

Universidad de los Andes
Facultad De Ingeniería
Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental



**TESIS DE ESPECIALIZACIÓN
INGENIERÍA DE SISTEMAS HÍDRICOS URBANOS**

**REVISIÓN CRÍTICA DEL DISEÑO DE CÁMARAS DE INSPECCIÓN
UTILIZANDO EL CRITERIO DE EMPATE POR LÍNEA DE ENERGÍA**

Preparado por:
Ing. JORGE MARIO LIZARAZO MARTÍNEZ

Asesor:
Ing. JUAN SALDARRIAGA VALDERRAMA

Informe Final Tesis

Bogotá, 15 de febrero de 2012

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	7
1 ANTECEDENTES Y OBJETIVOS.....	8
1.1 ANTECEDENTES	8
1.2 OBJETIVOS.....	8
1.2.1 <i>Objetivo General</i>	8
1.2.2 <i>Objetivos Específicos</i>	8
2 ESTADO DEL ARTE	9
2.1 GENERALIDADES	9
2.2 EL FLUJO A TRAVÉS DE CÁMARAS DE INSPECCIÓN	11
2.2.1 <i>Flujo Subcrítico</i>	11
2.2.2 <i>Flujo Supercrítico</i>	11
2.3 PRINCIPALES ESTUDIOS ACERCA DEL COMPORTAMIENTO DEL FLUJO EN CÁMARAS DE INSPECCIÓN	11
2.3.1 <i>Comportamiento Hidráulico de Cámaras de Inspección Bajo Flujo Supercrítico</i>	11
2.3.2 <i>Estudios de la FHWA</i>	13
2.3.3 <i>Otros Estudios</i>	17
3 METODOLOGÍA.....	20
4 EL CRITERIO DE EMPATE POR LÍNEA DE ENERGÍA	21
4.1 JUSTIFICACIÓN	21
4.2 CASOS	21
4.2.1 <i>Flujo Subcrítico</i>	21
4.2.2 <i>Flujo Supercrítico</i>	23
5 METODOLOGÍAS ALTERNAS DE CÁLCULO	29
5.1 FLUJO SUBCRÍTICO.....	29
5.2 FLUJO SUPERCRÍTICO – METODOLOGÍA DEL CIACUA.....	30
5.3 METODOLOGÍA DE LA FHWA-HEC 22 TERCERA EDICIÓN	32
6 REVISIÓN DEL MÉTODO DE EMPATE POR LÍNEA DE ENERGÍA.....	39
7 CONCLUSIONES	45
8 RECOMENDACIONES	46
9 BIBLIOGRAFÍA	47
10 REFERENCIAS	48

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2-1 ESTRUCTURA DE UNIÓN EN ALCANTARILLADO. TOMADA DE LA REFERENCIA 15.....	9
FIGURA 2-2 MONTAJE UTILIZADO POR LA FHWA. TOMADA DE LA REFERENCIA 12.	15
FIGURA 2-3 ELEVACIÓN DE LA LÍNEA DE ENERGÍA (ELE) PARA DIFERENTES INTENSIDADES DE DESCARGA	16
FIGURA 4-1 ESTRUCTURA DE UNIÓN CON POZO DE INSPECCIÓN. FUENTE: RAS 2000.	24
FIGURA 4-2 ANÁLISIS DE ESTRUCTURA DE UNIÓN SIN CAÍDA. FUENTE: RAS2000.....	25
FIGURA 4-3 CONDICIÓN NO SUMERGIDA. FUENTE: RAS 2000.	27
FIGURA 4-4 CONDICIÓN SUMERGIDA. FUENTE: RAS 2000.	28
FIGURA 5-1 CONTROL A LA ENTRADA. FUENTE FHWA.	32
FIGURA 5-2 CONTROL A LA SALIDA. FUENTE FHWA.	32
FIGURA 5-3 CONFIGURACIONES DE CAÑUELA DE FONDO. FUENTE: HEC-22 – 2009.	35
FIGURA 5-4 DEFINICIONES PARA EL NIVEL DE ENERGÍA EN LA CÁMARA. FUENTE: HEC 22 - 2009	38

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 4-1 COEFICIENTE DE PÉRDIDA POR CAMBIO DE DIRECCIÓN	22
TABLA 4-2 MÁXIMO ÁNGULO DE INTERSECCIÓN PARA COLECTORES SIN CAÍDA. FUENTE: RAS 2000.....	23
TABLA 4-3 VALOR DEL COEFICIENTE K_C . FUENTE: RAS 2000.....	24
TABLA 4-4 VALOR DEL COEFICIENTE K . FUENTE: RAS 2000.....	27
TABLA 5-1 ECUACIÓN DE LA ONDA PARA DIFERENTES CONFIGURACIONES. TOMADA DE LA REFERENCIA 1.	30
TABLA 5-2 ECUACIÓN PARA LA PÉRDIDA EN LA CÁMARA. TOMADA DE LA REFERENCIA 1.	31
TABLA 5-3 VALOR DEL COEFICIENTE C_B . FUENTE: HEC 22 – 2009.....	35

