1. Aproximación de flujo supercrítico para ambos flujos de entrada.
2. Flujo subcrítico en el flujo lateral y flujo supercrítico en el flujo directo.
3. Flujo supercrítico en el flujo lateral y flujo subcrítico en el flujo directo.
4. Aproximación de flujo subcrítico para ambos flujos de entrada.

Adicionalmente a las cuatro configuraciones de flujo el estudio consideró condiciones donde una de las tuberías de entrada no tuviera descarga. Todas ellas fueron analizadas al igual que condiciones mínimas límite para la transición entre flujo supercrítico a flujo subcrítico. Toda esta información fue sustancial para determinar los diseños hidráulicos de la cámara de unión pues el patrón de flujo puede cambiar drásticamente. En la Ilustración No. 1 se muestra la configuración de un flujo de unión supercrítico típico tipo 1, allí se puede distinguir la ubicación de tres tipos de ondas.

Ilustración 1. Definición de una cámara de unión con tubería lateral a 45° (a) planta, (b) perfil.



Tomado de: (Del Giudice & Hager, 2001).



Los tipos de ondas que se pueden presentar son:

- **Onda C:** comienza en el punto de unión entre los dos flujos como se puede observar en la Ilustración No. 1 y está dada principalmente por la abrupta desviación de los dos flujos. Posee una profundidad igual a los dos flujos.
- **Onda B:** se presenta debido al flujo que incide en la pared opuesta de la cámara al flujo lateral. Normalmente está es mayor que la onda C
- **Onda A:** cuando el flujo directo domina aguas arriba se presenta esta onda debido a la expansión de este flujo en la cámara. La onda A es típica cuando solo se hay flujo directo.

Resultados experimentales

La tabla No. 1 muestra un resumen de los datos experimentales llevados a cabo en la investigación. Al comparar estos resultados con investigaciones previas en uniones de canales rectangulares, los autores observaron que (1) la sección transversal con forma de “U” es más compleja en términos de geometría, (2) los flujos con estas velocidades tan grandes ingresan aire produciéndose un flujo de dos fases y (3) las pérdidas hidráulicas a través de la cámara no son despreciables.

Resultados

Onda A

Para descargas solamente en la entrada directa la altura relativa de la onda (Y_a) varía con el número de Froude (F_0). La Gráfica 1(a) muestra un incremento lineal de Y_a con F_0 hasta $Y_a=3$, desde donde se mantiene la altura.

$$Y_A = \left(\frac{h_A}{h_0}\right) - 1$$

Ecuación 1

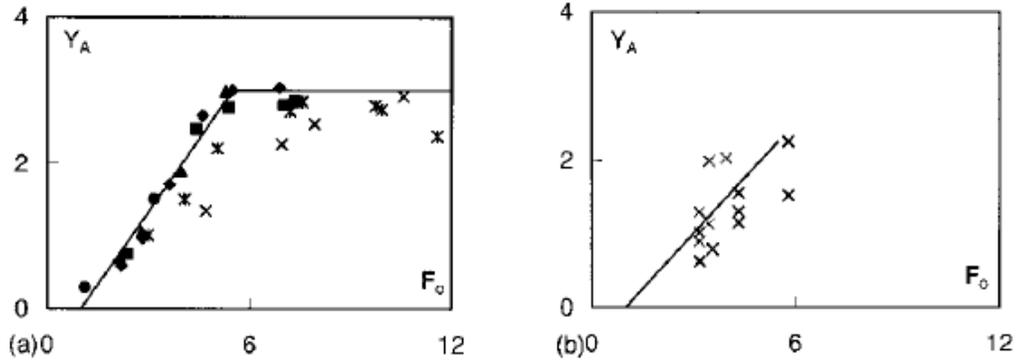

Tabla 1. Resumen de los datos experimentales.

Number of experiments						
Only main Branch	36	Supercritical Flow				
			F_o	y_o		
		max	11.59	0.65		
		min	1.12	0.15		
Only lateral Branch	18	Supercritical Flow				
			F_L	y_L		
		max	7.79	0.57		
		min	1.62	0.16		
Both Branches	113	Supercritical Flow		Supercritical Flow		
		Main Branch		Lateral Branch		
			F_o	y_o	F_L	y_L
		max	12.33	0.45	8.06	0.65
		min	3.19	0.15	1.19	0.16
Both Branches	140	Supercritical Flow		Subcritical Flow		
		Main Branch		Lateral Branch		
			F_o	y_o	F_L	y_L
		max	10.59	0.55	0.97	0.84
		min	1.32	0.17	0.06	0.34
Both Branches	37	Subcritical Flow		Supercritical Flow		
		Main Branch		Lateral Branch		
			F_o	y_o	F_L	y_L
		max	0.50	0.93	7.13	0.55
		min	0.03	0.38	1.73	0.16

Tomado de: (Del Giudice & Hager, 2001).



Gráfica 1. Onda A, máxima altura de la onda Y_A como función de F_0 para (a) solo flujo directo, (b) flujo supercrítico en ambas entradas.



Tomado de: (Del Giudice & Hager, 2001).

Los resultados experimentales para este tipo de onda se rigen por la Ecuación 2.

$$Y_A = \left(\frac{2}{3}\right)(F_0 - 1), \quad \text{para } Y_A \leq 3 \quad \text{Ecuación 2}$$

Para flujo supercrítico en ambas entradas la onda A ocurre exclusivamente cuando la relación de llenado del flujo lateral es 20%, como se puede observar en la Gráfica 1b. La ecuación 3 gobierna esta configuración.

$$Y_A = \left(\frac{1}{2}\right)(F_0 - 1) \quad \text{Ecuación 3}$$

La onda A según observaron los investigadores normalmente no es dominante y difícilmente determina el diseño de la cámara de unión.

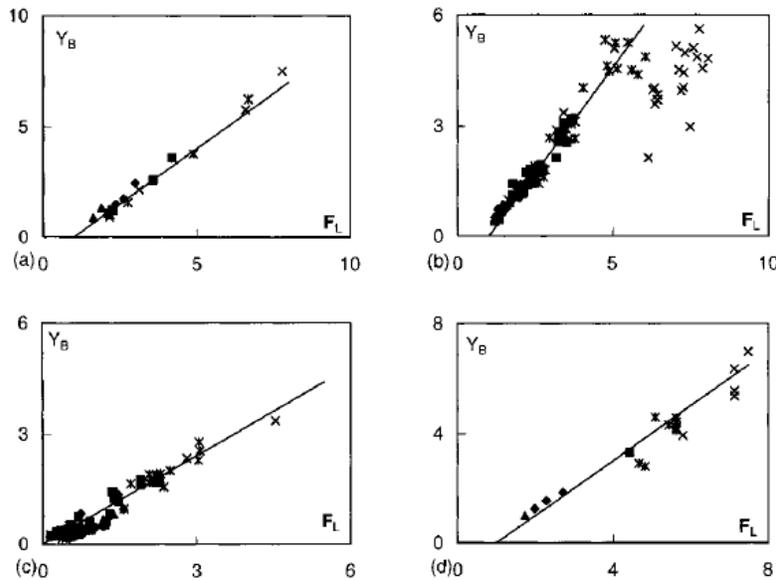
Onda B

El flujo en la entrada lateral dicta las características de la onda B. la Gráfica 2a muestra la profundidad relativa Y_B en función de F_L para flujo lateral únicamente. La Ecuación 4 muestra esta relación, donde $C_B=1$ para esta configuración de flujos.

$$Y_B = \left(\frac{h_B}{h_L}\right) - 1 \quad \text{Ecuación 4}$$



Gráfica 2. Altura de la onda B Y_B como función de F_L para (a) solamente flujo lateral; (b) flujo supercrítico en ambas entradas; (c) flujo supercrítico en entrada directa; (d) flujo supercrítico en entrada lateral.



Tomado de: (Del Giudice & Hager, 2001).

Para flujo supercrítico en ambas entradas el resultado es similar como se puede observar en la Gráfica 2b. La ecuación que gobierna esta configuración se puede observar en la Ecuación 5, con $C_B = 8/7$.

$$Y_B = C_B(F_L - 1) \quad \text{Ecuación 5}$$

Para flujo supercrítico en la entrada directa y flujo supercrítico en la entrada lateral, $C_B = 1$ debido a un efecto en la reducción del momento dado por el flujo principal [Gráfica 2d]. Si el flujo es supercrítico en la entrada lateral y subcrítico en la entrada directa, la onda B reduce su altura, el resultado se puede observar en la Ecuación 6.

$$Y_B = 0,8F_L \quad \text{Ecuación 6}$$

Onda C

La Gráfica 3 muestra las pruebas realizadas tanto para flujo supercrítico en ambas entradas como para flujo supercrítico en la entrada directa con una mínima condición en el flujo lateral.

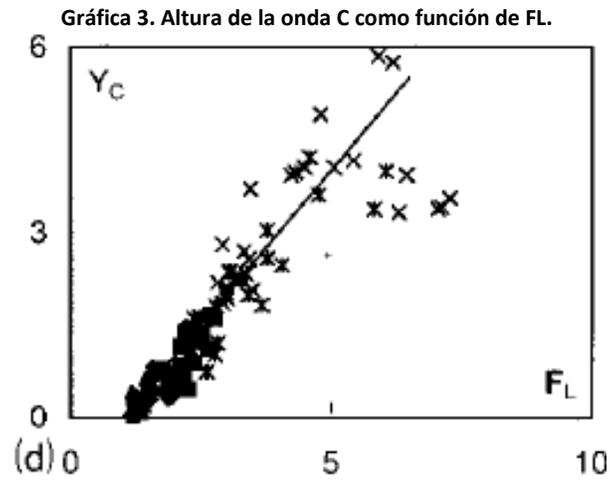


A partir de estas pruebas los autores determinaron la siguiente relación que se muestra en la Ecuación 7.

$$Y_C = F_L - 1 \quad \text{Ecuación 7}$$

donde,

$$Y_C = \left(\frac{h_C}{h_L} \right) - 1 \quad \text{Ecuación 8}$$



Tomado de: (Del Giudice & Hager, 2001).

Se puede notar que la altura relativa de la onda C y la onda B están basadas en los mismos parámetros adimensionales, permitiendo una comparación entre ellas. Las pruebas mostraron que para flujo supercrítico en ambas entradas, la onda B es aproximadamente un 15% más alta que la onda C y determina la superficie libre. Para configuraciones de flujos combinados ambas ondas son aproximadamente de la misma altura.

Localización de la onda

Para determinar la localización de la onda B, los investigadores tuvieron en cuenta el punto máximo de la onda x_B y el punto de unión entre los flujos x_i , a partir de allí definieron un nuevo parámetro adimensional mostrado en la Ecuación 9.



$$X_B = \frac{(x_B - x_J)}{D}$$

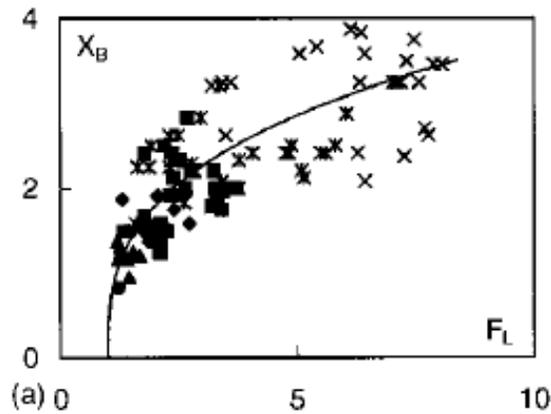
Ecuación 9

La Gráfica 4 muestra la localización máxima para flujo supercrítico en ambas entradas. Los resultados pueden ser aproximados mediante la Ecuación 10.

$$X_B = 1,8(F_L - 1)^{\frac{1}{3}}$$

Ecuación 10

Gráfica 4. Localización de la onda B X_B como función de F_L .



Tomado de: (Del Giudice & Hager, 2001).

Los investigadores concluyeron que la máxima localización de la onda B está ubicada aproximadamente a dos veces el diámetro desde el punto de unión entre los flujos.

Altura del oleaje

La investigación también evaluó la altura relativa del oleaje (Y_s) en la tubería de salida obteniendo que esta es directamente proporcional al número de Froude del flujo lateral. La Gráfica 5 muestra la relación.

$$Y_s = F_L$$

Ecuación 11

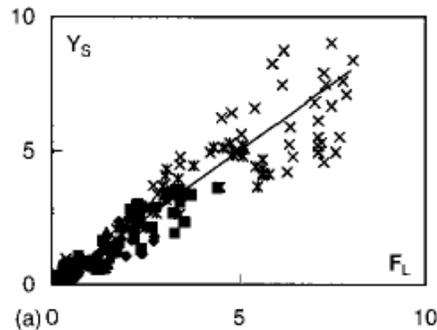
donde,

$$Y_C = \left(\frac{h_C}{h_L}\right) - 1$$

Ecuación 12



Gráfica 5. Altura del oleaje como función del número de Froude del flujo lateral de aproximación.



Tomado de: (Del Giudice & Hager, 2001).

Por consiguiente, para $F_L < 8$, Y_s es ligeramente mayor que la altura de la onda B. Para flujo en la tubería directa solamente, la altura de la onda es definida por la Ecuación 13.

$$Y_{S_0} = \left(\frac{h_s}{h_0}\right) - 1 \quad \text{Ecuación 13}$$

Esta altura varía con el número de Froude del flujo de aproximación directo y según los valores medidos se ajusta a la Ecuación 14.

$$Y_{S_0} = F_0^{1/2} \quad \text{Ecuación 14}$$

Caudal de salida en la unión de flujos

Para consideraciones de diseño, la capacidad hidráulica de la estructura es significativa. Una vez la descarga actual Q es mayor a la capacidad de descarga Q_c , pueden ocurrir fenómenos peligrosos. En las cámaras de unión existen dos razones diferentes por las cuales no se puede mantener un régimen de flujo supercrítico:

- Ahogamiento de la conexión de salida de la cámara debido al oleaje: el resultado de este fenómeno es una abrupta transición de flujo supercrítico en flujo mixto de aire – agua presurizado.
- Ahogamiento en una o ambas estructuras de conexión de entrada: por ejemplo, el flujo lateral puede ser tan dominante que corta la entrada del flujo directo. Aunque este tipo de ahogamiento es menos abrupto y peligroso que el anterior, sigue siendo indeseable porque ocurre un efecto de remanso del agua.



Los investigadores definieron el número de Froude (F_c) como el número de Froude máximo calculado a partir del caudal máximo de salida de la cámara. La siguiente ecuación muestra la relación entre ellos.

$$F_c = \frac{Q_c}{\sqrt[2]{gD^5}}$$

Ecuación 15

Entre las relaciones encontradas por los investigadores se definieron relaciones entre el número de Froude del flujo de salida con las relaciones de llenado en las tuberías de entrada.

$$F_c = 2,2y_M$$

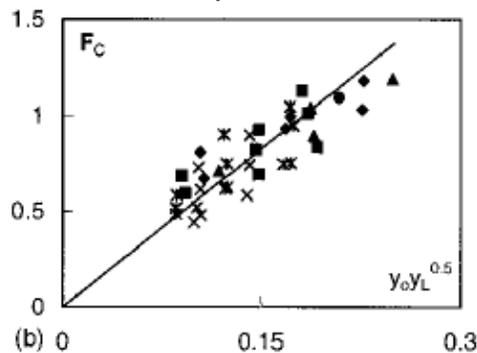
Ecuación 16

La Ecuación 16 muestra la relación encontrada para condiciones de sólo un flujo de entrada, siendo $y_M = y_0$ para flujo sólo en la tubería directa y $y_M = y_L \cos \delta$ (δ ángulo entre las dos tuberías de entrada) para flujo sólo en la tubería lateral. Para flujo supercrítico en ambas tuberías de entrada el número de Froude en el flujo de salida (F_c) varía dependiendo de las relaciones de llenado de ambas tuberías como se aprecia en la ecuación y gráfica presentadas a continuación.

$$F_c = 5,5y_0y_L^{1/2}$$

Ecuación 17

Gráfica 6. Relación entre el número de Froude y las relaciones de llenado de las tuberías de entrada



Tomado de: (Del Giudice & Hager, 2001).



Para relaciones de llenado altas las pruebas alcanzaron un máximo valor de $F_c=1,2$. Este valor será significativamente menor si la cámara de unión no tiene extensión después de la curva de deflexión.

Las pruebas mostraron que el flujo supercrítico en cámaras de unión y deflexión tiene un comportamiento hidráulico similar. En este proyecto se observó un mayor efecto del número de Froude del flujo lateral en comparación al número de Froude del flujo directo, incluso en algunos casos los resultados eran completamente independientes a este último. También se encontró que el flujo directo reduce la altura máxima de la onda B e incrementa el caudal de salida de la cámara de unión en comparación con la cámara de deflexión, es decir, si hay un caudal mayor en el flujo directo que en el indirecto, la altura de la onda es relativamente pequeña y el caudal de salida es mayor. En conclusión se determinó que las cámaras de deflexión son en general las más propensas a efectos adversos como ahogamiento, flujo presurizado de dos fases y formación de géiser en el caso extremo.

2.1.2. SUPERCRITICAL FLOW ACROSS SEWER MANHOLES por Rudy Gargano, Willi H. Hager (2002)

De manera similar a las investigaciones anteriores, para esta publicación se realizó un modelo de una cámara de inspección y se realizaron diferentes pruebas bajo condición de flujo supercrítico. El modelo está compuesto por una tubería con diámetro (D) igual a 240 mm y longitud de 4 m y una cámara de inspección de longitud igual a 2D, ubicada un metro después de una caja de chorro. La última estructura ha sido exitosamente usada en el pasado y genera un flujo casi perfecto en una tubería de predeterminada relación de llenado (y_0) y velocidad de aproximación (v_0), mediante el uso de láminas insertadas en la caja. Las láminas usadas en este proyecto fueron de 70, 75, 80 y 85% altura relativa respecto al diámetro de la tubería.

Para relaciones de llenado $y_0 < 0,60$, se generó flujo a superficie libre para todos los caudales menores a 200 L/s, el flujo presurizado ocurrió para todas las relaciones de llenado que excedían el 80%.

Con los resultados experimentales definieron la altura de la onda en la cámara como:

$$Y_i = \frac{h_i - h_0}{h_0}$$

Ecuación 18



Esta onda de choque se incrementa con el número de Froude del flujo de aproximación F_0 . Dado la sección transversal de la cámara en forma de "U" la ecuación para calcular el número de Froude fue:

$$F_0 = \frac{Q}{\sqrt{gD^2h_0^3}}$$

Ecuación 19

Los datos calculados se muestran en la Gráfica 7 y pueden ser expresados mediante las siguientes ecuaciones:

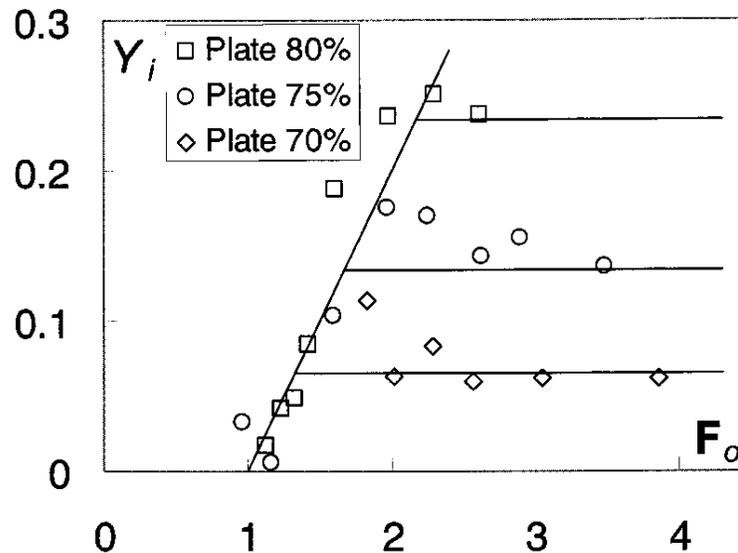
$$Y_i = 0,20(F_0 - 1)$$

Ecuación 20

$$Y_i = \left(\frac{5}{3}\right)y_0 - 1 \text{ prara } 0,60 < y_0 < 0,75$$

Ecuación 21

Gráfica 7. Altura de onda relativa en función de F_0 .



Tomado de: (Gargano & Hager, 2002).