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

FOTOGRAFÍA 2-1 MONTAJE EXPERIMENTAL. TOMADA DE LA REFERENCIA 1.....	10
FOTOGRAFÍA 2-2 MONTAJE EXPERIMENTAL. TOMADA DE LA REFERENCIA 2.....	10
FOTOGRAFÍA 2-3 MODELO FÍSICO UTILIZADO POR EL CIACUA. TOMADA DE LA REFERENCIA 1.....	12
FOTOGRAFÍA 2-4 MONTAJE UTILIZADO POR LA FHWA. TOMADA DE LA REFERENCIA 12.....	14

ÍNDICE DE ECUACIONES

ECUACIÓN 4.2.1 ECUACIÓN DE CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA EN UNA CÁMARA BAJO FLUJO SUBCRÍTICO.	21
ECUACIÓN 4.2.2 PÉRDIDAS POR UNIÓN DE TUBERÍAS.	22
ECUACIÓN 4.2.3 CANTIDAD DE MOVIMIENTO PARA FLUJO SUPERCRÍTICO.	25
ECUACIÓN 4.2.4 VALOR DE LA INTENSIDAD DE DESCARGA PARA CONDICIÓN NO SUMERGIDA.	26
ECUACIÓN 4.2.5 COEFICIENTE H_W CONDICIÓN NO SUMERGIDA.	26
ECUACIÓN 4.2.6 COEFICIENTE H_E	26
ECUACIÓN 4.2.7 VALOR DE LA INTENSIDAD DE DESCARGA PARA CONDICIÓN SUMERGIDA.	27
ECUACIÓN 4.2.8 COEFICIENTE H_W CONDICIÓN SUMERGIDA.	27
ECUACIÓN 5.2.1 CAÍDA MÁXIMA PERMITIDA EN UNA CÁMARA.	30
ECUACIÓN 5.2.2 DIÁMETRO INTERNO REQUERIDO PARA LA CÁMARA.	31
ECUACIÓN 5.2.3 LONGITUD REQUERIDA DE LA CAÑUELA.	31
ECUACIÓN 5.3.1 ENERGÍA DE ACCESO A LA CÁMARA CON CONTROL A LA SALIDA.	33
ECUACIÓN 5.3.2 ENERGÍA INICIAL EN LA TUBERÍA DE SALIDA.	33
ECUACIÓN 5.3.3 PÉRDIDAS DE ENERGÍA POR ENTRADA A LA TUBERÍA DE SALIDA.	33
ECUACIÓN 5.3.4 INTENSIDAD DE DESCARGA.	33
ECUACIÓN 5.3.5 ENERGÍA DE ACCESO A LA CÁMARA CON CONTROL A LA ENTRADA (SUMERGIDA).	34
ECUACIÓN 5.3.6 ENERGÍA DE ACCESO A LA CÁMARA CON CONTROL A LA ENTRADA (NO SUMERGIDA).	34
ECUACIÓN 5.3.7 ENERGÍA DE ACCESO CORREGIDA.	34
ECUACIÓN 5.3.8 PÉRDIDA POR CONFIGURACIÓN DE LA CAÑUELA.	35
ECUACIÓN 5.3.9 COEFICIENTE θ_w	36
ECUACIÓN 5.3.10 COEFICIENTE C_θ	36
ECUACIÓN 5.3.11 PÉRDIDA DE ENERGÍA POR ÁNGULO DE ENTRADA.	36
ECUACIÓN 5.3.12 COEFICIENTE H_K	36
ECUACIÓN 5.3.13 COEFICIENTE C_p	37
ECUACIÓN 5.3.14 PÉRDIDA POR CAÍDA EN LA CÁMARA.	37
ECUACIÓN 5.3.15 ELEVACIÓN DE LA LÍNEA DE GRADIENTE HIDRÁULICO EN LA CÁMARA.	37
ECUACIÓN 5.3.16 ELEVACIÓN DE LA LÍNEA DE GRADIENTE HIDRÁULICO EN LA TUBERÍA DE ENTRADA.	37
ECUACIÓN 5.3.17 COEFICIENTE DE PÉRDIDA POR SALIDA DE LA TUBERÍA DE ENTRADA A LA CÁMARA.	37

INTRODUCCIÓN

Dentro de las redes de drenaje las cámaras de unión e inspección constituyen elementos críticos para el adecuado funcionamiento del sistema, debido a las perturbaciones que generan en el flujo las cuales a su vez inducen la aparición de fenómenos como remansos, resaltos hidráulicos y sobrecarga.

En consecuencia, las cámaras han sido objeto de estudio y se han desarrollado metodologías para su dimensionamiento y para el cálculo de las pérdidas generadas. En Colombia la metodología tradicionalmente aceptada y utilizada, plasmada además en el Reglamento Técnico Para el Sector de Agua Potable y Saneamiento (RAS), es la de “empate por línea de energía”, la cual busca determinar la pérdida en altura generada por la cámara y aplicarla como una caída en la cota batea para evitar la formación de un remanso o sobrecarga según el tipo de flujo.

Sin embargo, recientemente se han publicado importantes investigaciones acerca del flujo a través de cámaras en colectores especialmente bajo flujo supercrítico, con un enfoque bidimensional y estudio profundo de las ondas de choque y otros fenómenos presentes, lo cual acerca en mayor medida sus resultados al comportamiento real del flujo en la cámara.

Es importante en consecuencia analizar estos nuevos resultados y compararlos con la metodología aplicada en Colombia a fin de determinar si es necesario reevaluar este criterio y reemplazarlo por un procedimiento más exacto.

1 ANTECEDENTES Y OBJETIVOS

1.1 ANTECEDENTES

Una revisión crítica del método de diseño de cámaras utilizado en Colombia no registra antecedentes propiamente dichos. Sin embargo el comportamiento del flujo en cámaras si ha sido ampliamente tratado a nivel internacional y en los últimos años a nivel nacional. Dentro de la investigación realizada a nivel nacional se destacan los siguientes trabajos:

- *“Comportamiento Hidráulico de Cámaras de Inspección Bajo Condiciones de Flujo Supercrítico”*¹. Por Juan Saldarriaga, Nataly Bermúdez, Eccehomo Quejada y Paula A. Cuero. Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados (CIACUA), Universidad de los Andes, 2011.
- *“Determinación del Comportamiento Hidráulico de Cámaras de Inspección Plásticas”*. Mario Moreno, Daniel Rodríguez y Fabio Amador. Seminario Nacional De Hidráulica e Hidrología, Mayo de 2008, Colombia.

En el Capítulo 2 se abordan con mayor detalle los estudios realizados en los últimos años acerca del comportamiento del flujo en cámaras.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo General

- Revisar la metodología de diseño de cámaras de inspección por empate de la línea de energía, comparándola con las investigaciones más recientes y otros modelos de cálculo para establecer las fortalezas y debilidades del método y la conveniencia o no de su utilización.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Desarrollar un caso de estudio práctico y comparar los resultados aplicando diferentes metodologías.
- Analizar el comportamiento de un sistema diseñado con empate por línea de energía cuando se trabaja con caudales diferentes al de diseño.

Fotografía 2-1 Montaje experimental. Tomada de la referencia 1.

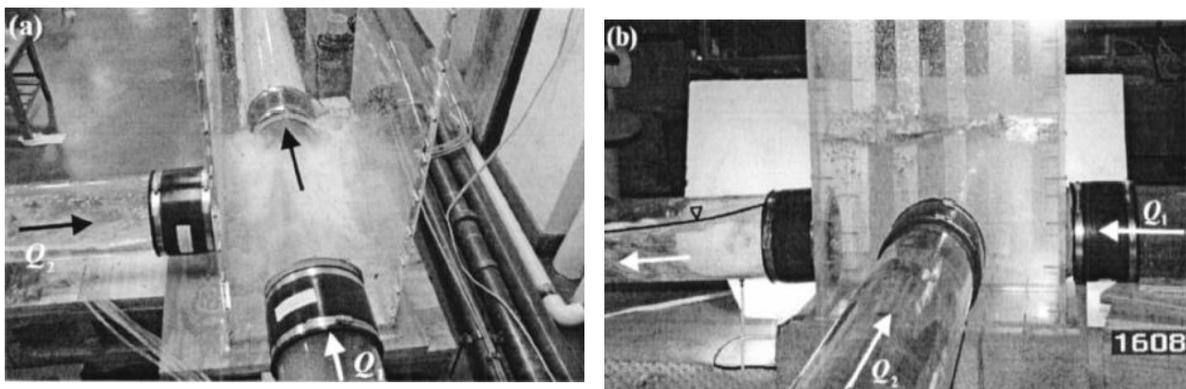


Uno de los aspectos importantes del estudio es que, aparte de analizar y describir el comportamiento del flujo, desarrolló una metodología para el cálculo de las dimensiones de la cámara de manera que se logre un funcionamiento adecuado del sistema. Por esta razón, en el presente trabajo se utilizará como referencia para el diseño de cámaras con flujo supercrítico la metodología desarrollada por el CIACUA. Los detalles del estudio se presentan en el numeral 2.3.1 y la metodología de diseño se explica en el numeral 5.2.

En Estados Unidos la Federal Highway Administration (FHWA) ha sido la entidad líder en el desarrollo de los estudios al respecto. En el numeral 2.3.2 se detallan los trabajos realizados por esta organización.

En Canadá resulta interesante el trabajo²³ realizado por los investigadores Zhao, Zhu y Rajaratnam, los cuales han analizado el fenómeno de sobrecarga en cámaras.

Fotografía 2-2 Montaje experimental. Tomada de la referencia 2.



2.2 EL FLUJO A TRAVÉS DE CÁMARAS DE INSPECCIÓN

2.2.1 Flujo Subcrítico

Se ha establecido que una aproximación unidimensional es aceptable para flujo subcrítico⁴. Estudios realizados en cámaras bajo flujo subcrítico indican que éstas se comportan como tuberías presurizadas en términos de pérdidas de energía⁵. En consecuencia es correcto aplicar coeficientes de pérdidas en forma similar a las redes de suministro. La mayoría de los métodos de diseño tienen en cuenta las características geométricas de las cámaras para determinar un coeficiente global de pérdidas que afecta el valor de altura de velocidad en la tubería de salida o al valor promedio entre la salida y entrada. El resultado corresponde a la pérdida de energía en la estructura, valor que a su vez se utiliza como caída en el fondo de la cámara para evitar que bajo ciertas condiciones la línea de energía a la salida resulte más alta y pueda generarse un remanso.