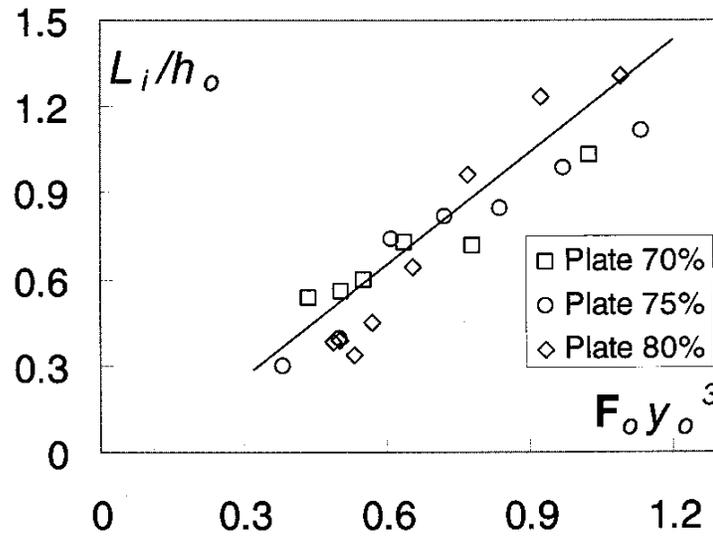
La ubicación de la onda de choque en la cámara se encontró aproximadamente a una longitud igual al diámetro de la tubería desde la conexión de entrada a la cámara. Como se observa en la siguiente ecuación y gráfica.



$$\frac{L_i}{h_0} = 1,3(F_0 y_0^3 - 0,1)$$

Ecuación 22

Gráfica 8. Localización relativa de la onda en la cámara.



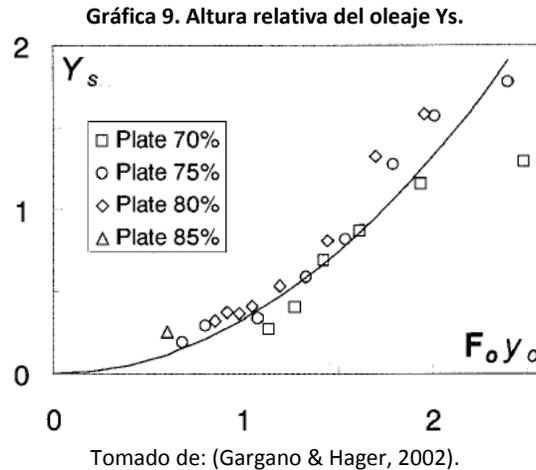
Tomado de: (Gargano & Hager, 2002).

Oleaje y caudal de salida

El impacto del flujo supercrítico en la pared final de la cámara genera un oleaje de altura h_s , la altura de la onda con respecto a la profundidad del flujo de aproximación puede ser descrita por la Ecuación 23.

$$Y_s = \frac{1}{3}(F_0 y_0)^2$$

Ecuación 23



Por consiguiente, la altura de la onda tiene un incremento cuadrático en función del número de Froude y la relación de llenado del flujo de aproximación; esta relación también puede ser definida como:

$$F_o\gamma_o = \frac{Q}{\sqrt[2]{gD^4h_o}}$$

Ecuación 24

Esta relación fue definida por Stahl y Hager en 1999 como el número de ahogamiento C. la transición de flujo de superficie libre a flujo presurizado debido a la generación de un resalto hidráulico se da para número de ahogamiento $C=1$.

Aunque se desea que el caudal de salida se mantenga como un flujo a superficie libre, una vez que ocurre el ahogamiento de la tubería de salida, la conexión de salida se sumerge y el flujo se presuriza propagándose hacia aguas arriba. Dos casos de ahogamiento fueron observados: (1) incremento del caudal causado por la altura del oleaje que genera la formación de un resalto hidráulico aguas arriba de la tubería; y (2) disminución del caudal para condiciones en donde $F_o=1$, formando un resalto hidráulico ondular. La condición (1) ocurre solamente con láminas³ de 80 y 85%. Para la condición (2) el número de Froude aguas abajo F_c es aproximadamente 0,60 y para la condición (1) este número es:

³ La lámina es una estructura hidráulica que regula la relación de llenado de la tubería aguas abajo de la misma. Para esta investigación se utilizaron laminas que permitieron relaciones de llenado de 70, 75, 80 y 85%.



$$F_c = \frac{Q_c}{\sqrt[2]{gD^5}} = -17,3 y_0 + 14,6$$

Ecuación 25

El caudal de salida F_c fue aproximadamente igual a 2 para relaciones de llenado del flujo de aproximación menores a 0,75. En comparación con las cámaras de deflexión con $F_c=1$ o cámaras de unión con $F_c=1,4$ el caudal máximo de salida de las cámaras de paso continuo es mayor al resto.

Onda de choque en la tubería de salida

El estudio encontró que la altura de esta onda (h_w) varía en función de la relación de llenado del flujo de aproximación. De manera similar la localización de esta onda (L_w) es función de la relación de llenado. Esto se puede observar en las ecuaciones y gráficas mostradas a continuación.

$$\frac{h_w}{D} = 2y_0 - 0,6$$

Ecuación 26

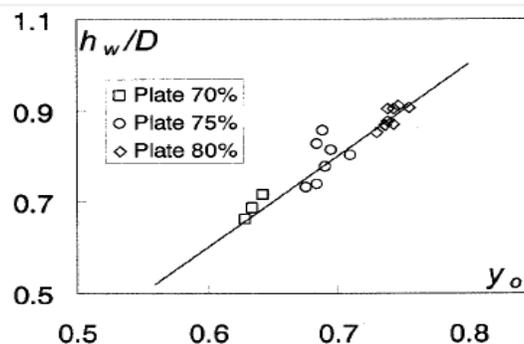
$$\frac{L_w}{D} = 3,3(F_0 - 0,7)$$

Ecuación 27

$$\frac{L_w}{D} = 45 y_0^8 \text{ para } 0,6 < y_0 < 0,75$$

Ecuación 28

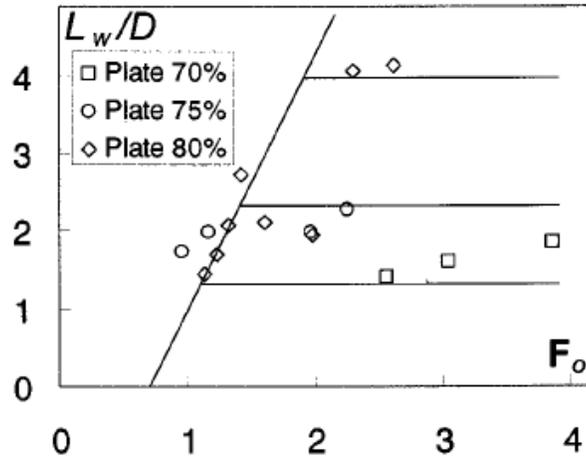
Gráfica 10. Altura relativa de la onda en la tubería de salida como función de y_0 .



Tomado de: (Gargano & Hager, 2002).



Gráfica 11. Localización relativa de la onda en la tubería de salida.



Tomado de: (Gargano & Hager, 2002).

En conclusión, durante la realización del estudio se logró distinguir tres tipos de ondas: (1) la onda al interior de la cámara causada por la transición de la sección transversal circular a la sección transversal con forma de “U”; (2) el oleaje producido por la transición inversa de la sección transversal con forma de “U” a la sección circular, con alturas de onda mayores al diámetro de la tubería de salida, y (3) la onda formada en la tubería de salida que rara vez puede ocasionar ahogamiento de la misma. En cuanto al caudal de salida se encontró que está limitado por dos diferentes efectos: (1) el oleaje puede llegar a ser tan alto que fuerza la generación de un resalto hidráulico en la cámara, sumergiendo la conexión de salida, y (2) la onda en la tubería de salida puede llegar a ser tan alta que alcanza la parte superior de la tubería. La condición actual de las cámaras de paso continuo bajo flujo supercrítico es menos estricta que para otro tipo de cámara pero claramente dicta una revisión en el diseño pues se debería tener como parámetro una relación de llenado del 75% en lugar del 85% utilizado en la actualidad.

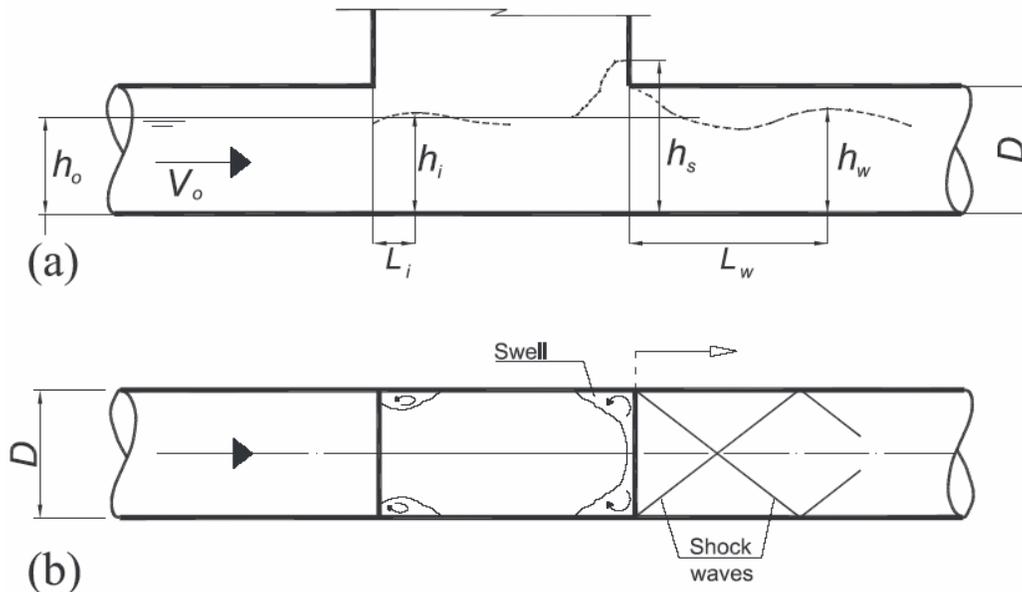
2.1.3. SUPERCRITICAL FLOW IN SEWER MANHOLES por Willi H. HAGER, Corrado GISONNI (2005)

En esta investigación se analizaron tres tipos de cámaras mediante la realización de experimentaciones hidráulicas detalladas. Los tres tipos de cámaras a analizar fueron: de paso continuo, de curva y las cámaras de unión. Las observaciones sistemáticas de laboratorio y las aproximaciones hidráulicas usadas permitieron a los investigadores presentar un diseño modificado y generalizado de estas estructuras.

Cámaras de paso continuo

Las cámaras de paso continuo son las estructuras más simples en los sistemas de drenaje urbano. Estas se caracterizan por estar conectadas a tuberías aguas arriba y aguas abajo de igual diámetro y con forma de “U” en su sección transversal. Para este tipo de cámaras el estudio encontró que para relaciones de llenado menores o iguales al 50% ($y_0 = h_0/D \leq 0,50$), el flujo permanece en la mitad inferior de la sección transversal de la cámara sin verse afectado. Por otra parte, para relaciones de llenado mayores del 50% ($y_0 > 0,50$) el flujo se expande abruptamente en la entrada de la cámara generándose ondas de altura h_i debido al impacto del flujo con las paredes laterales de la cámara. La Ilustración No. 2 muestra un esquema de la formación de ondas de choque.

Ilustración 2. Formación de ondas de choque en cámaras de paso continuo (a) perfil, (b) planta.



Tomado de: (Hager & Gissoni, Supercritical Flow in Sewer Manholes, 2005).

Además, al paso del flujo por la cámara la profundidad de este a la salida (h_s) puede llegar a ser tan alta que alcanza a chocar con las paredes superiores de la cámara en la salida propiciando la generación de resaltos hidráulicos. Como resultado final se produce un ahogamiento de la tubería de salida dado que se cortó la entrada de aire. Si el incremento en la descarga se produce en un corto periodo de tiempo la perturbación en la superficie se propaga tan rápidamente hacia aguas arriba que se crea un géiser arriba de la cámara.



Para relaciones de llenado mayores al 50%, el perfil que se forma en la cámara es similar a un rectángulo, como consecuencia de esta similitud la fórmula para calcular el número de Froude se muestra en la Ecuación 28.

$$F_U = \frac{Q}{(gD^2h_0^3)^{\frac{1}{2}}}$$

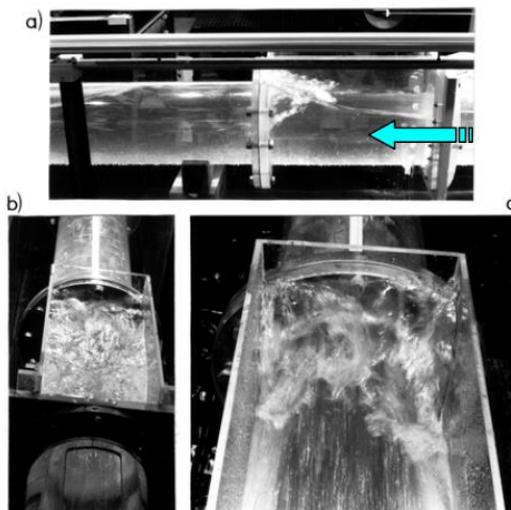
Ecuación 29

La investigación encontró que la relativa onda de amplitud $[(h_s-h_0)/h_0]$ aumenta cuadráticamente a medida que se incrementa la relación de llenado y el número de Froude del flujo de entrada. Así mismo se encontró que el radio $[(h_s-h_0)/D]$ depende exclusivamente del número de Froude calculado para la condición de tubería presurizada ($\gamma=1$).

Los experimentos mostraron que para relaciones de llenado superiores al 75% ($\gamma_0 > 0,75$) no se conservaba un flujo a superficie libre. A su vez, nunca se presentó ahogamiento de la tubería para relaciones de llenado menores al 70% ($\gamma_0 < 0,70$).

Como conclusión general la investigación encontró que para cámaras de paso continuo que exceden relaciones de llenado del 75% se presenta una interrupción del régimen de flujo supercrítico. En la Foto 1 se observa el ahogamiento de la tubería de salida de la cámara.

Foto 1. Ahogamiento de la estructura de salida de la cámara para $\gamma_0=0,75$ y $F_0=1,30$ (a) perfil, (b) vista superior, (c) flujo de impacto en detalle.



Tomado de: (Hager & Gissoni, Supercritical Flow in Sewer Manholes, 2005).



Cámara con curvatura

La investigación tomó un interés particular en las cámaras con deflexiones de 45° y 90° y con un radio de curvatura promedio igual a tres veces el diámetro de la tubería. Allí se encontró la presencia de dos ondas a lo largo de las paredes internas y externas de la cámara. La onda con máxima altura (h_M) desarrollada a lo largo de la pared externa y la onda de altura mínima (h_m) ubicada en la pared interna.

En los análisis llevados a cabo Hager y Gissoni encontraron que los diseños estándar para cámaras con deflexiones de 45°, donde la pared de la cámara termina al final de la deflexión, reduce significativamente la capacidad de descarga de la estructura. Para mejorar esta capacidad los investigadores añadieron una extensión recta aguas abajo de la curvatura de longitud $2D$. Basados en experimentaciones sobre el modelo descubrieron que esta adición en la cámara incrementaba significativamente su capacidad de descarga porque la onda producida en la pared externa se reduce antes de entrar a la tubería de salida. En la Ilustración 3 se muestra el diseño de una cámara de curvatura mejorada con la extensión.

En la Ecuación 29 se muestra la capacidad de descarga de cámaras con deflexiones de 45° y 90° modificadas determinada experimentalmente por los investigadores en el 2002.

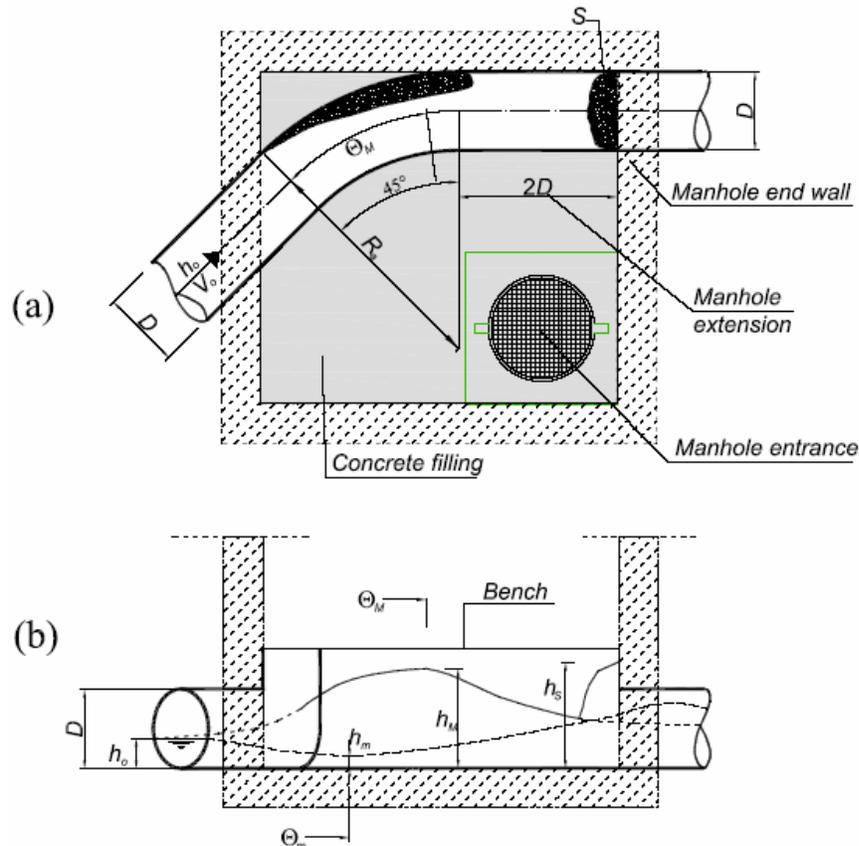
$$F_c = (3 - 2y_0) * y_0^{3/2}, \text{ para } y_0 < 2/3$$

Ecuación 30

Cabe anotar que el flujo a través de la cámara con curva deja de tener régimen supercrítico cuando la profundidad del flujo de aproximación es mayor a $(2/3) D$, en comparación con $(3/4) D$ para cámaras de paso continuo.



Ilustración 3. Cámara de curvatura mejorada con extensión (a) planta, (b) perfil.



Tomado de: (Hager & Gissoni, Supercritical Flow in Sewer Manholes, 2005).

Cámaras de unión

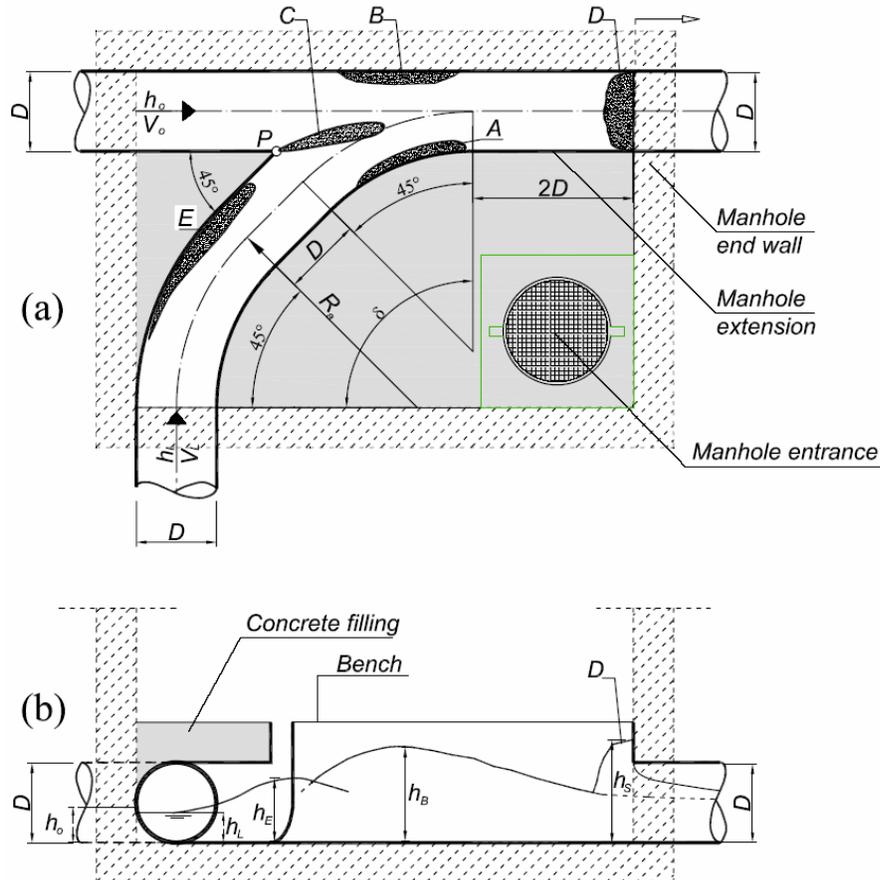
Las cámaras de unión pueden ser consideradas como un intermedio entre las cámaras de paso continuo y las de curvatura. Aunque se espera que la capacidad de descarga de este tipo de cámaras sea mayor a las de curvatura, la estructura del flujo en la cámara es muy diferente a los otros dos tipos. Dependiendo la descarga en sus conexiones de entrada, se puede observar cuatro tipos de ondas de choque generadas en la estructura. La Ilustración 4 muestra la ubicación de estas ondas de choque.

- **Onda A:** se presenta en descargas laterales pequeñas dado el impacto del flujo en la pared lateral interna.
- **Onda B:** se produce por el impacto del flujo lateral en la pared opuesta de la cámara, es comparable a la onda producida en las cámaras con curva.

- **Onda C:** se encuentra ubicada desde el punto de unión de los dos flujos y se presenta por la interacción entre ellos.
- **Onda D:** ubicada a la salida de la cámara, es causada por el choque del flujo con la pared final de la cámara.
- **Onda E:** al igual que la cámara de curva, esta onda se forma a lo largo de la pared exterior de la tubería lateral.

Considerando que las ondas A y C son siempre menores que la onda B, los investigadores solo tuvieron en cuenta las ondas B y D para el diseño de estas estructuras.

Ilustración 4. Cámara de unión (a) vistas en planta con ondas de choque A, B, C, D y E (b) perfil.



Tomado de: (Hager & Gissoni, Supercritical Flow in Sewer Manholes, 2005).

En comparación a los otros dos tipos de cámara, el número de Froude fue relevante para las cámaras de unión. La altura de la onda B para las cámaras de unión de 45° y 90°, se encontró



que era independiente del número de Froude del flujo directo, pero dependiente del número de Froude del flujo lateral. La Ecuación 31 muestra esta relación.

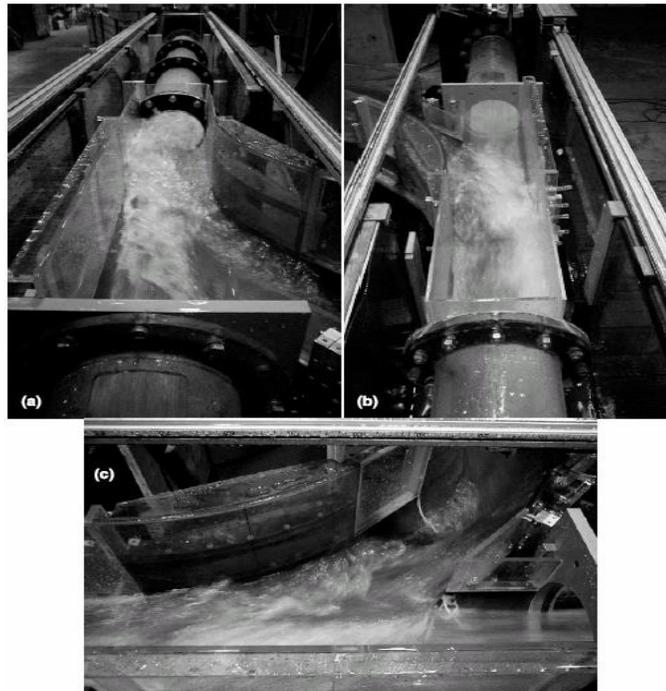
$$\frac{h_B}{h_L} = 1 + \left(\frac{8}{7}\right) (F_L - 1) \quad \text{Ecuación 31}$$

La altura de la onda de choque D (h_s) fue determinada para números de Froude de la tubería lateral mayores a 1. La Ecuación 32 muestra esta relación.

$$\frac{h_s}{h_L} = 1 + C_\delta * F_L \quad \text{Ecuación 32}$$

donde, $C_\delta = 1$ para unión de flujos a 45° ; y $C_\delta = 2/3$ para unión de flujos a 90° . A partir de estas ecuaciones los investigadores sugieren que se debe determinar la altura de la cámara de unión. En las Fotos 2 y 3 se puede observar un comportamiento típico del flujo supercrítico en una cámara de unión a 45° .

Foto 2. Comportamiento del flujo supercrítico en cámara de unión con ondas de choque B y D para $y_0=y_L=0,27$, $F_0=5,95$ y $F_L=2,84$ (a) vista aguas arriba, (b) vista aguas abajo, (c) vista en planta.

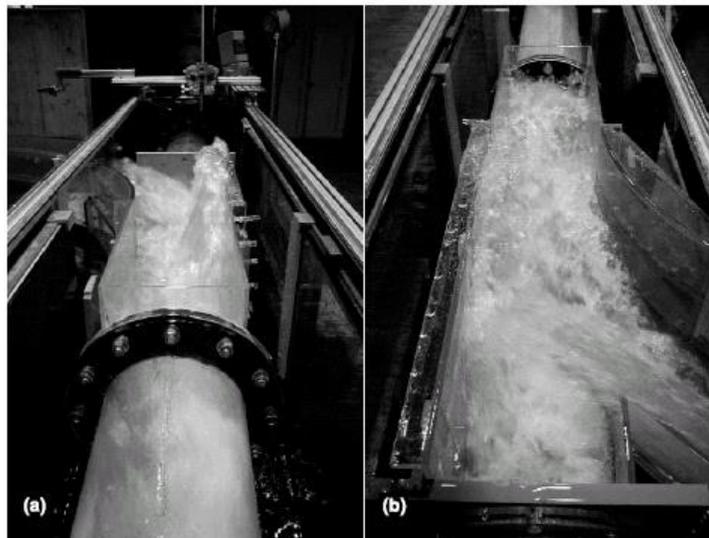


Tomado de: (Hager & Gissoni, Supercritical Flow in Sewer Manholes, 2005).

Otro tema relevante, es la abrupta transición de flujo supercrítico a flujo subcrítico que puede producirse en la cámara. Una vez se ha alcanzado la capacidad hidráulica de la estructura pueden ocurrir dos tipos diferentes de fenómenos:

1. Ahogamiento a la salida de la cámara: dado que no se puede conservar un régimen de flujo supercrítico en la cámara.
2. Ahogamiento en una o dos tuberías de entrada a la cámara: cuando el flujo lateral es dominante sobre el flujo directo se produce un resalto hidráulico resultando en un flujo presurizado aguas abajo no deseado.

Foto 3. Ahogamiento en la salida de la cámara de unión para $y_0=y_L=0,34$, $F_0=4,19$, $FL=4$ (a) Aguas abajo, (b) Aguas arriba.



Tomado de: (Hager & Gissoni, Supercritical Flow in Sewer Manholes, 2005).

Según los autores, la capacidad de descarga de una cámara de unión depende del número de tuberías de entrada en operación. Para flujo supercrítico en ambas tuberías, encontraron que la capacidad en el número de Froude $F_c=Q_c/(gD^5)^{1/2}$ varía esencialmente con el número de Froude y la relación de llenado aguas arriba y ligeramente por la relación de las profundidades de entrada ($\eta=h_o/h_L$). La Ecuación 33 muestra el cálculo para la capacidad del número de Froude.

$$F_c = 0,60 * F_0 * y_0 * \eta^{0,2} \text{ para } y_L \leq 0,075F_0 \quad \text{Ecuación 33}$$



Resultados

El estudio concluyó que las cámaras deberían estar diseñadas para mantener un régimen de flujo supercrítico a lo largo de toda su estructura. El cambio de flujo a superficie libre en flujo de dos fases (aire- agua) puede resultar en un complejo y peligroso fenómeno que hasta entonces no puede ser modelado.

Así mismo, concluyeron que las cámaras de flujo supercrítico están gobernadas por la presencia de ondas de choque una vez ocurra un cambio en los parámetros geométricos e hidráulicos del flujo, que incluyen (1) cambio de la sección circular por sección en forma de “U”, (2) cambio de dirección de la tubería lateral a la tubería de salida y (3) un aumento en la descarga de flujo lateral en cámaras de unión. Estas ondas pueden llegar a ser tan altas que impactan la conexión de salida, produciendo así, un resalto hidráulico que obstruye el paso de aire a la tubería de salida.

Por último encontraron que de los tres tipos de cámaras analizadas la cámara de curva tiene la menor capacidad de descarga, siendo duplicada por la cámara de unión y triplicada por la capacidad de descarga de la cámara de paso continuo.

2.1.5. COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE CÁMARAS (POZOS) DE CONEXIÓN DE GRANDES COLECTORES Por E. Quejada, M. Moreno y J. G. Saldarriaga (2010)

Esta investigación tuvo por objetivo determinar las características del flujo e identificar los diferentes fenómenos hidráulicos que se pueden presentar en las cámaras de unión de grandes interceptores, para diferentes configuraciones de fondo y teniendo en cuenta la transitoriedad de los flujos de acceso. Además, tuvieron como objetivo secundario analizar las pérdidas de energía que se producen en estas estructuras.

El modelo físico utilizado se basó en la estructura de conexión de los nuevos grandes interceptores de Bogotá, más específicamente modelaron la estructura de conexión de los interceptores Fucha-Tunjuelo (IFT), Tunjuelo bajo (ITB), con el interceptor de salida, denominado interceptor Tunjuelo-Canoas (ITC). Los interceptores IFT e ITB son de gran importancia en el sistema de drenaje de la ciudad debido a que estos deben desviar las aguas residuales de las cuencas del río Fucha y el río Tunjuelo (dos de las cuencas urbanas más importantes de la ciudad de Bogotá), antes de su vertimiento al río Bogotá. El ITC conduce esta agua hasta la futura planta de tratamiento de aguas residuales de Canoas, localizada al sur occidente de Bogotá, fuera de la ciudad.

Metodología

La estructura de conexión e interceptores modelados consiste de dos túneles o interceptores de gran diámetro (IFT e ITB) llegando a la estructura de conexión y confluyendo a 45°. La Foto 4 muestra el modelo utilizado.

Foto 4. Modelo físico de la estructura de conexión e interceptores.



Tomado de: (Quejada, Moreno, & Saldarriaga, 2010).

Como se muestra en la foto anterior el modelo físico está construido en acrílico y posee una escala 1:16 del sistema previamente descrito. Las dimensiones del modelo fueron definidas con base en el criterio de similitud de Froude. En la Tabla 2 se puede observar las escalas de similitud utilizadas. En la Tabla 3 se observan las dimensiones finales de los interceptores y cámara de confluencia tanto para el modelo físico, como para el prototipo.


Tabla 2. Escalas de similitud bajo el criterio de similitud de Froude.

Variable	Relación	Escala
Longitud (E_L)	E_L	16
Área (E_L^2)	E_L^2	256
Volumen (E_L^3)	E_L^3	4096
Tiempo (E_t)	$\sqrt{E_L/E_g}$	4
Velocidad (E_v)	$\sqrt{E_L E_g}$	4
Caudal (E_Q)	$\sqrt{E_L^5 E_g}$	1024
Fuerza (E_F)	$E_L^3 E_g$	4096
Presión (E_p)	$E_L E_g$	16
Pendiente (E_S)	1	1

Tomado de: (Quejada, Moreno, & Saldarriaga, 2010).

Tabla 3. Dimensiones del modelo y prototipo.

Variable		Modelo	Prototipo
IFT	Diámetro	0,234 m	3,75 m
	Pendiente	0,05 %	0,05 %
	Longitud	9,7 m	155,0 m *
	Caída de fondo	0,084 m	1,35 m
	Caudal de diseño	20,34 L/s	20,829 m ³ /s
ITB	Diámetro	0,172 m	2,75 m
	Pendiente	0,125 %	0,125 %
	Longitud	2,5 m	40,0 m *
	Caída de fondo	0,089 m	1,43 m
	Caudal de diseño	12,43 L/s	12,726 m ³ /s
ITC (Salida)	Diámetro	0,263 m	4,20 m
	Pendiente	0,112 %	0,112 %
	Longitud	2,70 m	43,2 m *
	Caída de fondo	0,0 m	0,0 m
	Caudal de diseño	31,68 L/s	32,442 m ³ /s
Cámara (Pozo)	Diámetro	1,25 m	20,0 m
	Altura	1,20 m	19,2 m

Tomado de: (Quejada, Moreno, & Saldarriaga, 2010).



En la realización del análisis hidráulico los investigadores definieron cuatro configuraciones diferentes del fondo de la estructura de conexión, así:

1. Configuración de fondo plano
2. Cañuela de banca completa
3. Cañuela de media banca
4. Modificaciones de la configuración 2.

Con base en los caudales de diseño de los interceptores, presentados en la tabla anterior, los investigadores establecieron diversos escenarios de flujo combinado entre los interceptores que llegan a la estructura de conexión: caudal máximo (caudal de diseño), caudal medio (la mitad del caudal de diseño en cada interceptor) y caudal mínimo (caudal mínimo de operación), en la Tabla 4 se puede observar los escenarios analizados para las configuraciones de fondo 1 y 2.

Tabla 4. Escenarios de caudal para las configuraciones 1 y 2.

Configuración 1			Configuración 2		
Escenario	Interceptor 1	Interceptor 2	Escenario	Interceptor 1	Interceptor 2
1	Q_{MED}	Q_{MED}	15	Q_{MAX}	Q_{MAX}
2	Q_{MAX}	Q_{MAX}	16	Q_{MAX}	-
3	Q_{MAX}	-	17	-	Q_{MAX}
4	-	Q_{MAX}	18	Q_{MED}	Q_{MED}
5	Q_{MED}	-	19	Q_{MAX}	Q_{MED}
6	-	Q_{MED}	20	Q_{MED}	Q_{MAX}
7	Q_{MAX}	Q_{MED}	21	Q_{MED}	-
8	Q_{MED}	Q_{MAX}	22	-	Q_{MED}
9	Q_{MIN}	Q_{MIN}	23	Q_{MIN}	Q_{MIN}
10	Q_{MED}	Q_{MIN}	24	Q_{MED}	Q_{MIN}
11	Q_{MIN}	Q_{MED}	25	Q_{MIN}	Q_{MED}
12	-	Q_{PRES}	26	Q_{MIN}	Q_{MAX}
13	Q_{PRES}	-	27	Q_{MAX}	Q_{MIN}

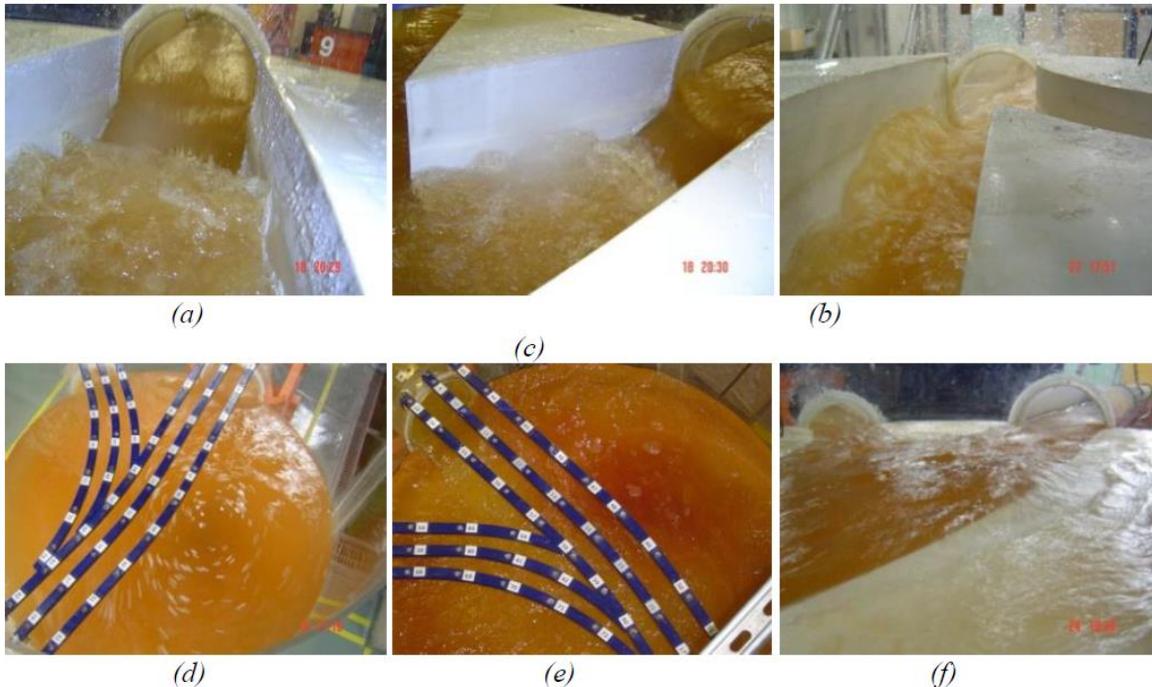
Tomado de: (Quejada, Moreno, & Saldarriaga, 2010).

Resultados

En el modelo físico se evidenciaron los siguientes fenómenos: 1) Resaltos hidráulicos tanto en la estructura de confluencia como en el interior de los colectores, 2) Ondas de choque en la estructura de conexión, 3) Flujo tipo vórtice al interior de la estructura de conexión, 4) Zonas muertas o de estanqueidad en la estructura de conexión, 5) Desbordamiento del flujo en

cañuelas de la estructura de conexión, 6) Sumergimiento o remanso del flujo de entrada a la cámara. En la Foto 5 se puede observar los fenómenos encontrados.

Foto 5. Fenómenos hidráulicos: (a) y (b) resaltos hidráulicos, (c) onda de choque, (d) Flujo tipo vórtice, (e) zonas de estanqueidad, (f) desbordamiento del flujo y remanso del flujo de entrada.



Tomado de: (Quejada, Moreno, & Saldarriaga, 2010).

Los investigadores encontraron que en la configuración de fondo plano (sin cañuela) se presentaron zonas muertas o de estanqueidad, zonas donde había flujo de tipo vórtice y para algunas combinaciones de caudal en los colectores de entrada se presentó un efecto de remanso.

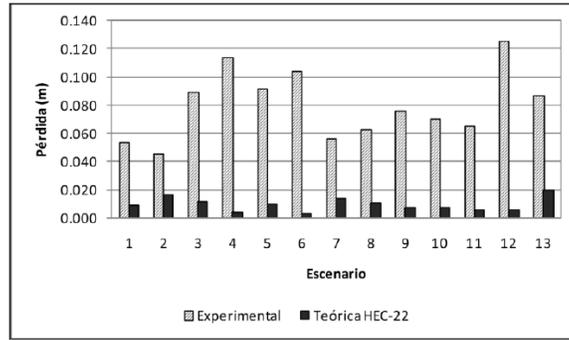
Para la configuración de cañuela de banca completa y la configuración 4 (modificación de la cañuela) observaron la presencia de resaltos hidráulicos y ondas de choque en la estructura de conexión, además, se presentó un efecto de remanso en algunos escenarios.

En el caso de configuración de cañuela a media banca se encontraron los mismos fenómenos que en las configuraciones 2 y 4, además de presentarse desbordamiento del flujo desde la cañuela.

En cuanto a las pérdidas de energía los experimentos llevados a cabo mostraron una gran variación en comparación a las pérdidas de energía teóricas (método HEC-22). En las Gráficas 12 y 13 se pueden observar estos resultados para las configuraciones 1 y 2, respectivamente.

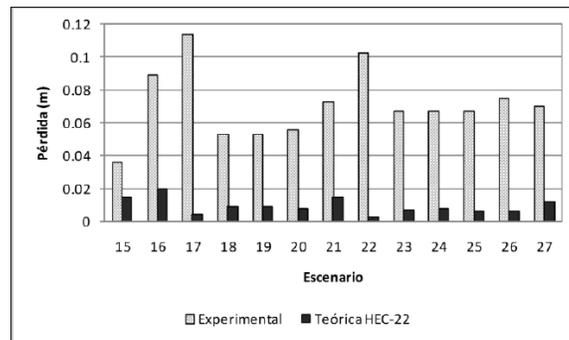


Gráfica 12. Pérdidas de energía en el modelo de la estructura de confluencia. Configuración 1.



Tomado de: (Quejada, Moreno, & Saldarriaga, 2010).

Gráfica 13. Pérdidas de energía en el modelo de la estructura de confluencia. Configuración 2.

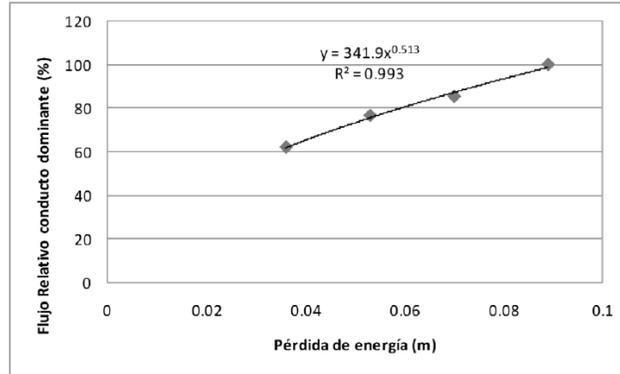


Tomado de: (Quejada, Moreno, & Saldarriaga, 2010).

En general, para los diferentes escenarios se encontró que el interceptor IFT dominó la hidráulica de la estructura debido al mayor momentum, influenciando el sumergimiento del flujo de llegada del interceptor dos en algunos escenarios. También, encontraron que cuando el conducto se hace claramente dominante, empleando el criterio del mayor momentum, la correlación entre el flujo relativo y las pérdidas de energía en la estructura de conexión se incrementa notablemente. En la Gráfica 14 se observa esta correlación.



Gráfica 14. Relación entre pérdidas de energía del modelo y flujo relativo del conducto dominante.



Tomado de: (Quejada, Moreno, & Saldarriaga, 2010).

La presencia de caídas de flujo en los interceptores de llegada con respecto al fondo de la cámara, actúa en algunos escenarios como un control hidráulico, generando el cambio de régimen subcrítico a régimen supercrítico. Para otros escenarios la hidráulica en la cámara es gobernada por la profundidad normal en el interceptor de salida, induciendo que para los interceptores de llegada exista un flujo de entrada sumergida a la cámara, sin llegar a presurizarse.