2.2.2 Flujo Supercrítico

En este caso la suposición de flujo uniforme pierde validez y el flujo pasa a ser en esencia bidimensional. La superficie libre en un flujo supercrítico es dominada por ondas de choque debido a la perturbación del flujo, el cual cambia su perfil de forma circular a uno con forma de U de igual diámetro de la tubería; sin embargo para profundidades de aproximación menores a la mitad del diámetro, la forma circular se mantiene a través de la cámara. Para flujos con número de Froude cercano a 1, aparece en la superficie distorsión ondular y posibilidad de resaltos hidráulicos, lo cual sumado a relaciones de llenado mayores a 0.5 a la salida de la cámara puede generar sobrecarga, transporte de aire, ahogamiento o flujo a presión en la salida.

Los experimentos han demostrado que para profundidades de flujo menores al 70% del diámetro, se evitan los efectos de pérdida de capacidad, lo cual contrasta con la mayoría de las normas de diseño que permiten hasta un 85% en la relación de llenado.

2.3 PRINCIPALES ESTUDIOS ACERCA DEL COMPORTAMIENTO DEL FLUJO EN CÁMARAS DE INSPECCIÓN

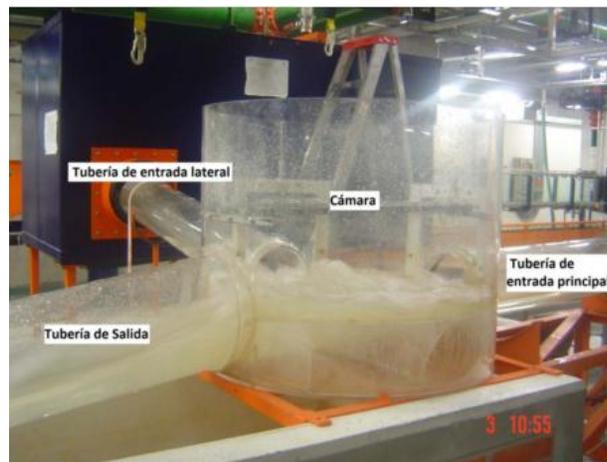
2.3.1 Comportamiento Hidráulico de Cámaras de Inspección Bajo Flujo Supercrítico

Este trabajo fue realizado por el Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados (CIACUA) de la Universidad de los Andes en el año 2011.

El objetivo de la investigación era el de analizar el comportamiento del flujo supercrítico en una cámara de inspección y con base en ello establecer una metodología para el diseño geométrico de la estructura de forma tal que se garantizara un adecuado funcionamiento del sistema.

Para lograrlo se realizó un montaje (ver Fotografía 2-1) en cristal acrílico con dos tuberías de entrada de 0.22m de diámetro, alineadas a 180° y 90° con la tubería de salida de 0.28m de diámetro y una cámara cilíndrica en acrílico de 0.85m de diámetro y 0.70m de altura con sus canales de conducción interna o cañuelas. El montaje permitía que las tuberías de entrada se pudieran ubicar a cuatro diferentes alturas sobre la batea de la cámara.

Fotografía 2-3 Modelo físico utilizado por el CIACUA. Tomada de la referencia 1.



El montaje fue instrumentado con un sensor de nivel y medidores de caudal por ultrasonido. Se evaluaron tres configuraciones:

- Cámaras con paso directo donde la tubería de entrada se encuentra alineada con la de salida.
- Cámaras con una tubería de entrada y cambio de dirección de 90° respecto a la salida.
- Cámaras con una tubería en paso directo y otra con cambio de dirección de 90° respecto a la salida.

Utilizando relaciones de llenado entre el 5% y el 75% se realizaron las mediciones de altura del nivel del agua y caudal para cada una de las configuraciones y las diferentes alturas de caída. El estudio encontró formación de cinco diferentes tipos de ondas de acuerdo con el caudal y la configuración, las cuales se describen a continuación:

- Onda A: Generada por el choque del flujo de entrada de la tubería con paso directo en la cañuela con el final de la pared interna de la cañuela de conducción del flujo de la tubería lateral.
- Onda B: Onda característica de los flujos supercríticos con paso directo sin presencia de una tubería de entrada lateral, que se forma a la entrada de la tubería de salida.

- Onda C: Generada por el choque frontal del flujo entrante por la tubería lateral con la pared de la cañuela de paso directo.
- Onda D: Generada por el choque del flujo entrante por la tubería lateral con la pared interna de la cañuela por la cual se desplaza.
- Onda E: Generada cuando se tiene flujo simultáneo en paso directo y lateral, por la unión de los flujos en el punto de confluencia de las dos cañuelas.

Aunque de acuerdo con las características del flujo y de la cámara se pueden presentar simultáneamente varios tipos de ondas, los resultados indicaron que el comportamiento se rige por la onda hidráulicamente dominante.