Discusión

El no tener cañuela (configuración 1) genera que la profundidad del agua ascienda uniformemente en toda la superficie del pozo, actuando como una piscina de disipación; esto evita la formación de resaltos hidráulicos y de ondas de choque, además, de presentarse una continuidad del flujo en condiciones subcríticas en cualquier escenario. Sin embargo, las zonas de estanqueidad y flujo tipo vórtice favorece la acumulación de sedimentos y otros contaminantes, lo que podría implicar mayores costos de mantenimiento y tratamiento de las aguas residuales.

Las configuraciones con cañuela contribuyen a la autolimpieza de los contaminantes y sedimentos en la estructura de conexión; sin embargo, estas configuraciones permiten la presencia de resaltos hidráulicos y ondas de choque lo que representa un daño potencial para la estructura y un aumento de la abrasión, teniendo en cuenta además la gran diversidad de objetos que pueden estar mezclados en el agua drenada. Así mismo, la propagación de ondas aguas abajo puede ser perjudicial para el sistema y sus estructuras y dependiendo de las características del agua estos fenómenos aumentarían la liberación de malos olores y gases corrosivos.

En todos los experimentos llevados a cabo las pérdidas de energía teóricas subestiman las pérdidas de energía calculadas experimentalmente. La metodología HEC-22 fue la que arrojó mejores resultados pero manteniendo considerables diferencias con las pérdidas de energía



calculadas experimentalmente. En algunas pruebas se alcanzaron errores en la pérdida de hasta 0,12 m y mínimo de 0,02 m en el modelo físico, que en la escala del prototipo serían de 1,92 m y 0,32 m, respectivamente.

Conclusiones

Los autores llegaron a la conclusión de que el comportamiento hidráulico de estructuras de conexión es función de la variabilidad y combinación de los caudales de confluencia, de las condiciones topológicas de las tuberías de llegada y de la configuración del fondo de la estructura; además, de la influencia de las condiciones hidráulicas aguas debajo de la estructura.

Igualmente determinaron que el coeficiente de pérdidas de energía en la cámara no es constante y depende de las características de los flujos de aproximación y condiciones geométricas del pozo. Por lo tanto recomiendan tener un especial cuidado en su cálculo, porque aunque se tuvieran condiciones de flujo permanente la pérdida de energía no pudo determinarse adecuadamente con metodologías convencionales, presentándose en este caso una tendencia a la subestimación.

Cuando se tienen valores altos de momentum, con valores de flujo relativamente altos en el conducto hidráulicamente dominante, la relación entre las pérdidas de energía y el flujo relativo en el conducto dominante se hace mayor, existiendo una alta correlación entre estos parámetros.

Los autores recomiendan la opción de fondo plano en la cámara en casos donde exista caída de los flujos de entrada a la cámara, para evitar cambio de régimen y formación de ondas de choque y resaltos hidráulicos, si el efecto de estos resaltos no es evaluado para grandes interceptores (>610 mm), como lo recomienda ASCE, 2007.

Debido a la escala seleccionada para el modelo físico, estos resultados pueden ser extendidos al caso de cámaras y colectores comúnmente encontrados en sistemas de alcantarillado reales.

Por último, los autores sugieren que el planteamiento de una ecuación genérica para el cálculo de las pérdidas de energía debe considerar la no permanencia del flujo y por lo tanto la variabilidad en la localización de controles hidráulicos, ya que no necesariamente el caudal de diseño produce la condición hidráulica más desfavorable en la cámara.

2.1.6. Hydraulics of Circular Drop Manholes

por F. Granata, G. de Marinis, R. Gargano y W. Hager (2011)

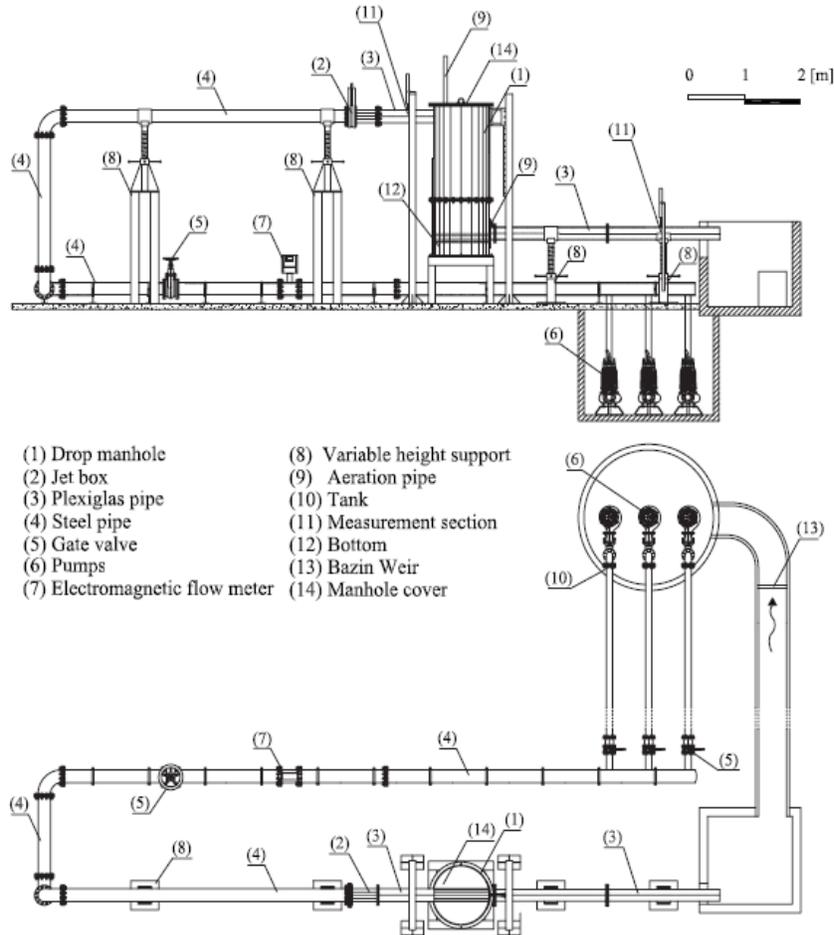
Posteriormente, en el 2011, se realizó un artículo sobre cámaras circulares de caída. Este estudio estuvo motivado por las pobres condiciones hidráulicas que presentan estas estructuras en los sistemas de drenaje urbano. En la siguiente ilustración y foto se puede observar el montaje utilizado con su distribución espacial.

Foto 6. Montaje de cámara circular de caída (a) vista lateral (b) cámara del modelo.



Tomado de: (Granata, De Marinis, Gargano, & Hager, 2011)

Ilustración 5. Esquema del montaje.



Tomado de: (Granata, De Marinis, Gargano, & Hager, 2011)

Patrones de flujo

El comportamiento hidráulico de una cámara de caída depende fuertemente de la localización del chorro de impacto al interior de la cámara. Chanson en el 2002 describió tres patrones básicos de flujo para una cámara de caída rectangular, denominados regímenes de flujo R1, R2 y R3, para flujos de aproximación subcrítico. Esta clasificación se extendió al proyecto y teniendo en cuenta efectos adicionales presentes en las cámaras de caída se definieron los siguientes regímenes:

- Régimen R1:** ocurre con caudales pequeños, con el chorro de impactando en la piscina.



- **Régimen R2:** incluye condiciones en donde el chorro impacta en la zona de salida de la cámara.
- **Régimen R2a:** el chorro de caída impacta la zona entre la base de la cámara y la salida de esta. Una parte del flujo cae directamente en la tubería de salida y el resto del flujo impacta en la piscina de la cámara generando turbulencia en el eje del chorro. Dos ondas laterales permanentes son generadas cerca a la salida de la cámara.
- **Régimen R2b:** ocurre si la totalidad del chorro de caída golpea sobre la tubería de salida. La mayoría del flujo es conducido directamente a la tubería de salida, resultando en una menor disipación de energía y una alta velocidad aguas abajo.
- **Régimen R2c:** cuando parte del chorro de caída impacta la pared lateral de la cámara ubicada arriba de la tubería de salida, mientras el resto del chorro es evacuado directamente en la tubería de salida. Este régimen se caracteriza por altas velocidades aguas abajo e introducción de grandes cantidades de aire. La parte inferior de la piscina no se mezcla y la superficie libre es menos ondulante que en régimen R2a.
- **Régimen R3:** ocurre si el chorro impacta la pared opuesta de la cámara.
- **Régimen R3a:** en este la gravedad afecta el flujo generando un velo de agua vertical antes del impacto.
- **Régimen R3b:** establecido para flujo con un número de Froude elevado y con un chorro de agua extendiendo radialmente por encima de las paredes de la cámara.

Estos regímenes de flujo se caracterizan por el número de impacto, I , definido en la siguiente ecuación.

$$I = \left(\frac{2s}{g}\right)^{0,5} * \frac{v_0}{D_M}$$

Ecuación 34

donde, s es la altura de caída, g la aceleración de la gravedad y v_0 la velocidad del flujo de aproximación. Este parámetro caracteriza los regímenes para flujo supercrítico porque describe la diferencia entre la localización del chorro horizontal y el diámetro de la cámara. Los datos recopilados en el presente trabajo indicaron que el régimen de transición puede ser aproximado como $I \approx 0,6$ entre R1 y R2, $I \approx 0,95$ entre R2 y R3a, $I \approx 1,5$ entre R3a y R3b.



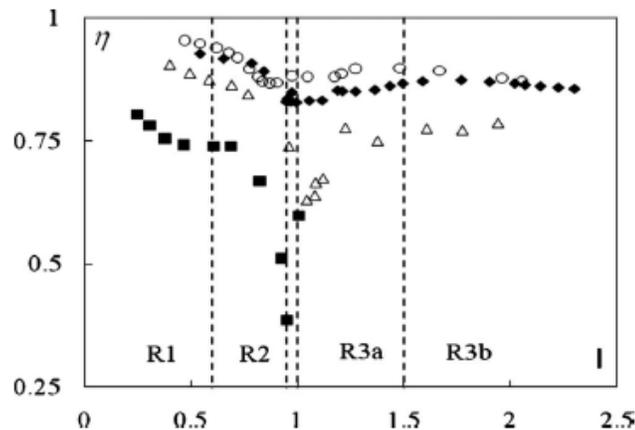
Disipación de energía

La Gráfica 15 muestra resultados típicos de la pérdida de energía relativa definida en la siguiente ecuación.

$$\eta = \frac{H_0 - H_d}{H_0}$$

Ecuación 35

Gráfica 15. Pérdida de energía relativa versus I.



Tomado de: (Granata, De Marinis, Gargano, & Hager, 2011).

Donde, H es la altura de energía total ($H=s+h+ v^2/2g$). Para cada régimen de flujo se puede describir su tendencia de pérdida relativa de energía. El régimen R1 se caracteriza por una gran pérdida de energía con un flujo de aproximación con número de Froude cercano a 1, poca energía cinética en comparación a la altura de caída y η cercano a 0,9. Para el régimen R2, η decrece notablemente alcanzando su valor mínimo en la transición de R2 a R3. En el régimen R3a, la pérdida de energía aumenta con I. En general se observó que cuando I crece, η decrece.

Coefficiente de pérdidas

En el diseño de sistemas de drenaje, la pérdida de energía local inducida por una cámara de caída es generalmente estimada independientemente del régimen de flujo, mediante la siguiente ecuación.

$$\Delta H = K \frac{v_0^2}{2g}$$

Ecuación 36

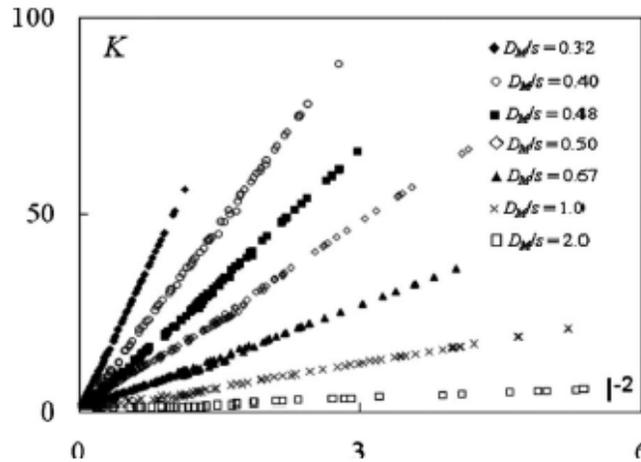


donde el coeficiente de pérdidas K depende del número de impacto I en el rango $0 < I^2 < 6$ como

$$K = \alpha * I^{-2}$$

Ecuación 37

Gráfica 16. Coeficiente de pérdida K versus I^2 .



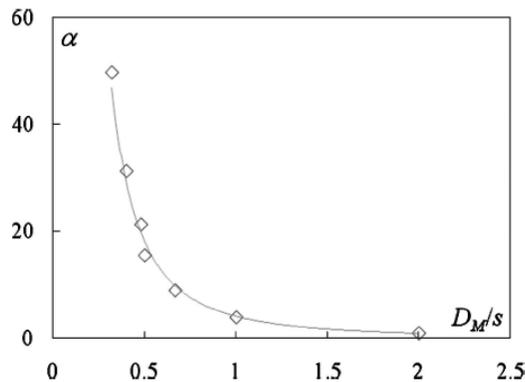
Tomado de: (Granata, De Marinis, Gargano, & Hager, 2011)

La ecuación anterior expresa la característica hidráulica principal de las cámaras de caída. El coeficiente α depende en la diferencia D_M/s como:

$$\alpha = 4,13 \left(\frac{D_M}{s} \right)^{-2,13}$$

Ecuación 38

Gráfica 17. Coeficiente α versus D_M/s .



Tomado de: (Granata, De Marinis, Gargano, & Hager, 2011).



Estas ecuaciones conllevan a determinar un valor promedio de K para condiciones de operación típicas en cámaras de caída. Su cálculo se puede observar en la Ecuación 39.

$$K = 2,06 \left(\frac{s^{1,13}}{D_M^{0,13}} \right) * \left(\frac{g}{v_0^2} \right) \quad \text{Ecuación 39}$$

Resultando en un promedio de pérdida de altura relativa de,

$$\frac{\Delta H}{s} = 1,03 \left(\frac{s}{D_M} \right)^{0,13} \quad \text{Ecuación 40}$$

La última ecuación indica que la pérdida de altura de energía en una cámara de caída es mayor que la altura de caída si $s > D_M$, incluso si la pérdida de energía real depende de las condiciones de operación de la cámara.

Christodoulou en 1991, evaluó el coeficiente de pérdidas como función del parámetro de caída $D = (gs)^{0,5} / v_0$; el obtuvo la siguiente relación

$$K = 0,20 + 2,30 * D^{2,25} \text{ para } 0 < D < 1,5 \quad \text{Ecuación 41}$$

Con los datos encontrados en esta investigación la relación se determinó como,

$$K = 0,25 + 2 * D^2 \text{ para } 0 < D < 8 \quad \text{Ecuación 42}$$

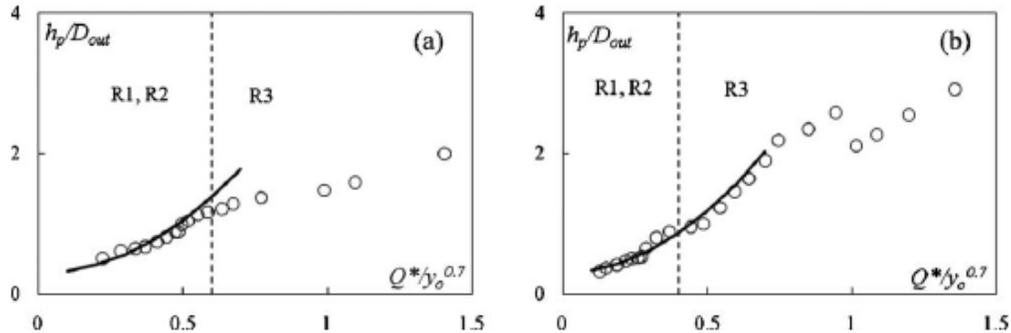
Altura de la piscina de la cámara

La investigación demostró experimentalmente que para regímenes R1 y R2 la relación h_p/D_{out} , siendo h_p la altura de la piscina depende de la diferencia $Q^*/y_0^{0,7}$, donde $Q^* = Q/(gD_{out}^5)^{0,5}$. La Gráfica 18 y Ecuación 43 muestran esta relación.

$$\frac{h_p}{D_{out}} = 0,3 + \left(1 + \frac{s}{D_M} \right) * (Q^{*2}/y_0^{1,4}) \quad \text{Ecuación 43}$$



Gráfica 18. Altura de la piscina en la cámara h_p/D_{out} versus $Q^*/y_0^{0,7}$ para (a) $DM=1m$, $s=2m$ y lámina de 45%; (b) $DM=0,48m$, $s=1m$ y lámina de 80%.



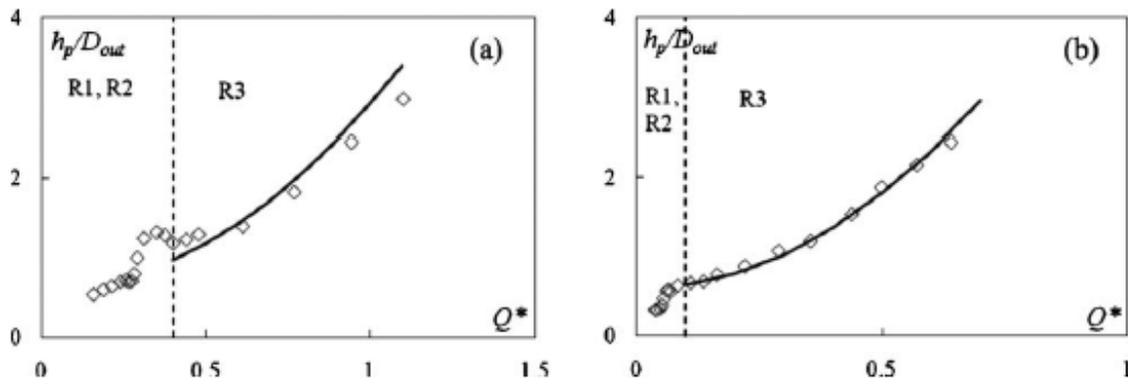
Tomado de: (Granata, De Marinis, Gargano, & Hager, 2011).

Si la cámara opera bajo régimen R3, el flujo de salida de la cámara es similar a un flujo por orificio. Consideraciones de energía permiten determinar la relación mostrada en la Ecuación 44.

$$\frac{h_p}{D_{out}} = 0,6 + \left(7,3 - \frac{D_M}{D_{out}}\right) * Q^{*2} \quad \text{Ecuación 44}$$

De la ecuación anterior se puede inferir que la altura relativa de la piscina depende del caudal y la relación D_M/D_{out} y no de la relación de llenado del flujo de aproximación.

Gráfica 19. Altura de la piscina en la cámara h_p/D_{out} versus $Q^*/y_0^{0,7}$ para (a) $DM=1m$, $s=1,5m$ y lámina de 40%; (b) $DM=0,48m$, $s=1,5m$ y lámina de 85%.



Tomado de: (Granata, De Marinis, Gargano, & Hager, 2011).

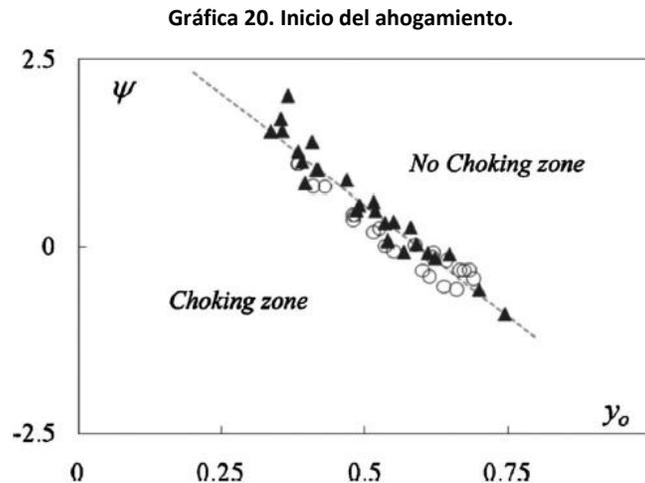


Ahogamiento del flujo

Los experimentos probaron que el ahogamiento del flujo aguas abajo de la cámara es afectado por el número de Froude (F_0) y la relación de llenado (y_0) del flujo de aproximación aguas arriba. Así mismo, un análisis de los datos demostró que se puede predecir el ahogamiento mediante el parámetro $\psi = y_0[F_{och} - (h_p/D_{out})]$, donde F_{och} es igual al número de Froude del flujo de aproximación al inicio del ahogamiento. La Gráfica 20 muestra los valores de ψ versus y_0 . La ecuación ajustada a esta relación se muestra en la Ecuación 45.

$$\varphi_{ch} = -5,9y_0 + 3,5 \text{ entre } 0,3 < y_0 < 0,75$$

Ecuación 45



Tomado de: (Granata, De Marinis, Gargano, & Hager, 2011).