Con los datos obtenidos de las mediciones, los investigadores encontraron correlaciones entre la altura de la onda y las pérdidas de energía en la cámara y procedieron a realizar un análisis estadístico mediante el software Statgraphics para obtener ecuaciones de diseño que permitieron definir una metodología de trabajo para encontrar las dimensiones apropiadas de la cámara, la cual se presenta en el numeral 5.2

2.3.2 Estudios de la FHWA

Por muchos años la FHWA desarrolló métodos para la estimación de las pérdidas en cámaras de inspección, entre ellos:

- **Método del coeficiente de corrección por pérdida de energía**, basado en una investigación realizada por Chang y Kilgore⁶.
- **Método de la pérdida de energía**, presentado en el “HEC 22 Urban Drainage Manual” segunda edición con base en estudios realizados por la FHWA.⁷⁸ Este método se caracterizaba por aplicar un gran número de coeficientes de pérdidas que dependían de las características geométricas y constructivas de la cámara. Tenía la limitante de que no se podía usar cuando la cota batea de la tubería de entrada se encontraba por encima del nivel del agua en la cámara, o cuando existían muchas tuberías de entrada a la estructura. Este además es uno de los métodos disponibles en el programa SewerCad, uno de los más utilizados para el cálculo de sistemas de drenaje.
- **Método de la pérdida de energía compuesta**, desarrollado con base en un reporte de investigación de 1994⁹; se implementó en el paquete informático de análisis y diseño HYDRA (HYDRAIN, 1996) y se incluyó en la segunda edición (2001) del “HEC 22 Urban Drainage Manual”, para los casos en los cuales no se podía utilizar el método de la pérdida de energía. Este método se caracteriza al igual que el anterior por utilizar coeficientes que dependen de las características geométricas y constructivas de la cámara, con la diferencia de que el cálculo de los coeficientes es extremadamente complejo.

Sin embargo se encontraron limitaciones en éstos métodos que incluían:

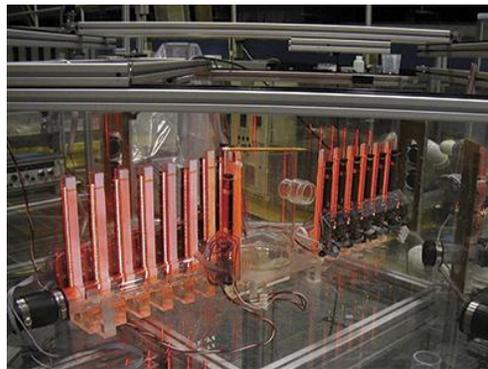
- Representación limitada de diferentes condiciones hidráulicas dentro de las cámaras.

- Resultados cuestionables cuando se trabajaba en sistemas sobrecargados o con flujo supercrítico.
- Las profundidades de flujo calculadas vs las observadas resultaban subvaloradas.
- Aplicación inconsistente en el software relacionado.

Por tal motivo la FHWA, con base en la metodología desarrollada por Roger Kilgore^{10,11}, la cual fue ajustada por él mismo de acuerdo a un estudio^{12,13} complementario realizado en 2005, incluyó en la tercera edición (2009) del “HEC 22 Urban Drainage Manual” el procedimiento de cálculo vigente a la fecha.

Para el desarrollo de su método, Kilgore utilizó como base los datos obtenidos en sus trabajos para la FHWA de 1986 a 1992 separándolos en dos grupos. En el primer grupo se incluyeron los datos de los montajes con la configuración más simple y en el otro los más complejos, para realizar ajustes a las primeras aproximaciones. Los estudios de 1986-1992 se realizaron en modelos a gran escala en una cámara de 0.60m de diámetro, con un total de 755 mediciones. Para los estudios complementarios los investigadores decidieron utilizar un modelo de pequeña escala instrumentado con elementos de gran precisión, en particular un velocímetro de imagen de partículas (VIP) para visualizar y medir los patrones de flujo, para lo cual se requería incluir en el mismo trazadores de partículas.

Fotografía 2-4 Montaje utilizado por la FHWA. Tomada de la referencia 12.

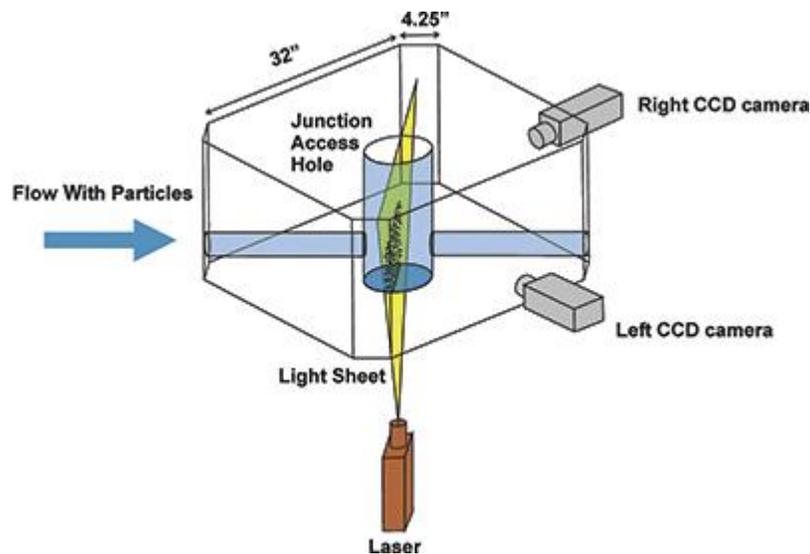


Se observan las tuberías verticales adheridas al conducto horizontal para la medición de la línea de gradiente hidráulico mediante sensores de imagen de contacto (SIC).