Atrapamiento de aire

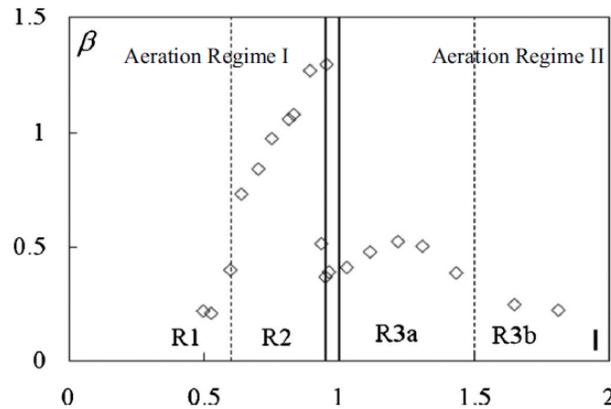
Este fenómeno depende esencialmente del régimen de operación de la cámara. Entre los mecanismos que pueden ocurrir se encuentran:

- Atrapamiento por caída de chorro.
- Hundimiento del chorro en la piscina, si el chorro no impacta las paredes de la cámara.
- Mecanismo de atrapamiento dado el velo de agua alrededor de la pared de la cámara.
- Atrapamiento dado las gotas originadas durante el impacto del chorro en la pared de la cámara.
- Atrapamiento superficial en la piscina de la cámara y en el flujo supercrítico aguas abajo.



A pesar de la existencia de estos mecanismos solo una porción del aire entrante es transportado al interior de la tubería de salida de la cámara; esta porción representa por ende la demanda actual de aire de la cámara. La Gráfica 21 muestra resultados típicos de la demanda de aire de la cámara, donde la relación $\beta = Q_{air}/Q$ es graficada versus I .

Gráfica 21. Demanda relativa de aire β versus I .



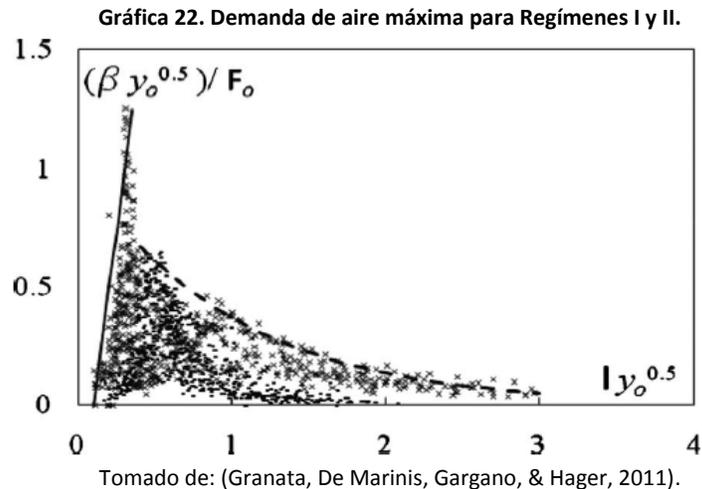
Tomado de: (Granata, De Marinis, Gargano, & Hager, 2011).

Para estimar la demanda máxima de aire bajo todas las posibles condiciones de operación, un análisis de los datos indicó que el valor máximo depende de dos parámetros $Iy_0^{0,5}$ y $\beta y_0^{0,5}/F_0$. La Gráfica 22 muestra que la máxima demanda de aire para régimen I se ajusta a la Ecuación 46.

$$\left(\frac{\beta y_0^{0,5}}{F_0}\right)_{max} = 5Iy_0^{0,5} - 0,5 \quad \text{para } Iy_0^{0,5} < 4 \quad \text{Ecuación 46}$$

Para régimen II los datos se ajustan a la Ecuación 47.

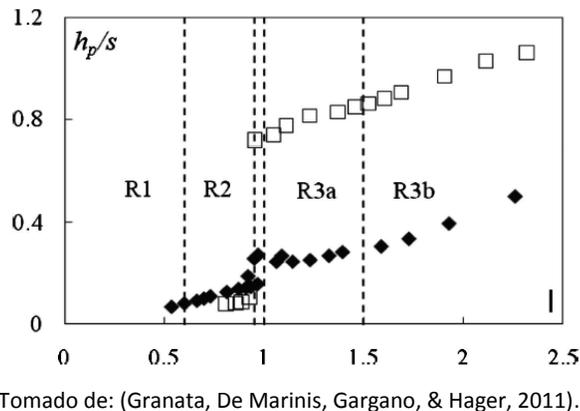
$$\left(\frac{\beta y_0^{0,5}}{F_0}\right)_{max} = \exp(-I * y_0^{0,5}) \quad \text{entre } 0,4 < Iy_0^{0,5} < 3 \quad \text{Ecuación 47}$$



Ausencia de aireación

El desempeño de las cámaras de caída puede ser bastante influenciado por el suministro de aire. Si la entrada y transporte de aire en la tubería de salida no es suministrada desde la atmósfera, se puede genera una presión manométrica negativa al interior de la cámara, induciendo por lo tanto un incremento abrupto de la profundidad de la piscina. Para alturas de caída pequeñas ($1 \leq h_p/s$), la piscina aumenta por encima de la tubería de entrada a la cámara induciendo un estancamiento del agua en la tubería de aproximación a la cámara. En la Gráfica 23 se puede observar el efecto de la ausencia de suministro de aire en la altura relativa de la piscina de disipación.

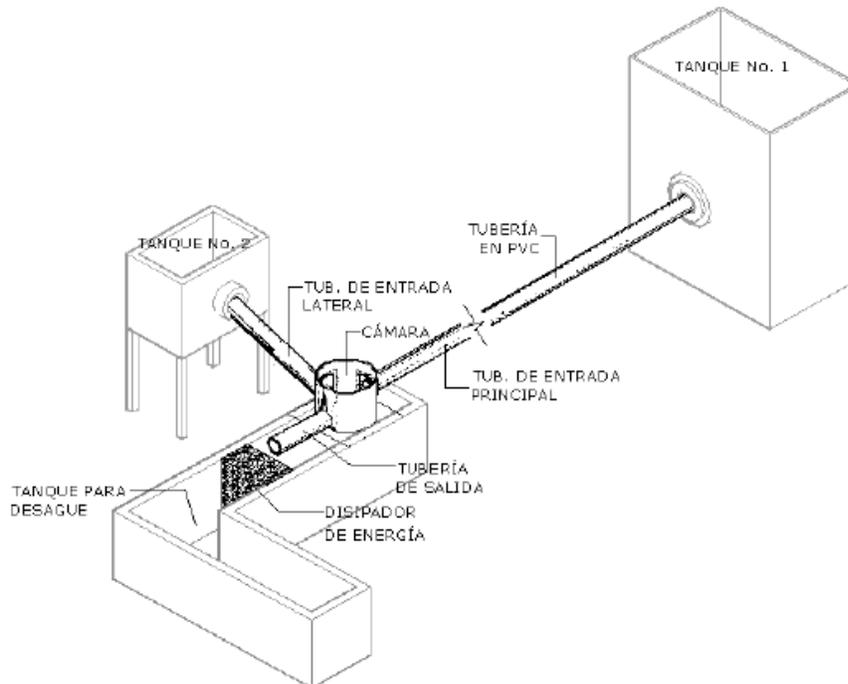
Gráfica 23. Efecto de la ausencia de suministro de aire en la altura relativa de la piscina.



2.1.7. COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE CÁMARAS DE INSPECCIÓN BAJO CONDICIONES DE FLUJO SUPERCRÍTICO por N. Bermúdez y J.G. Saldarriaga (2011)

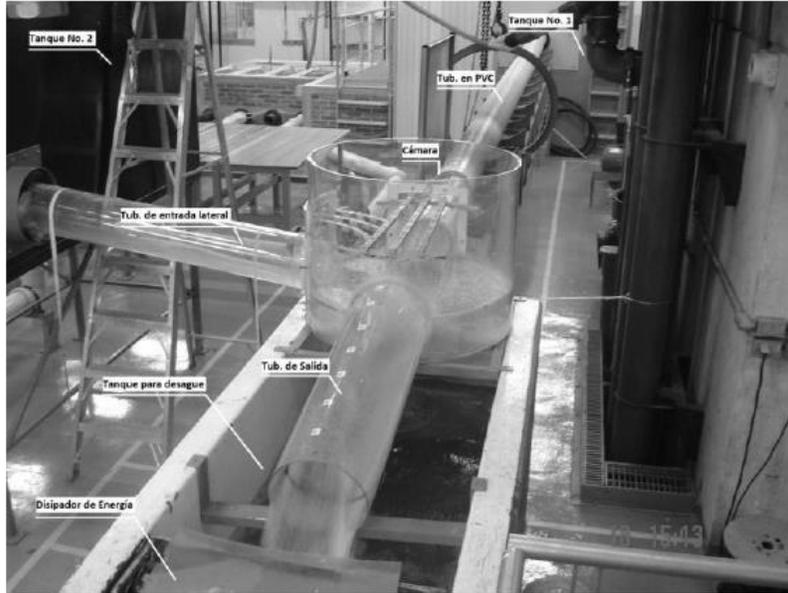
Por último, el Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados de la Universidad de los Andes (CIACUA) realizó una investigación sobre el comportamiento hidráulico de cámaras de inspección sometidas únicamente a condiciones de flujo supercrítico. La investigación se desarrolló mediante el empleo de un modelo físico de una estructura de conexión (cámara), el cual está conformado por dos tuberías de entrada aguas arriba, una tubería de salida aguas abajo y un canal de conducción del flujo en la base de la cámara (cañuela). En la Ilustración 6 y la Foto 7 se puede observar los componentes del modelo. El diseño del modelo permite diferentes configuraciones de caída en las dos tuberías de entrada, de manera independiente, mediante un mecanismo de tapas removibles herméticas o impermeables. En la Ilustración 7 se observa las configuraciones de las tapas removibles.

Ilustración 6. Esquema del montaje del modelo.



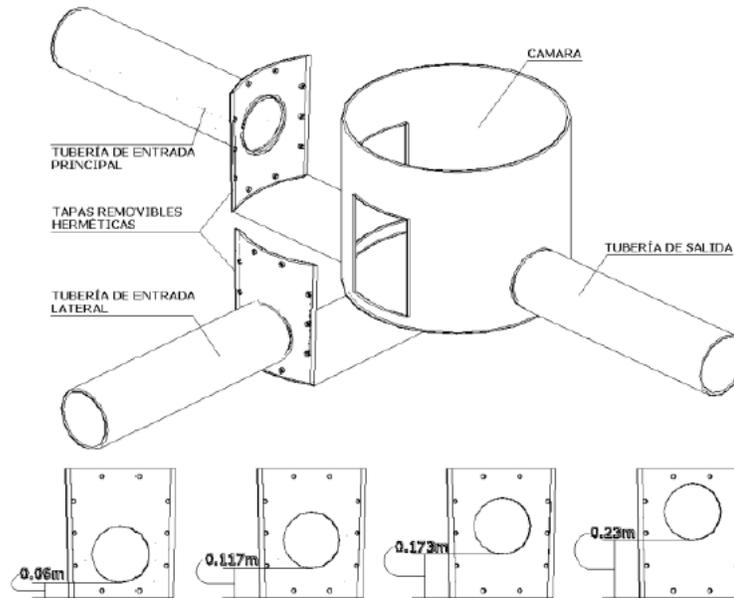
Tomado de: (Bermúdez & Saldarriaga, 2011).

Foto 7. Montaje del modelo en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad de los Andes.



Tomado de: (Bermúdez & Saldarriaga, 2011).

Ilustración 7. Modelo físico de estructura de conexión (cámara) y configuraciones de tapas removibles herméticas.



Tomado de: (Bermúdez & Saldarriaga, 2011).

Pruebas en el modelo hidráulico

En la investigación se definieron 3 condiciones de flujo de entrada a la estructura:

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

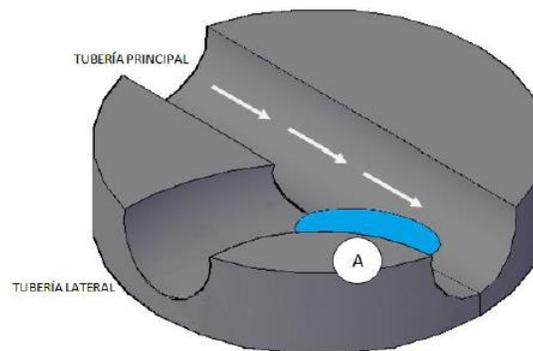
Cada escenario se evaluó para relaciones de llenado entre el 5% y 75%; lo anterior se dispuso para diferentes números de Froude, los cuales dependen del caudal dispuesto y las pendientes en las tuberías de llegada descritas por la tapa hermética empleada. En total la investigación desarrolló 188 pruebas con el objetivo de analizar los diferentes parámetros que involucra el flujo supercrítico.

Resultados

Flujo directo

Una vez los investigadores identificaron el patrón de flujo para cada una de las pruebas realizadas en el presente escenario se establecieron las características de la onda presente en la estructura de conexión, como se muestra en la Ilustración 8.

Ilustración 8. Onda presente en una cámara con flujo de entrada únicamente en la tubería principal.



Tomado de: (Bermúdez & Saldarriaga, 2011).

Ésta onda se formó debido al choque del flujo de entrada por la tubería principal con el final de la pared interna del canal de conducción lateral de la cañuela. La investigación denominó a este tipo de onda como Onda A de flujo directo. Así mismo, los investigadores denominaron Onda B a la onda formada en la tubería de salida (fuera de la cámara). Sin embargo

encontraron que esta onda nunca se logró desarrollar completamente, es decir, no alcanzó alturas mayores a la de la Onda A. En las fotos 8 y 9 se puede observar la formación de las ondas A y B en el modelo, respectivamente.

Foto 8. Desarrollo de la Onda A de un flujo directo para un caudal medio.



Tomado de: (Bermúdez & Saldarriaga, 2011).

Foto 9. Desarrollo de la Onda B para un flujo directo.



Tomado de: (Bermúdez & Saldarriaga, 2011).



Bajo esta configuración los investigadores observaron que el comportamiento del flujo supercrítico en la cámara de inspección se caracterizó por seguir su trayectoria recta, sin tener mayor efecto en el canal de conducción lateral de la cañuela. A pesar de ello, observaron un almacenamiento de agua con movimiento en forma de vórtice, el cual ayuda a prolongar la longitud de la Onda A en el interior del canal, aunque este almacenamiento es mínimo en comparación al caudal total que circula por el canal principal.

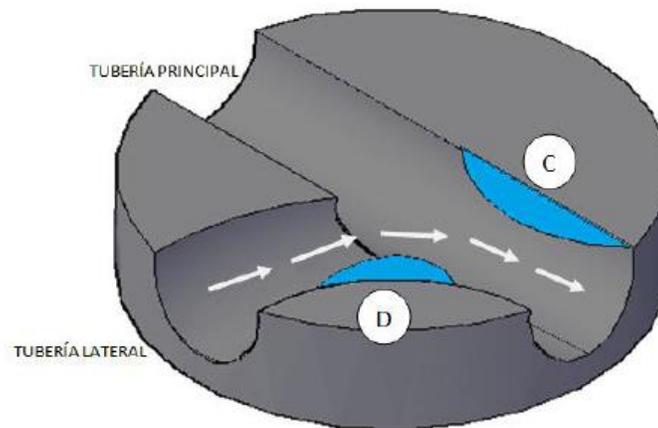
A partir de los datos obtenidos identificaron como onda hidráulicamente dominante en un flujo directo la Onda A, debido a que alcanza una mayor altura de onda y a su desarrollo en el interior de la estructura de conexión. La localización de la Onda A tiene lugar en un valor promedio de inicio de $0,73 D_c$ (diámetro de la cámara) y finaliza $1,0 D_c$ sin importar la caída de la tubería de entrada o el caudal. Debido al hecho que la longitud de la onda es función de sus abscisas inicio y final se considera constante registrando un valor promedio de $0,27 D_c$. Lo anterior estableció como única dimensión de análisis la altura máxima de onda (h_{max}); el valor promedio de la altura máxima de la onda es $1,08 H_B$ (altura de la pared del canal de conducción o altura del banco o estribo de la cañuela).

Las conclusiones a las que se llegó en esta investigación una vez se evaluaron las posibles relaciones existentes entre la formación de la onda y los parámetros independientes planteados fueron: (1) La onda hidráulicamente dominante en un flujo directo se encuentra ubicada al final de la pared interna del canal de conducción lateral de la cañuela; la consideraron como una onda estática ya que su localización es independiente de los parámetros que la rigen. (2) La Onda B, la cual se localiza al inicio de la tubería de salida no se considera como imprescindible en el análisis del comportamiento del flujo, debido a que esta nunca se desarrolla en su totalidad y no representa un riesgo en el comportamiento del flujo supercrítico. (3) Una cámara con media caña no representa un adecuado canal de conducción para un flujo de entrada directo, ya que la altura máxima de onda registrada fue de $1,7 H_B$, lo que indica que una altura de banco de $1,0 D_0$ (diámetro de la tubería de entrada), es decir una cañuela de caña completa, sería capaz de evitar el desbordamiento del flujo. (4) Existe una relación directamente proporcional entre el número de Froude y la altura máxima de la onda, en el cual se encontró un comportamiento paralelo entre las series que representan las diferentes caídas de la tubería de entrada. (5) Finalmente, se encontró una relación multivariada entre el número de Froude, la relación de llenado y la altura máxima de la onda, la cual es una base importante para encontrar una ecuación de diseño.

Flujo a 90°

Este escenario de modelación se caracteriza porque el flujo de entrada a la cámara es únicamente por la tubería lateral. Una vez identificado el patrón de flujo para cada una de las pruebas realizadas en el presente escenario, se encontró que para un flujo supercrítico a 90° se presentan dos tipos de onda, como se puede observar en la Ilustración 9.

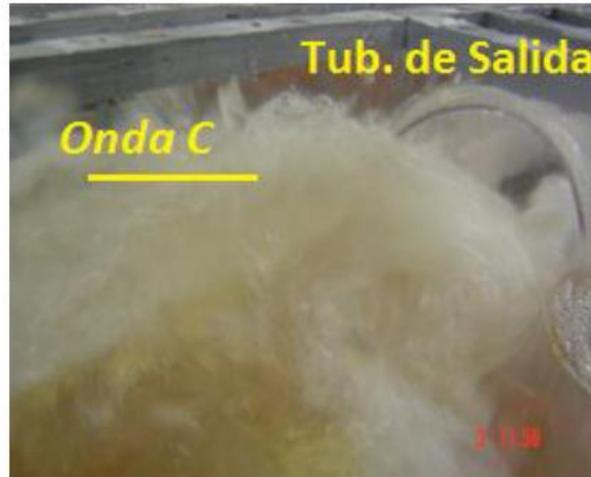
Ilustración 9. Ondas presentes en una cámara con flujo de entrada únicamente en la tubería lateral.



Tomado de: (Bermúdez & Saldarriaga, 2011).

La primera onda llamada Onda C de flujo a 90° se forma debido al choque del flujo de entrada por la tubería lateral con la pared del canal de conducción principal de la cañuela, como se puede observar en la Foto 10. La segunda onda definida como Onda D se forma debido al choque del flujo de entrada por la tubería lateral con la pared interna del canal de conducción lateral de la cañuela.

Foto 10. Desarrollo de la Onda C.



Tomado de: (Bermúdez & Saldarriaga, 2011).

La Onda D nunca se desarrolló de manera independiente; su formación se dio en conjunto con la Onda C, esto se puede apreciar en la Foto 11.

Foto 11. Desarrollo del conjunto de Ondas C y D.



Tomado de: (Bermúdez & Saldarriaga, 2011).

Es necesario anotar que en la pared externa del canal de conducción lateral de la cañuela se observó para los caudales altos de cada configuración probada con caída un incremento en la lámina de agua; sin embargo los investigadores no definieron este incremento como una onda ya que el desarrollo de este incremento es mínimo comparado con las Ondas C y D. Por otro lado, debido a que su formación se origina por el choque del agua de la tubería de entrada con la parte curva de la pared externa del canal de conducción lateral, solo es necesario un rediseño de la

geometría de la unión de la cañuela para evitar este incremento. En la Foto 12 se puede observar este fenómeno.

Foto 12. Incremento de la lámina de agua en la pared externa del canal de conducción lateral.



Tomado de: (Bermúdez & Saldarriaga, 2011).

En las pruebas realizadas observaron que el conjunto de las Ondas C y D se desarrolló sólo para la configuración de mayor caída (caída de $0,75 D_0$) en donde el chorro de entrada por la tubería lateral tiene un mayor alcance y su impacto con la pared interna del canal de conducción lateral de la cañuela forma un incremento en la lámina de agua, dando origen a la Onda C. Para caudales grandes la Onda D termina a la entrada de la tubería de salida al igual que la Onda C, las cuales se desarrollan de forma paralela. Lo anterior sitúa a este conjunto de ondas en un estado crítico, ya que en presencia de grandes caudales las Ondas C y D alcanzan alturas similares, lo que implica un estado inminente de obstrucción y posible sobrecarga de la estructura de conexión.

El comportamiento del flujo en una cámara de alcantarillado con flujo supercrítico está descrito por dos zonas; una zona de ondas aguas abajo del punto de unión de los canales de conducción de la cañuela y una zona no perturbada (sin presencia de ondas) aguas arriba del mismo punto, en donde el agua se almacena o represa y para grandes caudales forma un movimiento de vórtice, el flujo sobrepasa el canal de conducción o banca formando una recirculación del flujo en esta zona. En la Foto 13 se puede observar estos fenómenos.

Foto 13. Vista en planta de la cámara, en donde se observa la recirculación del flujo para caudales altos.



Tomado de: (Bermúdez & Saldarriaga, 2011).

Finalmente, definieron como onda hidráulicamente dominante la Onda C, debido a su presencia continua para un flujo a 90° en una cámara de alcantarillado, esta onda inicia en promedio a $0,54 D_c$, es decir después del punto de unión entre el canal de conducción principal y lateral de la cañuela, el cual se encuentra a $0,45 D_c$. El final de la Onda C se presenta en promedio a $0,98 D_c$ muy cerca de la tubería de salida, lo cual genera un estado inminente de obstrucción de la tubería de salida en presencia de caudales altos. El promedio de longitud máxima de la onda encontrado por los investigadores fue de $0,45 D_c$, aproximadamente la mitad del diámetro interno de la cámara, el promedio de la altura máxima de la onda es $2,12 H_B$.

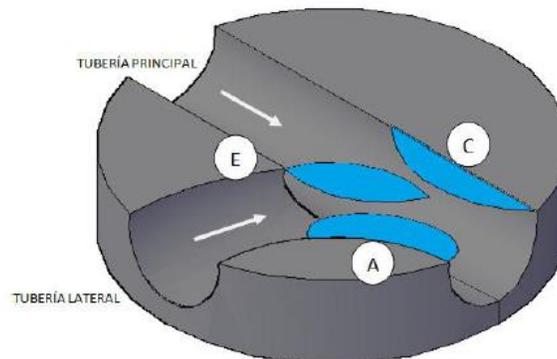
Las conclusiones a las que se llegó en esta investigación una vez se evaluaron las posibles relaciones existentes entre la formación de la onda y los parámetros independientes planteados fueron: (1) La onda hidráulicamente dominante en un flujo a 90° se encuentra ubicada después del punto de unión entre los canales de conducción de la cañuela, en la pared externa del canal principal; se considera como una onda estática ya que su localización es independiente de los parámetros que la rigen. (2) Sin embargo aunque la onda siempre se desarrolló en la misma zona, se observó una tendencia creciente del punto de inicio de la onda frente a mayores relaciones de llenado, lo cual es importante ya que indica un desarrollo de la onda muy cercano a la tubería de salida que, acompañado de grandes alturas de onda, presenta un estado inminente de obstrucción de la tubería de salida y riesgo de sobrecarga de la cámara. (3) Para la mayor caída evaluada se observa un valor constante del punto de inicio

de la onda, por lo tanto una longitud de onda constante: de igual forma para esta caída se presentan los menores valores de altura de onda y la formación de la segunda onda (onda D) muy cerca de la tubería de salida. (4) Una cámara con media caña no representa un adecuado canal de conducción para el flujo de entrada a 90° , ya que la altura máxima de onda registrada fue de $2,78 H_b$, lo que indica que una cañuela con un canal profundo (altura de banco o estribo de $1,5 D_0$) sería capaz de evitar el desbordamiento del flujo. (5) Es necesario para las tuberías de entrada con caída una geometría de la cañuela que tenga en cuenta el alcance del chorro de entrada, y así evitar choques entre el flujo y las paredes del canal de conducción de la cañuela que puedan generar incrementos en la lámina de agua.

Unión de los flujos

La Ilustración 10 muestra los tres tipos de ondas formados por la interacción de los dos flujos de entrada en la estructura de conexión.

Ilustración 10. Ondas presentes en una cámara con unión de los flujos.



Tomado de: (Bermúdez & Saldarriaga, 2011).

La primera onda identificada por los investigadores se forma debido al choque del flujo de entrada por la tubería principal con el final de la pared interna del canal de conducción de la cañuela (Onda A). La segunda onda se forma debido al choque del flujo de entrada por la tubería lateral con la pared del canal de conducción principal de la cañuela (Onda C). La tercera onda, definida como Onda E se forma debido a la unión de los flujos en el punto de confluencia de los canales de conducción de la cañuela (principal y lateral). Las Fotos 14 y 15 muestran estos fenómenos.

Foto 14. Desarrollo de la Onda A para la unión de los flujos.



Tomado de: (Bermúdez & Saldarriaga, 2011).

Foto 15. Desarrollo de la Onda C para la unión de los flujos.



Tomado de: (Bermúdez & Saldarriaga, 2011).

Foto 16. Desarrollo de la Onda E para la unión de los flujos.



Tomado de: (Bermúdez & Saldarriaga, 2011).



La Onda A propia de un flujo directo se presenta cuando el conducto hidráulicamente dominante es la tubería principal y el caudal de entrada por la tubería lateral es menor al 10% del caudal de la tubería principal. Al igual que el análisis realizado para el flujo directo los investigadores encontraron que la localización de la onda A es independiente de los parámetros de entrada, ya que se desarrolla siempre para un valor promedio de inicio de $0,73 D_c$ y un valor promedio de finalización de $1,0 D_c$; por lo anterior se define como una onda estática. De todas las ondas identificadas en la configuración de unión de los flujos la Onda A es la que presenta una menor altura máxima de onda, la cual no supero nunca el valor de $1,08 H_B$ (para las pruebas de flujo directo y unión de los flujos). Al ser la dimensión de longitud máxima de la onda función de las abscisas inicial y final constante, registrando un valor promedio de $0,27 D_c$. Lo anterior dejó como única variable a analizar la altura máxima de onda (h_{max}).

Por otra parte, la Onda C propia de un flujo a 90° se presenta cuando el conducto hidráulicamente dominante es la tubería lateral. Al igual que el análisis realizado para flujo a 90° los investigadores encontraron una tendencia de formación de la Onda D, que en presencia de grandes caudales obstruía la tubería de salida y ocasionaba una sobrecarga en la estructura de conexión (cámara). La localización de la onda C se desarrolla para un valor promedio de inicio de $0,54 D_c$ y un valor promedio de finalización de $0,98 D_c$; lo anterior la define como una onda estática. De todas las ondas identificadas en la configuración de unión de los flujos la Onda C es la que presenta una mayor altura máxima de onda, la cual supera el valor obtenido para la configuración de flujo a 90° con $2,33 H_B$. Los investigadores observaron que la presencia de esta onda afecta a la tubería principal cuando esta no tiene caída y cuando la caída de la tubería lateral (conducto hidráulicamente dominante) es igual o superior; ya que genera un resalto hidráulico en la salida de la tubería principal y en presencia de grandes caudales el resalto se desplaza al interior de la tubería incrementando el nivel de la lamina de agua y causando un efecto de presurización. De igual forma que para la configuración de flujo a 90° la Onda C presenta un valor promedio de longitud máxima de la onda de $0,45 D_c$; para la presente configuración los investigadores no encontraron una relación significativa entre esta variable (longitud máxima de la onda) y los parámetros de entrada, la cual dejó como única variable a analizar la altura máxima de onda (h_{max}).

La onda E se considera propia de un flujo supercrítico en una cámara de alcantarillado con tuberías de entrada principal y lateral: se presenta cuando el conducto hidráulicamente dominante es la tubería principal y el caudal de la tubería lateral supera el 10% del caudal de la tubería principal. La Onda E presenta su inicio en $0,45 D_c$, punto de unión de los canales de conducción de la cañuela y en consecuencia de los flujos de entrada a la cámara; presenta un



valor promedio de finalización de 0,90 D_c . al igual que las anteriores ondas identificadas, la localización de la Onda E es independiente de los parámetros de entrada, lo cual la define como una onda estática. La Onda E representa el valor medio de altura máxima de la onda de todas las ondas presentes en la configuración de unión de los flujos con una altura máxima de onda de 1,33 H_B . Los investigadores observaron que la presencia de esta onda afecta la tubería lateral cuando no tiene caída ó la caída de la tubería principal es igual o superior, ya que genera un resalto hidráulico en la salida de la tubería lateral. Aunque este resalto no se desplazó aguas arriba de la tubería lateral por condiciones físicas del modelo evaluado, en el cual la tubería lateral presenta mayores pendientes, se considera que tendrá un comportamiento similar al resalto ocasionado por la Onda C para la configuración de unión de los flujos, en donde el resalto se desplaza aguas arriba de la tubería, incrementa el nivel de la lámina de agua y ocasiona un efecto de presurización de la misma. La longitud máxima de la onda registró un valor promedio de 0,47 D_c y representando el mayor valor entre todas las ondas identificadas. Lo anterior deja como única variable a analizar la altura máxima de onda (h_{max}).

Las conclusiones a las que se llegó en esta investigación una vez se evaluaron las posibles relaciones existentes entre la formación de la onda y los parámetros independientes planteados fueron: (1) La onda A sólo tiene presencia en la configuración de unión de los flujos cuando la influencia de la tubería lateral es mínima y se presenta un comportamiento típico del flujo directo descrito con las mismas características. (2) La Onda C, aunque muestra las mismas características de ubicación de una onda típica de un flujo a 90°, sus características de dimensión (principalmente la altura máxima de la onda) en la configuración de unión de los flujos se ve influenciada por los parámetros de entrada tanto de la tubería principal como lateral; por lo anterior es necesario diferenciar la formación de esta onda de acuerdo a la configuración donde se desarrolla. (3) La Onda E fue el tipo de onda con mayor presencia en la configuración de unión de los flujos, sin embargo, no se considera como una onda que represente peligro para el sistema, ya que su altura máxima de onda se encuentra en un valor intermedio con respecto a las Ondas A y Ondas C; no se desarrolla cerca a la tubería de salida, lo cual disminuye el riesgo de sobrecarga del sistema y nunca se registraron datos en los cuales el flujo sobrepasara los bancos de la cañuela.

Análisis estadístico

Los investigadores una vez analizaron el comportamiento y relación existente entre las variables independientes y dependientes planteadas, procedieron a desarrollar un análisis estadístico para cada onda identificada. La definición de las variables dependientes es:



- Altura máxima de la onda A

$$h_{maxA} = \frac{h_A}{H_B} = \frac{2h_A}{D_0}$$

Ecuación 48

- Altura máxima de la onda C

$$h_{maxC} = \frac{h_C}{H_B} = \frac{2h_C}{D_0}$$

Ecuación 49

- Altura máxima de la onda C-UF (unión de los flujos)

$$h_{maxC-UF} = \frac{h_{C-UF}}{H_B} = \frac{2h_{C-UF}}{D_0}$$

Ecuación 50

- Altura máxima de la onda E

$$h_{maxE} = \frac{h_E}{H_B} = \frac{2h_E}{D_0}$$

Ecuación 51

donde,

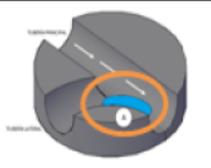
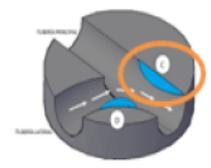
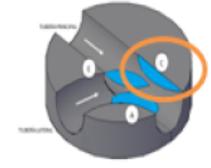
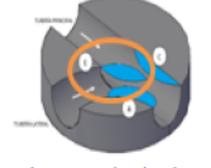
h = Altura del pico de la onda.

H_B = Altura del banco de la cañuela. $H_B = D_0/2$

D_0 = Diámetro interno de la tubería de entrada.

El resumen de los resultados estadísticos se muestran en la Tabla 5.


Tabla 5. Resumen de los resultados estadísticos.

TIPO DE ONDA	MODELO	ECUACIÓN	VARIABLES EN X	R ² [%]
 Onda A - Flujo Directo	Potencial de X	$h_{maxA} = 2.92Y_1^{1.02} F_1^{-0.025} S_1^{0.07}$	Todas	83.4292
	Potencial de X	$h_{maxA} = 2.46Y_1^{1.049} F_1^{0.14}$	Y y F	83.3382
 Onda C - Dlujo a 90°	Potencial de X	$h_{maxC} = 3.41Y_2^{0.85} F_2^{0.41} S_2^{0.13}$	Todas	78.7461
	Potencial de X	$h_{maxC} = 3.11Y_2^{0.86} F_2^{0.45}$	Y y F	76.6135
 Onda C - Unión de Flujos	Potencial de X	$h_{maxC-UF} = 2.66Y_1^{0.17} Y_2^{0.58} F_1^{0.056} F_2^{0.42} S_1^{-0.008} S_2^{-0.098}$	Todas	86.6027
	Potencial de X	$h_{maxC-UF} = 3.13Y_1^{0.17} Y_2^{0.49} F_1^{0.043} F_2^{0.22}$	Y y F	84.723
 Onda E - Unión de Flujos	Potencial de X	$h_{maxE} = 3.91Y_1^{0.22} Y_2^{0.56} F_1^{0.12} F_2^{0.08} S_1^{-0.033} S_2^{0.13}$	Todas	90.6876
	Potencial de X	$h_{maxE} = 3.32Y_1^{0.2} Y_2^{0.62} F_1^{0.035} F_2^{0.3}$	Y y F	85.3434

Tomado de: (Bermúdez & Saldarriaga, 2011).

Conclusiones

Se observó que para caídas menores o iguales a 0,25 veces el diámetro de la tubería de entrada, el conducto hidráulicamente dominante ocasiona una pérdida de capacidad hidráulica en el conducto menos dominante, ya que forma un resalto hidráulico en la unión tubería – cámara, el cual se puede desplazar aguas arriba de la tubería y ocasionar obstrucción en la misma. Lo anterior, plantea una caída mínima permitida de las tuberías de entrada a la cámara ($S_{min} = 0,25 D_0$) para $D_0 < 700$ mm.

Se encontró que en una cámara de inspección es necesario determinar la longitud del canal de conducción lateral de la cañuela, es decir establecer cuál es el alcance del chorro entrante y de esta forma disminuir el impacto de este con la curvatura de unión entre los canales de conducción.



Uno de los principales resultados de la presente investigación fue determinar las ecuaciones de la altura máxima de cada onda presente en la estructura de conexión. Ya que una vez identificada la onda que se puede presentar en la cámara y establecer la altura máxima con la cual se desarrollara, es posible determinar la profundidad del canal de conducción (altura de bancos o estribos). Lo anterior, asegura una correcta conducción del flujo a lo largo de la cañuela, lo cual reduce la posibilidad de desbordamiento del flujo, recirculación del mismo y presencia de zonas de vórtice, las cuales causan una reducción en la capacidad de descarga de la estructura.

Aunque todas las ondas identificadas se definieron como ondas estáticas, ya que no se observó desplazamiento, las Ondas C (para cualquier configuración) y a presentan un estado crítico frente a caudales altos; ya que su finalización tiene lugar en una distancia igual a un diámetro de la tubería de entrada, medido después de la curvatura de intersección entre los canales de conducción (lateral y principal), muy cerca a la tubería de salida, lo cual genera un estado inminente de obstrucción. Por lo anterior es necesario verificar que esta distancia sea mayor a un diámetro de la tubería de entrada (Bermúdez & Saldarriaga, 2011).



2.2. Marco Teórico

2.2.1. Cámaras

Una cámara de inspección permite tener acceso a los sistemas de drenaje urbano; generalmente las cámaras son colocadas en los sistemas de drenaje con un espaciamiento máximo de 200 m a fin de: airear el sistema, controlar el alcantarillado defectuoso o colmatado, cambiar algún parámetro del sistema como el diámetro, la dirección, la rugosidad o la descarga, unir varios flujos o tramos, realizar mantenimiento y limpieza a la red, y hacer renovaciones a la tuberías (Hager, 1999).

Las cámaras se pueden clasificar en dos tipos: (1) cámaras de inspección donde la distancia vertical entre la cota de batea de salida y la línea de flujo del conducto de entrada no sea superior a 0,75m o (2) cámaras de caída que permitan disipar energía, en aquellos casos en donde la velocidad en el conducto de entrada supere la velocidad máxima permitida por el material (Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados de la Universidad de los Andes., 2010).

El material tradicional usado en la construcción de cámaras de inspección ha sido el concreto, pero los años han mostrado que este material ocasiona problemas relevantes como infiltraciones y/o exfiltraciones, corrosión del concreto y elementos metálicos de la cámara, fatiga estructural en las redes de alcantarillado. De acuerdo con lo anterior algunos de los materiales usados en la actualidad en la construcción de cámaras de inspección son el poliéster reforzado con fibra de vidrio, el PVC, el polipropileno, el concreto de alta resistencia y el polietileno de alta densidad (Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados de la Universidad de los Andes., 2010).

El diseño preliminar actual utilizado en los sistemas de drenaje urbano está basado en el concepto de flujo uniforme con una relación de llenado de aproximadamente 85%, para el cual el caudal es igual al caudal a tubo lleno. Este concepto fue probado en el pasado y en el presente sigue siendo utilizado como guía de diseño, aunque este concepto es válido únicamente para flujo subcrítico (Gargano & Hager, 2002).



2.2.2. Flujo supercrítico

El flujo supercrítico se presenta en los sistemas de drenaje urbano en zonas con un gradiente hidráulico alto o en donde se hace uso de materiales modernos para la fabricación de las tuberías; esta última condición se debe a la baja rugosidad de estos materiales.

Una de las características más importante del flujo supercrítico es su alta velocidad; esta característica forja problemas de abrasión deteriorando las cámaras de inspección. Este fenómeno ocurre por el impacto continuo del chorro en las paredes de la cámara, sumado a los efectos por el transporte de objetos mezclados en el flujo y a las características físico-químicas propias de las aguas residuales.

Entre los problemas hidráulicos presentes en cámaras de inspección bajo regímenes de flujo supercrítico se encuentran:

- Alto riesgo de presurización a la entrada del colector de salida.
- Posibilidad de sobrecarga del sistema.
- Susceptibilidad a la formación de resaltos hidráulicos ante cualquier perturbación.
- Complejidad y alta turbulencia del flujo
- Ante un eventual efecto de remanso existe un alto riesgo de presurización de los colectores de llegada.

Para flujo subcrítico cualquier perturbación se propaga hacia aguas arriba, por lo tanto este flujo debe ser analizado en contra de la dirección del flujo. En contraste, el análisis y la dirección del flujo tienen la misma dirección para flujo supercrítico, para el cual el promedio de la velocidad de flujo es mayor que la celeridad de la onda.

El flujo en canales abiertos puede ser caracterizado con el número de Froude; según Hager este se puede distinguir entre:



Tabla 6. Clasificación de los flujos según el número de Froude.

Rango	Tipo de flujo	Características del flujo
$0 < F < 0,7$	Flujo subcrítico débil	Posee un patrón relativamente plano en su superficie y poco efecto dinámico; este flujo se comporta similarmente a un flujo presurizado, para el cual $F=0$.
$0,7 < F < 1,5$	Flujo transicional	Propenso a formar ondas estacionarias de superficie libre, tales como resaltos hidráulicos ondulares.
$1,5 < F < 3$	Flujo supercrítico	Se caracteriza por un comportamiento dinámico de flujo.
$3 < F$	Flujo hipercrítico	Posee una dinámica de flujo fuerte, una gran estabilidad con daño potencial si el flujo es perturbado.

Tomado de: (Hager & Gissoni, Supercritical Flow in Sewer Manholes, 2005).

Según el área de estudio definida en el presente documento solo se enfocará el análisis en flujos con números de Froude mayores a 1,5. Este tipo de flujo se presenta principalmente en redes de drenaje con alta pendiente ubicadas en áreas montañosas. Allí se puede encontrar flujos con velocidades típicas mayores a 3 m/s. De acuerdo con estas características, perturbaciones en el flujo generan dos principales efectos:

- **Ondas de Choque:** se presentan como una reacción a cualquier alteración en el flujo en un canal recto prismático.
- **Resaltos Hidráulicos:** se presentan cuando la perturbación en el flujo es tan grande que no permite mantener un régimen de flujo supercrítico.

Comparando el flujo de canales abiertos tradicional con la hidráulica de los sistemas de alcantarillados se evidencia una complicación de este último por la sección transversal cerrada. En sistemas de drenaje urbano se puede encontrar flujo de canales abiertos o flujos presurizados. La transición entre estos dos estados está acompañada por fenómenos indeseables tales como crecimiento abrupto de la profundidad del flujo y formación de géiser. De presentarse la formación de un geiser se pierde una cantidad considerable de agua residual a través de la cámara. Desde una perspectiva hidráulica y ambiental este tipo de fenómenos debe evitarse (Del Giudice & Hager, 2001). La Foto 17 muestra la formación de un Géiser en una cámara de alcantarillado.

**Foto 17. Géiser en alcantarillado.**

Tomado de: http://www.huffingtonpost.com/2011/07/20/sewer-geyser-lifts-car-montreal_n_904745.html.