Los objetivos de la investigación eran en primer lugar comparar los resultados de las mediciones anteriores con la nueva metodología propuesta e incluir los rangos de pendientes y caídas que no se tuvieron en cuenta en los estudios de 1986-1992, los cuales se realizaron con el objeto de obtener aplicaciones para zonas muy planas. En segundo lugar se buscaba caracterizar el nivel de energía en la cámara con varias configuraciones de entrada y salida, realizando una modelación en tres dimensiones de los datos arrojados por el VIP. Debido a la naturaleza caótica del flujo en las cámaras los investigadores tuvieron que suponer aspectos del comportamiento de manera arbitraria con el fin de obtener resultados razonables.

El montaje consistía en tres tanques de agua, uno de entrada, otro de salida y uno principal. En el tanque principal se ubicó el modelo en cristal acrílico rodeado de agua para minimizar las distorsiones en las medidas del VIP; también se ubicaron dos sensores laser para medir la profundidad en las tuberías verticales adheridas a la tubería de entrada y salida, apuntando a discos flotantes dentro de las primeras. Otro dispositivo utilizado para medir la profundidad del flujo era un sensor de imagen de contacto (SIC), el cual tiene la ventaja de que escanea las columnas de agua arrojando la profundidad en cada una al mismo tiempo. La cámara tenía 15cm de diámetro y las tuberías 3.8cm

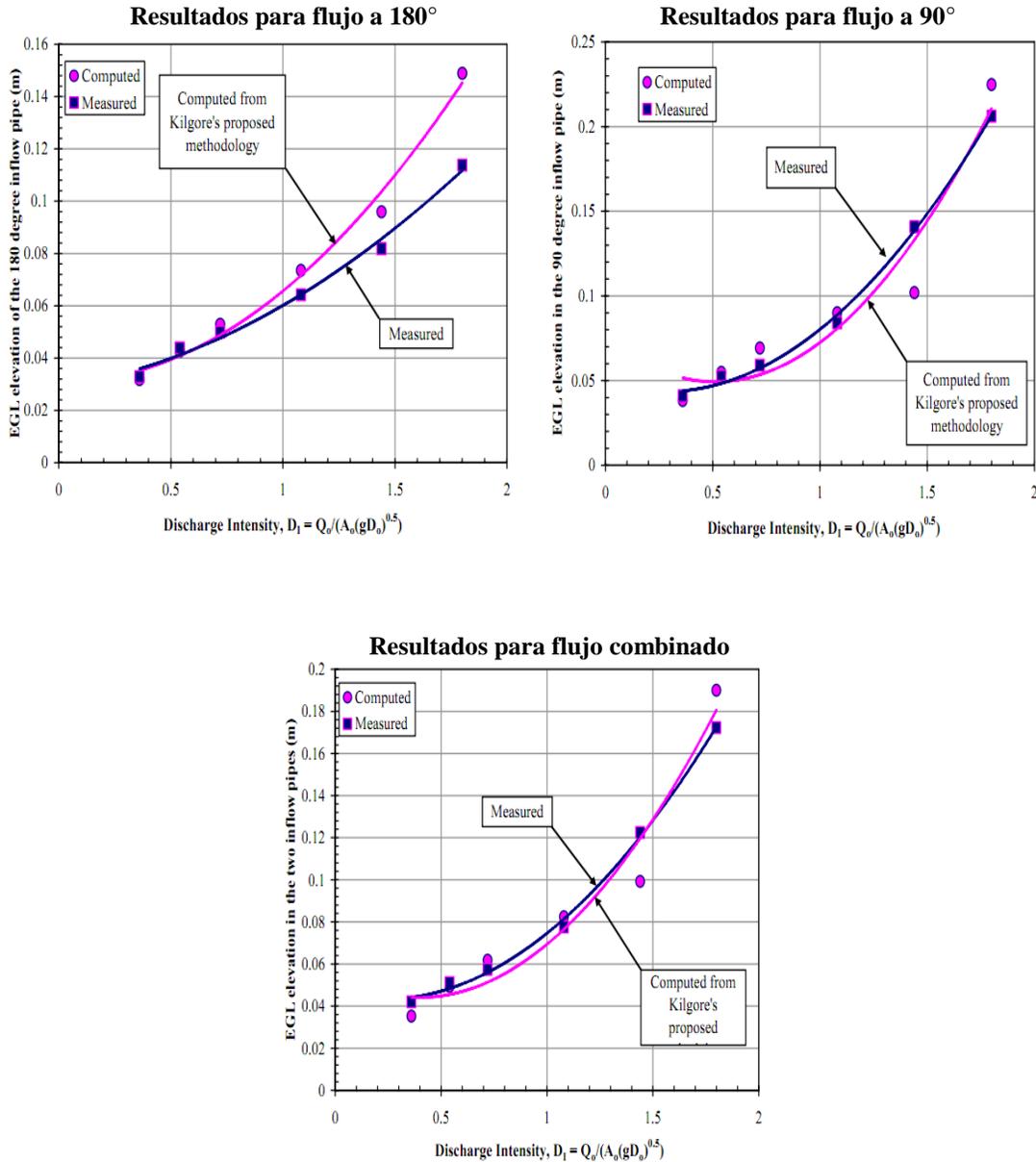
Figura 2-2 Montaje utilizado por la FHWA. Tomada de la referencia 12.



Se muestra el tanque central y un arreglo con dos cámaras digitales en ángulo y una lámina de luz generada por un dispositivo laser.

Una vez verificaron que la escala no influía en los resultados de los experimentos, los investigadores procedieron a comparar y a realizar las nuevas mediciones. Ejecutaron 18 pruebas con flujo supercrítico y tuberías de entrada a 180° y 90° con relación a la salida; adicionalmente 18 mediciones para bajo caudal. Los resultados obtenidos se ajustaron bastante a bien a los calculados utilizando la metodología de Kilgore tanto para flujo subcrítico como supercrítico. Los valores obtenidos con la ecuación propuesta para la pérdida adicional por flujo en caída coincidieron con los medidos en los ensayos sólo para relaciones altura de caída/diámetro del tubo de salida menores a 10. También encontraron una profundidad del flujo constante en el centro de la cámara para diferentes valores de la intensidad de descarga.

Figura 2-3 Elevación de la Línea de Energía (ELE) para diferentes Intensidades de Descarga



Las gráficas representan la altura de la línea de gradiente hidráulico (eje vertical) contra la intensidad de descarga (ID), que es un parámetro similar al número de Froude para tuberías a flujo lleno. La línea magenta representa el cálculo con la metodología de Kilgore; la línea azul los datos medidos en el modelo. Gráfica superior izquierda para flujo a 180°; gráfica superior derecha para flujo a 90° y gráfica inferior para flujo combinado.

Kilgore señala en su publicación que su metodología no es apropiada para altas intensidades de descarga con una tubería de salida en flujo supercrítico, debido a que el agua podría cruzar la cámara por el aire y no expandirse y contraerse de acuerdo con lo esperado.

2.3.3 Otros Estudios

A continuación se presenta una breve reseña de otros estudios importantes realizados en los últimos años:

a. Flujo Supercrítico en Cámaras en Curva¹⁴

En esta investigación se determinaron las características típicas de un flujo supercrítico a través de un canal en curva con sección transversal en forma de U que comunica dos tubos de igual diámetro (modelo físico de la cañuela); Las principales conclusiones del estudio fueron:

- El comportamiento del flujo en la cámara depende únicamente del número de Froude en la entrada de la estructura de conexión, sin importar la relación de llenado y el ángulo de desviación de la unión.
- Para números de Froude altos surge un aumento en el nivel de la lámina de agua y se origina un resalto hidráulico, que después de un choque frontal comienza a llenar la cámara; el límite del ahogo del flujo es claramente una base importante de diseño.
- El flujo supercrítico en la curva afecta principalmente la altura de la superficie libre más que la distribución de velocidades.

b. Flujo Supercrítico en Cámaras con Unión a 45°¹⁵

En este trabajo se describió la estructura principal de la onda que se presenta en una unión con sección transversal en forma de U, conformada por dos tuberías de llegada: una tubería principal aguas arriba y una tubería lateral con un ángulo de deflexión de 45°. Las principales conclusiones del estudio fueron:

- Se establecieron ecuaciones para el cálculo de la localización y altura de las ondas dominantes identificadas, en función de la relación de llenado y número de Froude.
- Se determinó la capacidad hidráulica de la unión para cada caso posible según las características del flujo en los ramales de entrada, expresada como un valor límite del número de Froude.

c. Flujo Supercrítico en Cámaras con Unión a 90°¹⁶

Este estudio se desarrolló para analizar el comportamiento de un flujo supercrítico en una unión con sección transversal en forma de U conformada por dos tuberías de llegada: una tubería principal aguas arriba y una tubería lateral con un ángulo de deflexión de 90°. Las conclusiones fueron similares a las de los anteriores trabajos. Como datos interesantes se obtuvieron los siguientes resultados:

- Cámaras de unión con dos tuberías de llegada, una aguas arriba y una lateral con ángulos de deflexión entre 30° y 90°, tienen un comportamiento hidráulico similar bajo condiciones de flujo supercrítico, siempre y cuando se conserve la modificación geométrica de la cámara descrita en el estudio previo. Lo anterior, crea una base de diseño general sin importar el ángulo de intersección de la tubería lateral.
- Todos los parámetros varían exclusivamente con el número de Froude y la relación de llenado de las tuberías.

d. Flujo Supercrítico en Cámaras de Alcantarillado¹⁷

El propósito de la investigación era el de analizar los datos recolectados en el ETH de Zurich y determinar el comportamiento del flujo en tres tipos de cámaras: paso directo, curva y unión. Las principales conclusiones del estudio fueron:

- La menor capacidad de descarga la tienen las cámaras para cambios de dirección, seguidas por las cámaras de unión con el doble de capacidad y las cámaras de paso directo con el triple de la capacidad. El efecto del ángulo de la curva resultó ser despreciable.
- El flujo en la cámara es gobernado por la presencia de ondas que se forman debido a cambios hidráulicos o geométricos en la estructura.

e. Caída en Cámara de Alcantarillado Combinado para Flujo Supercrítico¹⁸

Esta investigación identificó el efecto hidráulico del flujo supercrítico en cámaras de alcantarillado con caídas, diferenciando entre caídas pequeñas e intermedias. Las principales conclusiones del estudio fueron:

- Las cámaras con caída no mejoran el funcionamiento del flujo supercrítico, y aunque el efecto es mínimo para pequeñas caídas, se generan ondas expansivas, arrastre de aire y se llega a un resultado menos económico de diseño.
- Las caídas intermedias tienen un efecto nocivo sobre el flujo supercrítico debido a la formación excesiva de ondas y la reducción significativa de la capacidad de descarga. Por lo tanto, el uso de cámaras con caída no debe ser incorporado para un flujo supercrítico.