Se puede caracterizar el flujo a superficie libre mediante el número de Froude. En la Ecuación 52 se muestra el cálculo del número de Froude para canales fluyendo a superficie libre o conductos circulares parcialmente llenos.

$$F = \frac{v}{\sqrt{gD}} \quad \text{ó} \quad F = \left(\frac{T}{gA^3} \right)^{\frac{1}{2}} * Q$$

Ecuación 52

donde,

F = Número de Froude.

v = Velocidad del flujo de aproximación.

g = Aceleración debida a la gravedad.

D = Profundidad hidráulica.

T = Ancho superficial.

A = Área mojada.

Q = Caudal.

Debido a que la expresión del número de Froude para tuberías circulares parcialmente llenas es relativamente compleja, Hager en 1999 propuso una simplificación del número de Froude (F) en términos de la descarga (Q), la aceleración de la gravedad (g), el diámetro de la tubería (D) y la profundidad del flujo (h), para una relación de llenado $y=h/D$ entre 20% y 95%. Esta simplificación se muestra en la Ecuación 53.



$$F = \frac{Q}{(g * D * h^4)^{\frac{1}{2}}}$$

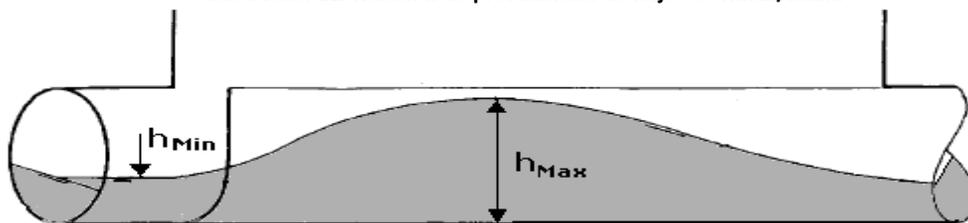
Ecuación 53

2.2.3. Flujo supercrítico en cámaras de inspección

El paso de flujo supercrítico en una cámara de unión exhibe un patrón comparable con una expansión del flujo. Al expandirse el flujo aguas abajo, este afecta los costados de la tubería generando unos patrones de onda típicos. Analizar el comportamiento del flujo supercrítico se debe basar fundamentalmente en un análisis bidimensional pues este se caracteriza por una superficie libre ondular (Hager, 1999).

Adicionalmente a los investigadores previamente nombrados, el fenómeno básico del flujo supercrítico en estructuras de conexión fue explicado por Schwalt en 1992; su análisis experimental consistió en un canal rectangular ancho y liso, con un flujo de acercamiento sin perturbaciones y con velocidad dada, el cual es desviado en un punto a causa de una deflexión en la pared del canal. Sobre este modelo el autor pudo distinguir entre una región de flujo no perturbada aguas arriba y una región de flujo perturbada aguas abajo. En la zona perturbada se observó la presencia de ondas de choque, las cuales fueron clasificadas de acuerdo con Ippen y Harleman (1956) en analogía con un resalto hidráulico como: ondas de choque ondulares para relaciones de profundidad de flujo (relación entre los niveles de la lámina de agua mínimo y máximo presentes en la estructura de conexión) entre 1 y 2; y ondas de choque directas para relaciones de profundidad de flujo mayor a 2. Con ello, el autor llega a la conclusión que la altura relativa de la onda depende exclusivamente del número de choque, el cual es función del número de Froude de acercamiento y el ángulo de desviación de la pared. De igual forma el autor observó que la velocidad aguas abajo de la desviación es casi siempre igual a la velocidad de acercamiento aguas arriba. Esta característica puede ser aplicada a todas las ondas de choque, con lo cual se llegó a la conclusión que a pesar de la perturbación generada por la formación de ondas de choque no se presenta un cambio significativo en la velocidad.

Ilustración 11. Relación de profundidad de flujo $Y_s = h_{max}/h_{min}$.



Tomado de: (Hager, 1999).



3. Descripción general del modelo

El modelo hidráulico de la cámara de unión 1 está conformado por: tres tuberías de entrada aguas arriba de la cámara, una tubería de salida aguas abajo, un canal de conducción de los flujos de entrada hacia el flujo de salida en la base de la cámara (cañuela), tres tanques de alimentación, una cámara de conexión convencional, seis tapas de conexión para las tuberías de entrada aguas abajo, estructuras de soporte, una estructura de disipación de energía aguas abajo de la tubería de salida y un tanque de desagüe. Las tres tuberías de entrada están dispuestas de manera que la tubería principal es perpendicular a las tuberías laterales 1 y 2, las tres tuberías residen en el mismo plano; la tubería de salida se encuentra en el mismo eje que la tubería principal. Se definió como tubería principal la tubería ubicada a 180° (entrada directa), la tubería lateral 1 está ubicada a 90° y la tubería lateral 2 está ubicada a 270° todas con respecto a la tubería de salida⁴. En el Plano 1 se muestra un esquema a escala con la vista en planta del modelo.

La cámara de unión 2 posee de igual forma tres tuberías de entrada con un espaciamiento de 90° entre ellas, pero a diferencia de la cámara 1 esta no cuenta con tapas de acople removibles teniendo solo una estructura de conexión fija entre la cámara y las tuberías.

⁴ Todos los ángulos están medidos con dirección contraria a las manecillas de reloj



Universidad de los Andes
Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental
Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados -
CIACUA
*Diseño y construcción de un modelo físico para el estudio de
cámaras de unión bajo condiciones de flujo supercrítico en
sistemas de drenaje urbano.*

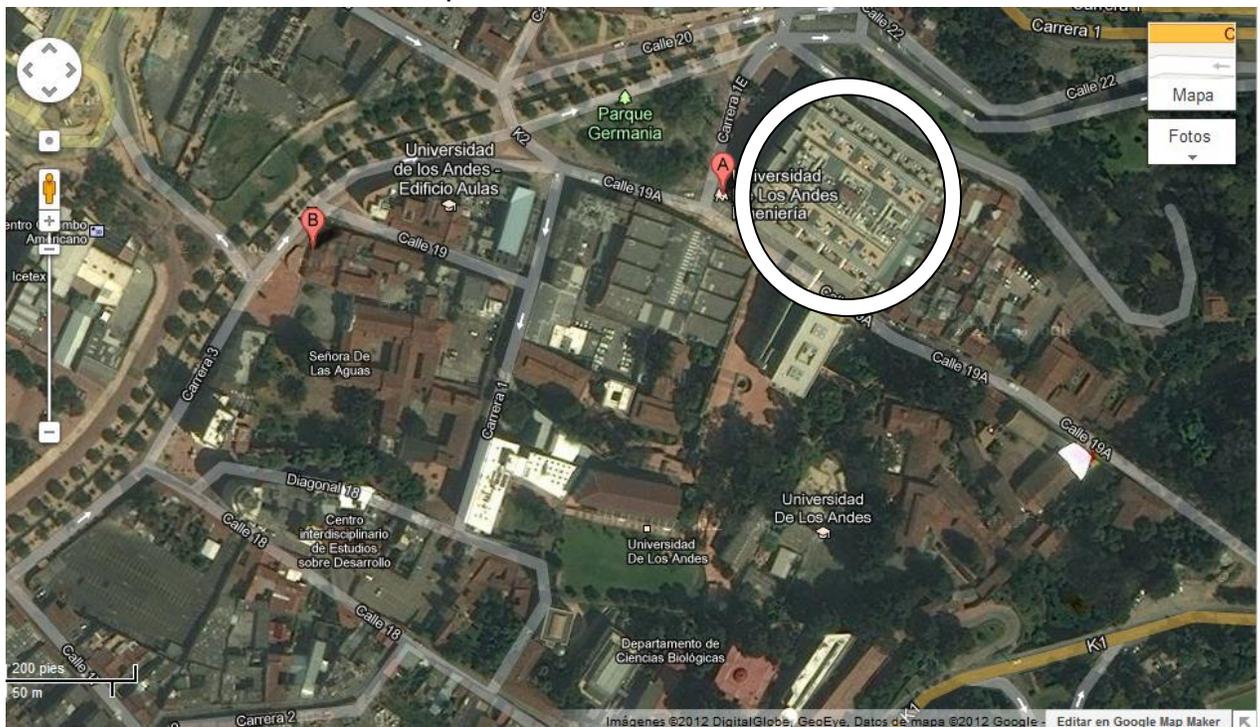
IAMB 201210 06



3.1. Ubicación

El modelo hidráulico se encuentra ubicado en la Universidad de los Andes. La universidad cuenta con dos sedes en la ciudad de Bogotá, Colombia. La sede principal ubicada en el centro de la ciudad alberga el edificio de la facultad de ingeniería (Mario Laserna). En la Ilustración 12 se puede observar una imagen satelital con la identificación del edificio.

Ilustración 12. Mapa de ubicación del edificio Mario Laserna



Fuente: Google Maps.

En el Sótano 1 del edificio Mario Laserna se encuentra ubicado el Laboratorio de Hidráulica perteneciente al Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Este laboratorio tiene un área total de 525 m² de los cuales 15 m² serán ocupados en la ejecución del proyecto. El Plano 2 corresponde a una presentación a escala del laboratorio de Hidráulica y la localización del montaje.



Universidad de los Andes
Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental
Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados -
CIACUA
*Diseño y construcción de un modelo físico para el estudio de
cámaras de unión bajo condiciones de flujo supercrítico en
sistemas de drenaje urbano.*

IAMB 201210 06



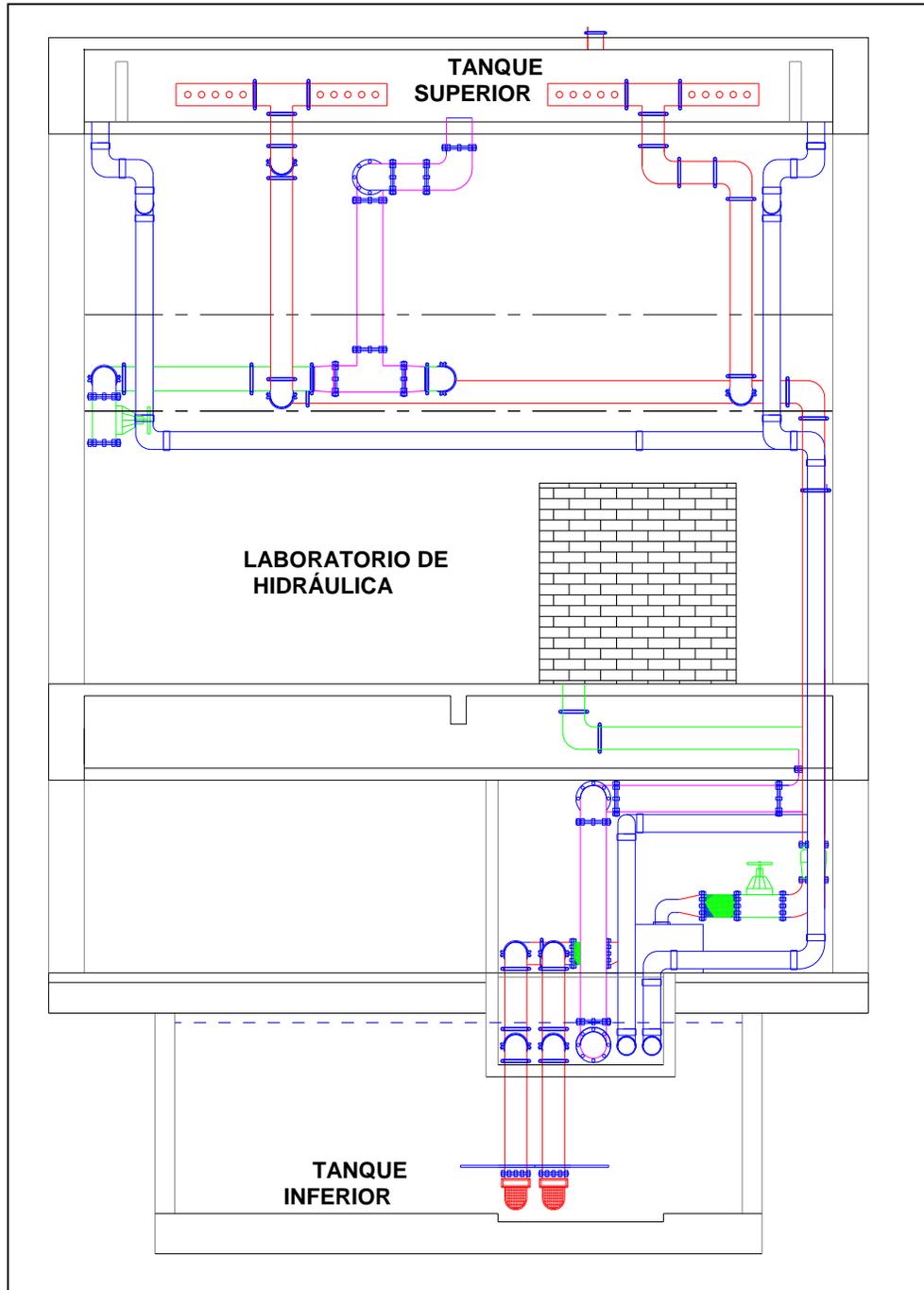
3.2. Sistema hidráulico

El Laboratorio de Hidráulica alberga en sus instalaciones equipos adecuados para la realización de prácticas experimentales en los cursos de Hidráulica y Mecánica de Fluidos, además de llevar a cabo investigaciones sobre sistemas de acueductos y alcantarillados. Para el correcto funcionamiento de estas instalaciones, el laboratorio cuenta con un sistema de alimentación por bombas en circuito cerrado. Este se compone por dos bombas centrífugas de 40 Hp cada una, dos tanques de almacenamiento con capacidad total de 90 m³ y un sistema de tuberías y válvulas distribuidas por todo el laboratorio. Su funcionamiento comienza con las dos bombas ubicadas en el tanque inferior del Sótano 2 del edificio Mario Laserna; desde allí es elevada el agua una altura aproximada de 13 metros hasta el tanque superior, ubicado en el segundo piso del edificio. El tanque superior tiene una capacidad de almacenamiento de 30 m³ y suministra por gravedad los modelos instalados en el laboratorio. Una vez el agua es conducida a través de los diferentes modelos retorna al tanque inferior. La Foto 18 muestra una parte del sistema de alimentación por tuberías en el laboratorio. La Ilustración 13 muestra un esquema del funcionamiento del sistema hidráulico del laboratorio.

Foto 18. Sistema de alimentación por tuberías.



Ilustración 13. Esquema del funcionamiento del sistema hidráulico del Laboratorio de Hidráulica.





3.3. Diseño del modelo

El diseño del modelo se basó principalmente en las investigaciones previas hechas por el Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados (CIACUA) de la Universidad de los Andes. Estos estudios ayudaron a definir: las dimensiones de la cámara 1 y las tuberías de conexión, la altura de caída y demás dimensiones de las tapas de acople para las tuberías de entrada a la cámara, la geometría de la estructura de soporte para el sensor de nivel en la cámara. Además, las recomendaciones de diseño presentadas en uno de los estudios permitió definir la geometría de la cañuela, principalmente el radio de curvatura de las conexiones laterales.

Antes de realizar el diseño definitivo de la cámara 1 con sus accesorios se analizó el espacio disponible para la ubicación del montaje. Dadas las investigaciones previas, el laboratorio cuenta con dos de los tres tanques de alimentación necesarios junto con sus estructuras de soporte y alimentación. Debido a la ubicación fija de estos dos tanques metálicos se realizaron mediciones de la longitud máxima que pueden tener la tubería principal y lateral 2. Así mismo, el espacio disponible para el tanque de alimentación de la tubería lateral 1 fue un factor que condicionó su diseño. Para garantizar un diseño apropiado de acuerdo con el espacio disponible en el laboratorio, se realizaron planos de detalle en AutoCad de las estructuras.

A partir de las condiciones anteriores se definió que el diámetro de la cámara 1 es de 0,85 m, con una altura de 0,70 m. la longitud total de la tubería principal medida en el laboratorio es de 9,78 m pero debido a las dificultades de construcción, transporte y costos de una tubería con esta longitud, se determinó la división de esta tubería en tres tramos. El primer tramo ubicado desde el tanque de alimentación tendrá una longitud de 6 m, el segundo tramo tendrá una longitud de 2,23 m y el tercer tramo una longitud de 1,55 m. Las longitudes máximas medidas en el laboratorio para las tuberías laterales 1 y 2 fueron de 1,20 m y 1,40 m, respectivamente. Todas las tuberías de entrada a la cámara 1 tienen un diámetro nominal de 9 pulgadas. En cuanto a la tubería de salida se determino una longitud de 1,50 m y un diámetro nominal de 11 pulgadas.

Para que el montaje permita modificar las configuraciones de caída y pendiente de las tuberías de entrada a la cámara se realizaron tapas de acople removibles; estas serán las estructuras de conexión entre la cámara y las tuberías, y cada una de ellas tendrá una altura fija medida desde la base de la cámara hasta la cota de batea. Dado que en el laboratorio todavía se encontraban las tapas de acople utilizadas en el estudio anterior sobre cámaras, estas se sometieron a un proceso de refacción para que pudieran ser utilizadas en el montaje de la



cámara 1. El estudio anterior solo consideró dos tuberías de entrada a la cámara de inspección; por lo tanto, fue necesario construir dos tapas adicionales para ser utilizadas en la tubería de entrada adicional. En conclusión, el montaje tendrá dos tapas de acople para cada tubería de entrada, cada una con una altura de caída diferente. Los planos de detalle de la cámara de unión 1 y las tapas de acople se muestran en el Plano 3.

Para soportar las piezas del montaje el laboratorio cuenta con estructuras metálicas que sostienen la tubería principal, el tanque de alimentación 2 y la cámara de unión. Por lo anterior, fue necesaria la construcción de un soporte metálico para la tubería de salida y para el tanque de alimentación de la tubería lateral 1. Otra de las estructuras de soporte necesarias en el montaje es un soporte ubicado sobre la cámara de unión. Este permitirá realizar las mediciones del nivel del agua en la cámara en puntos fijos y a la misma altura. El Plano 4 muestra el plano de detalle de este soporte elaborado para la cámara de unión 2.

La cañuela de la cámara 1 está diseñada como una estructura aparte a la cámara. Como se mencionó anteriormente se tomaron las recomendaciones de diseño hechas por investigaciones previas; por lo tanto, la cañuela es de caña completa, con un diámetro de curvatura para la conducción de los flujos laterales de $r_0/2$, siendo r_0 el radio de la cámara de unión y una altura determinada por la altura de la tubería de salida medida desde la base de la cámara a la cota de batea de la tubería y el diámetro de la tubería de salida. El Plano 5 muestra los planos de detalle de la cañuela.

Por último, en esta fase de diseño se evaluó los posibles puntos de medición de la profundidad de flujo, esto con el objetivo de tener un control detallado del perfil del flujo en todas las tuberías y la cámara y poder así determinar los parámetros más relevantes para mejorar el diseño de estas estructuras. Se propusieron 53 y 47 puntos de medición de manera longitudinal a lo largo de las tuberías de entrada, salida y de la cámara para los montajes de las cámaras 1 y 2, respectivamente. En los Planos 6 y 7 se puede observar la ubicación de estos puntos.



Universidad de los Andes
Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental
Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados -
CIACUA

*Diseño y construcción de un modelo físico para el estudio de
cámaras de unión bajo condiciones de flujo supercrítico en
sistemas de drenaje urbano.*

IAMB 201210 06





Universidad de los Andes
Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental
Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados -
CIACUA
*Diseño y construcción de un modelo físico para el estudio de
cámaras de unión bajo condiciones de flujo supercrítico en
sistemas de drenaje urbano.*

IAMB 201210 06





Universidad de los Andes
Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental
Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados -
CIACUA
*Diseño y construcción de un modelo físico para el estudio de
cámaras de unión bajo condiciones de flujo supercrítico en
sistemas de drenaje urbano.*

IAMB 201210 06





Universidad de los Andes
Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental
Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados -
CIACUA
*Diseño y construcción de un modelo físico para el estudio de
cámaras de unión bajo condiciones de flujo supercrítico en
sistemas de drenaje urbano.*

IAMB 201210 06





Universidad de los Andes
Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental
Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados -
CIACUA
*Diseño y construcción de un modelo físico para el estudio de
cámaras de unión bajo condiciones de flujo supercrítico en
sistemas de drenaje urbano.*

IAMB 201210 06





3.4. Dimensiones de los componentes

Para tener una mejor magnitud de las dimensiones de los dos modelos, a continuación se presenta una tabla con un resumen de las dimensiones más relevantes de las piezas de cada modelo.

Tabla 7. Dimensiones de los componentes del modelo 1.

Modelo cámara de unión 1			
Estructura	Dimensión	Valor	Unidades
Cámara 1	Diámetro	0,85	metros
	Altura	0,70	metros
	Espesor	0,01	metros
Tubería principal	Diámetro	9,00	pulgadas
	Longitud	1,55	metros
Tubería lateral 1	Diámetro	9,00	pulgadas
	Longitud	1,20	metros
Tubería lateral 2	Diámetro	9,00	pulgadas
	Longitud	1,40	metros
Tubería de salida	Diámetro	11,00	pulgadas
	Longitud	1,50	metros
Tapa de acople 1	Caída	0,04	metros
	Alto	0,52	metros
	Ancho	0,42	metros
Tapa de acople 2	Caída	0,10	metros
	Alto	0,52	metros
	Ancho	0,42	metros


Tabla 8. Dimensiones de los componentes del modelo 2.

Modelo cámara de unión 2			
Estructura	Dimensión	Valor	Unidades
Cámara 1	Diámetro	0,78	metros
	Altura	0,80	metros
	Espesor	0,05	metros
Tubería principal	Diámetro	8,00	pulgadas
	Longitud	3,78	metros
Tubería lateral 1	Diámetro	8,00	pulgadas
	Longitud	1,20	metros
Tubería lateral 2	Diámetro	8,00	pulgadas
	Longitud	1,30	metros
Tubería de salida	Diámetro	8,00	pulgadas
	Longitud	0,80	metros
Conexión cámara-tubería	Diámetro	9,00	pulgadas
	Altura de entrada	0,00	metros

3.5. Materiales de construcción y métodos de elaboración

El material de construcción utilizado en la cámara 1 junto con sus tuberías de entrada y salida es cristal acrílico. Se definió este material de construcción porque permite observar fácilmente el comportamiento del flujo de agua a través de las estructuras, además su rugosidad es comparable a la del concreto. La cañuela de la cámara 1 está fabricada en acrílico blanco. En la fase de diseño se consideró como material de construcción de la cañuela fibra de vidrio pero dado que el acrílico posee la característica de ser más moldeable que la fibra de vidrio, se optó como material definitivo el acrílico. Esta decisión a su vez redujo significativamente los tiempos de construcción de la cañuela.

Como se había mencionado la tubería principal posee 3 tramos, para los dos primeros tramos el material es PVC (policloruro de vinilo) y el tercer tramo está construido en cristal acrílico. Esto debido a que el estudio está enfocado principalmente a estudiar el comportamiento del flujo supercrítico en la cámara teniendo como factores de comportamiento las características físicas del flujo antes de su entrada a la cámara. Por ende, el uso de cristal acrílico para toda la

longitud de tubería representa un costo adicional innecesario para la adecuada ejecución del proyecto.

Para la fabricación de la cámara 1 fue necesario solicitar al proveedor de acrílico la construcción de una lámina con ancho mayor a las ofrecidas comercialmente, pues se deseaba que la cámara se realizará a partir de una sola lamina para facilitar su construcción. Una vez se adquirió la lámina de acrílico, el proceso de fabricación consistió en calentarla en un horno hasta que fuera moldeable. Del horno se llevó a un molde previamente construido en forma de "u" con el diámetro deseado y allí se le fue dando forma a la lámina hasta quedar completamente circular. Una vez moldeada se sellaron los extremos de la lámina, puliendo cualquier defecto. Para facilitar el moldeo de la lámina, se fabricó un aro en madera con el diámetro interno de la cámara. Las tuberías de entrada y salida tuvieron el mismo proceso de fabricación. A continuación se puede observar fotos tomadas durante el proceso de elaboración.

Foto 19. Molde utilizado para la fabricación de las tuberías.



Tomada el 2 de Marzo de 2012.

Foto 20. Moldeado de la lámina de acrílico.



Tomada el 2 de Marzo de 2012.

Foto 21. Proceso de moldeado mediante adición de calor.



Tomada el 2 de Marzo de 2012.

Foto 22. Uso de moldes de madera durante la construcción de las tuberías.



Tomada el 27 de Marzo de 2012.

Foto 23. Uso de molde de madera durante la construcción de la cámara 1.



Tomada el 27 de Marzo de 2012.

La elaboración del soporte para el sensor de nivel se basó en el plano de detalle presentado en el Plano No. 4. Como se había determinado en su diseño este soporte permite realizar mediciones en tres puntos paralelos entre si y perpendiculares a la dirección del flujo. En la Foto 12 se muestra el proceso de elaboración de esté.

Foto 24. Elaboración del soporte para el sensor de nivel en la cámara 2.



Tomada el 13 de Abril de 2012.



4. Costos del proyecto

En este capítulo se realiza una descripción detallada de los costos unitarios, cantidad y costos totales de los componentes utilizados en el proyecto. La Tabla 9 se divide en 5 capítulos, cada uno correspondiente a las piezas con un material específico o para una función específica, con su correspondiente valor total. Cabe mencionar que los ítems con precio igual a \$0 se deben a que fueron proporcionados por PAVCO S.A sin ningún costo gracias al proyecto cátedra PAVCO-UNIANDES. De igual forma la Tabla 9 muestra una descripción geométrica de cada ítem. Al final de la tabla se puede observar el costo total del proyecto, este se calculo mediante la suma de todos los capítulos de la tabla. El presupuesto total del proyecto fue de **\$ 8'2593.218** pesos, lo que corresponde a 15,16 veces el salario mínimo legal vigente⁵.

Tabla 9. Presupuesto final del proyecto

No.	ITEM	Descripción	Cantidad	Costo/Unitario	Costo total
1	Componentes en acrílico				
1.1	Cámara de unión	Diámetro=0,85m, Altura=0,70m, Espesor=0,01m	1	\$ 2,825,000	\$ 2,825,000
1.2	Tubería	Diámetro=0,23m, Largo=1,20m, Espesor=0,005m	1	\$ 491,520	\$ 491,520
1.3	Tubería	Diámetro=0,23m, Largo=1,40m, Espesor=0,005m	1	\$ 573,000	\$ 573,000
1.4	Tubería	Diámetro=0,23m, Largo=1,55m, Espesor=0,005m	1	\$ 634,880	\$ 634,880
1.5	Tubería	Diámetro=0,30m, Largo=1,50m, Espesor=0,005m	1	\$ 804,000	\$ 804,000
1.6	Cañuela	Diámetro=0,85m, Altura=0,36m	1	\$ 1,350,000	\$ 1,350,000
1.7	Tapas de Acople	Alto=0,52m, Largo=0,42m	2	\$ 189,000	\$ 378,000
1.8	Refacción de tapas de acople	Alto=0,52m, Largo=0,42m	4	\$ 85,000	\$ 340,000
1.9	Accesorios Tapas de acople		2	\$ 65,000	\$ 130,000
1.10	Accesorios Cámara	Diámetro=0,32m, Largo=0,20m	4	\$ 65,000	\$ 260,000
				TOTAL CAPÍTULO	\$ 7,786,400

⁵ El salario mínimo legal vigente para el año en curso (2012) es de \$566.700 pesos



2	Componentes en polímero				
2.1	Tanque de almacenamiento	capacidad=0,6m ³ , Largo=1,20m, Ancho=0,93m, Alto=0,85m	1	\$ 477,340	\$ 477,340
2.2	Cámara de unión	Diámetro=0,78m, Altura=0,80m, Espesor=0,05m	1	\$ 0	\$ 0
2.3	Tubería	Diámetro=0,20m, Largo=6,0m	3	\$ 0	\$ 0
2.4	Tubería	Diámetro=0,23m, Largo=6,0m	3	\$ 0	\$ 0
TOTAL CAPÍTULO					\$ 477,340
4	Estructura de soporte				
4.1	Perfiles metálicos	Canal tipo channel	6	\$ 23,827	\$ 142,962
4.2	Platina ajustable	Platina metálica de 2 agujeros	12	\$ 1,741	\$ 20,892
4.3	Base	Base de 3 huecos diagonal	4	\$ 8,406	\$ 33,624
4.4	Soporte metálico tubería de salida	Alto=0,35m, Diámetro=0,04m Ancho=0,20m	1	\$ 40,000	\$ 40,000
4.5	Soporte sensor de nivel	Soporte en madera, Espesor= 0,03m	1	\$ 60,000	\$ 60,000
TOTAL CAPÍTULO					\$ 297,478
5	Estructura de conexión				
5.1	Neumático	Diámetro=0,31m	4	\$ 8,000	\$ 32,000
TOTAL CAPÍTULO					\$ 32,000
TOTAL PROYECTO					\$ 8,593,218

Montaje y resultados

4.1. Cámara 1

El proceso de elaboración de la cámara de unión 1 junto con sus tuberías, cañuela y tapas de acople tuvo una duración aproximada de 3 meses. Todas estas piezas fueron elaboradas por un mismo fabricante, lo que garantizó un acople preciso entre ellas. Es importante resaltar que el proceso de elaboración fue un trabajo artesanal, en donde, el trabajo manual fue de vital importancia para la consecución de piezas con alto grado de detalle. Acorde con lo anterior las dimensiones finales de las estructuras no son exactamente iguales a establecidas durante su diseño. El resultado final se puede observar en las fotos presentadas a continuación.

Foto 25. Cámara de unión 1.



Foto 26. Tuberías de entrada y salida de la cámara 1.



Foto 27. Cañuela en acrílico (izq) vista aguas abajo, (der) vista lateral.



Foto 28. Cañuela (izq) perfil aguas arriba, (der) perfil entrada lateral.



Foto 29. Estructura de conexión de la tubería de salida con la cámara.



Foto 30. Tapa de acople (izq) altura de caída=10cm; (der) altura de caída=16cm.



Foto 31. Tapa de acople (izq) altura de caída=4cm; (der) altura de caída=22cm.



4.2. Cámara 2

El montaje de la cámara 2 comenzó con la ubicación de la cámara sobre el soporte, debido al peso de esta se utilizó un montacarga manual para elevar la cámara al sitio deseado. Una vez situada la cámara se procedió a realizar la unión de la tubería principal. Para ello se colocó una cuerda al interior de la tubería, en un extremo de ella se instaló una pieza de madera con una longitud un poco mayor al diámetro de la tubería y en el otro extremo un palo de madera ubicado a la salida de la cámara. Se orientó la tubería en la conexión de entrada a la cámara y se procedió a girar el palo de madera hasta que la tubería estuviera completamente ajustada en la cámara. Este mismo procedimiento se llevó a cabo para las tuberías de entrada restantes y la tubería de salida. En la Foto 32 se puede observar el proceso de instalación de la tubería principal en la cámara de unión 2.

Foto 32. Instalación de la tubería principal en la cámara 2.



Como se había mencionado previamente la tubería principal para este montaje se dividió en dos tramos. Para conectarlos se utilizó un procedimiento similar al de la unión de las tuberías a la cámara, pues se colocó una sola cuerda alrededor de los dos tubos y con un palo de madera se torció la cuerda hasta que se ajustaron correctamente las dos tuberías. La Foto 33 muestra este proceso.

Foto 33. Unión de los tramos 1 y 2 de la tubería principal.



La conexión entre la tubería principal y lateral 2 con los tanques metálicos se realizó mediante la utilización de neumáticos inflados, ubicados entre la tubería y la estructura de entrada al tanque. Para su instalación se hizo una pequeña perforación a la tubería donde se introdujo la válvula del neumático. Luego se situó la tubería con el neumático alrededor, en la conexión de entrada al tanque y con un compresor se empezó a inflar el neumático hasta cubrir por completo el espaciado entre la tubería y la entrada del tanque. Para evitar fugas de agua en la conexión se sellaron los bordes con silicona líquida. La Foto 34 muestra la conexión entre la tubería lateral 2 y el tanque de almacenamiento.

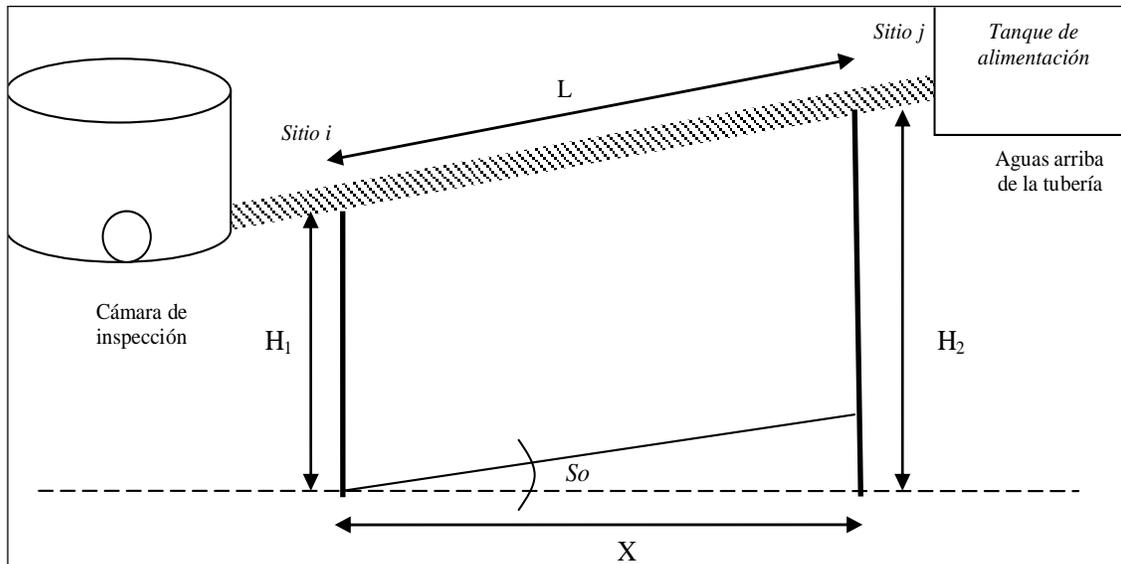
Foto 34. Conexión tubería - Tanque mediante la utilización de un neumático.



El desarrollo de las pruebas previstas para el montaje requiere tener un control detallado de las pendientes de las tuberías de entrada. Por ende, se utilizó un nivel de precisión y cintas métricas para determinar la pendiente de las tuberías. El procedimiento consistió en colocar cintas métricas en los extremos de la tubería; para el caso de la tubería principal se utilizaron cuatro cintas métricas, dos en los extremos y dos cerca a la conexión entre los dos tubos. Luego con el nivel se realizaron lecturas de todas las cintas métricas sobre la horizontal y se midió la longitud parcial de la tubería entre cada cinta. Una vez adquiridos los datos se utilizó la Ecuación 54 para calcular la pendiente. Para modificar la altura de la tubería principal se utilizaron piezas de madera de diferente altura para garantizar una pendiente uniforme a lo largo de la tubería. La Ilustración 14 explica el origen de la Ecuación 54. Después de varias mediciones se determinó una pendiente de la tubería principal de 0,99% y en la tubería lateral 2 una pendiente de 4,4%.

$$S_o = \frac{H_1 - H_2}{X} = \frac{H_1 - H_2}{\sqrt{L^2 - (H_1 - H_2)^2}} \quad \text{Ecuación 54}$$

Ilustración 14. Esquema de medición para calcular la pendiente en las tuberías.



Tomado de: (Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados de la Universidad de los Andes, 2010).



Conclusiones y Recomendaciones

Como resultado final se obtiene la cámara de unión 1 de tres flujos de entrada, dos de los cuales se encuentran perpendiculares al tercero. Con dos configuraciones de tapas de acople, lo que permite modificar la altura de caída de los flujos de entrada. En su base la cámara en acrílico cuenta con una cañuela de igual materia de caña completa, esta conduce los flujos a la estructura de conexión de salida. El radio de curvatura utilizado en la deflexión de los flujos laterales es de $D/2$, siendo D el diámetro interno de la cámara de unión 1. Adicionalmente se realizó el montaje de la cámara de unión 2 y se corroboró una pendiente fija a lo largo de la tubería principal de entrada y de la tubería lateral 2.

La dificultad en la elaboración de los componentes en acrílico se debió a las curvaturas presentes en ellos, como por ejemplo la doble curvatura en la parte inferior de la cañuela para la unión de los flujos, ocasionando un mayor tiempo de trabajo en la elaboración de los mismos. Paralelamente, acoplar las estructuras para que estas encajaran adecuadamente una entre otra demandó realizar modificaciones y en algunas piezas reconstrucciones totales, lo que aumentó de igual forma su tiempo de elaboración.

Para garantizar que el montaje no tuviera fugas, este fue sometido a varias pruebas en donde se vario el caudal en las tuberías y se evaluó el funcionamiento de las estructuras de conexión tanto de las tuberías a la cámara como de las tuberías a los tanques de almacenamiento. Las zonas donde se encontraron fugas fueron en las conexiones mediante el uso de neumáticos, entre las tuberías de entrada y los tanques de almacenamiento. El procedimiento para eliminarlas consistió en desocupar los tanques de almacenamiento, para luego recubrir los bordes del neumático con silicona líquida. Este procedimiento se repitió hasta que no se evidencia la presencia de estas fugas. Se recomienda llevar un control de estas fugas durante la ejecución de las pruebas sobre el modelo para que los datos adquiridos no se vean alterados.

La experiencia adquirida previamente por la realización de las cámaras de inspección desarrolladas por el Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados, CIACUA, facilitó el montaje y la construcción de la nueva cámara de unión, pues se redujo el tiempo de elaboración de los componentes y la realización del montaje en el laboratorio.

Se deberá evaluar los efectos causados por la longitud de la tubería de salida sobre el comportamiento del flujo, pues como se mencionaba en las investigaciones previas encontradas la ubicación de la conexión de salida en la cámara puede aumentar o disminuir la altura de las ondas presentas al interior de la cámara.



Como recomendación final es importante realizar mediciones topográficas de las pendientes de las tuberías antes de realizar pruebas sobre el montaje, pues se observó que las actividades llevadas a cabo en los modelos cercanos al montaje alteraban la altura de la tubería principal. De igual forma estas actividades generan en la tubería principal deflexiones horizontales que pueden afectar el comportamiento del flujo en su interior.



Glosario

- **Aguas arriba:** se refiere a la zona anterior a un volumen de control definido, en la dirección del flujo.
- **Aguas abajo:** en la dirección del flujo, se refiere a la zona posterior a un volumen de control definido.
- **Sistema de drenaje:** conjunto de estructuras para la recolección, conducción y disposición de las aguas residuales y/o de las aguas lluvias.
- **Canal:** conducto descubierto que transporta agua a flujo libre.
- **Cañuela:** Parte inferior de una estructura de conexión o cámara de inspección, cuya forma orienta el flujo. Tradicionalmente se elabora a media caña (cubre la mitad de la altura de los conductos entrantes) o a caña completa (cubre una altura mayor o igual a la altura de los conductos entrantes).
- **Capacidad hidráulica:** caudal máximo que puede drenar un componente o una estructura hidráulica conservando sus condiciones normales de operación.
- **Cota de batea:** nivel del punto más bajo de la sección transversal interna de una tubería o colector.
- **Cota clave:** nivel del punto más alto de la sección transversal externa de una tubería o colector.
- **Diámetro nominal:** denominación comercial con la que se conoce comúnmente el diámetro de una tubería.
- **Estructura de disipación:** elemento que disminuye la energía específica del flujo.
- **Exactitud:** medida de que tan cerca se encuentra el valor medido del valor real.
- **Flujo crítico:** estado de flujo en el cual la energía específica es la mínima para un caudal determinado.
- **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.
- **Número de Froude:** relación adimensional entre las fuerzas inerciales y las fuerzas gravitacionales, que representa el efecto de la gravedad sobre el estado de flujo.
- **Precisión:** dispersión del conjunto de valores obtenidos de mediciones repetidas de una magnitud.
- **Profundidad de flujo:** distancia vertical desde el punto más bajo de una sección transversal al flujo hasta la superficie libre.



-
- **Relación de llenado:** relación entre la profundidad del flujo y el diámetro interno de la tubería.
 - **Resalto hidráulico:** Fenómeno hidráulico en el cual se presenta un cambio de régimen de flujo supercrítico a régimen de flujo subcrítico.



Bibliografía

Bermúdez, N., & Saldarriaga, J. G. (2011). Comportamiento hidráulico de cámaras de inspección bajo condiciones de flujo supercrítico.

Camino, A., Zhu, D., & Rajaratnam, N. (2011). Hydraulics of Stacked Drop Manholes. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* , 537-552.

Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados de la Universidad de los Andes. (2010). *DETERMINACIÓN DE ECUACIONES DE DISEÑO DE CAMARAS DE INSPECCIÓN EN ALCANTARILLADOS CON FLUJO SUPERCRÍTICO*. Bogotá.

Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados de la Universidad de los Andes. (2010). *Comportamiento hidráulico de cámaras de inspección bajo condiciones de flujo supercrítico*. Bogotá.

Christodoulou, G. (1991). Drop Manholes in Supercritical Pipelines. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* , 37-47.

Del Giudice, G., & Hager, W. (2001). Supercritical Flow in 45° Junction Manhole. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* , 100-108.

Gargano, R., & Hager, W. (2002). Supercritical Flow across Sewer Manholes. *Journal of Hydraulic Engineering* , 1014-1017.

Gisonni, C., & Hager, W. (2001). Supercritical Flow in Manholes with a Bend extension. 357-365.

Granata, F., De Marinis, G., Gargano, R., & Hager, W. (2011). Hydraulics of Circular Drop Manholes. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* , 102-111.

Hager, W. (1999). *Wastewater hydraulics*. Berlin: Springer.

Hager, W., & Gisonni, C. (2005). Supercritical Flow in Sewer Manholes. 1-15.

Quejada, E., Moreno, M., & Saldarriaga, J. G. (2010). Comportamiento Hidráulico de cámaras (pozos) de conexión de grandes colectores.