f. Flujo Supercrítico en Sistemas de Alcantarillado en Una Unión Combinada: Estudio de Un Modelo de Unión de Edworthy, Calgary, Alberta¹⁹

En este estudio experimental se analizó el comportamiento del flujo supercrítico en una cámara de alcantarillado mediante el uso de un modelo físico. Las principales conclusiones del estudio fueron:

- La unión de la cámara con pequeños ángulos de confluencia ayuda a conservar la energía cinética del flujo y reduce el nivel del agua en la cámara sobrecargada.
- Las pérdidas de energía generadas en la estructura de conexión se encuentran entre un 35% y un 55% de la energía de entrada. En las pérdidas se incluyen los efectos de la fricción, desviación del tubo, resalto hidráulico en los conductos aguas arriba, flujo mixto aire-agua en la cámara y pérdidas locales en la entrada y la salida de la misma.

3 METODOLOGÍA

Para lograr los objetivos propuestos se realizará una investigación bibliográfica para determinar el estado del arte del diseño de cámaras de inspección, se presentará el método de empate por línea de energía y se realizará la comparación con las metodologías propuestas por las investigaciones más recientes.

Estas investigaciones han determinado los patrones de comportamiento del flujo en cámaras y han establecido correlaciones entre los parámetros que lo definen con las dimensiones requeridas de la estructura. La revisión del método incluye el determinar si sus postulados básicos son congruentes con el comportamiento real del flujo y si consecuentemente se obtienen las dimensiones requeridas para garantizar el adecuado funcionamiento del sistema.

Por último se desarrollará un ejercicio práctico utilizando por una parte el criterio de empate por línea de energía y por otra parte la metodología que el presente trabajo considere más completa y acorde con el caso colombiano.

4 EL CRITERIO DE EMPATE POR LÍNEA DE ENERGÍA²⁰

4.1 JUSTIFICACIÓN

La unión de colectores se realiza a través de una estructura hidráulica tal como un pozo o cámara. El paso del flujo a través de dicha estructura genera pérdidas de energía. Esto puede ocasionar que, para ciertas condiciones, se requiera a la salida (teniendo en cuenta que la salida genera una pérdida adicional) una mayor energía que la disponible al descontar las pérdidas, lo cual generaría un remanso en el sistema. Para evitar esto se deja una caída en la cámara igual a las pérdidas calculadas, de modo que la energía total a la salida sea igual o menor que la disponible luego de pasar por la cámara.

4.2 CASOS

4.2.1 Flujo Subcrítico

Se calcula la pérdida localizada de energía en la cámara utilizando coeficientes “K” de manera análoga a los conductos a presión; utilizando la ecuación de Bernoulli, la pérdida total se obtiene de sumar a las pérdidas localizadas la diferencia entre los valores de energía específica a la salida y a la entrada.

Planteando la ecuación de energía entre las tuberías de entrada y salida al centro del pozo:

$$Z_1 + d_1 + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + d_2 + \frac{V_2^2}{2g} + \Delta H_e$$

$$Z_1 - Z_2 = \left(d_2 + \frac{V_2^2}{2g} \right) - \left(d_1 + \frac{V_1^2}{2g} \right) + \Delta H_e$$

$$Z_1 - Z_2 = E_2 - E_1 + \Delta H_e \quad \text{Ecuación 4.2.1}$$

dónde:

Z= Altura de posición.

d = Altura de la lámina de agua en la tubería.

$V^2/2g$ =Altura de velocidad.

ΔH_e = Pérdidas en la estructura.

E = Energía específica.

Las pérdidas de energía en la estructura ΔH_e se dividen en dos:

ΔH_d = Pérdida por cambio de dirección.

ΔH_t = Pérdida por unión o transición.

Cuando existan varias tuberías afluentes, se debe verificar que todas las cotas de energía entrantes, después de descontadas las pérdidas de energía correspondientes, sean superiores o iguales a la de la tubería efluente. Al empatar con la tubería principal entrante, los demás tramos pueden diseñarse nuevamente de tal manera que coincidan con la misma energía de la principal entrante (después de descontadas las pérdidas) en el pozo.

Pérdida por Cambio de Dirección ΔH_d

La pérdida de energía por cambio de dirección, para flujo subcrítico o supercrítico, se calcula como función de la relación entre el radio de curvatura del pozo, r_c y el diámetro de la tubería de salida D_s . En la tabla se presenta el valor de la pérdida de energía $k V^2/2g$, siendo “V” la velocidad promedio entre la tubería de entrada y la de salida.

Tabla 4-1 Coeficiente de Pérdida por Cambio de Dirección

Régimen de flujo	r_c/D_s	ΔH_d
subcrítico	1.0-1.5	$0.4V^2/2g$
	1.5-3.0	$0.2V^2/2g$
	> 3.0	$0.05V^2/2g$
supercrítico	6.0-8.0	$0.4V^2/2g$
	8.0-10.0	$0.2V^2/2g$
	>10.0	$0.05V^2/2g$

Pérdidas Debidas a la Unión de las Tuberías ΔH_t

Las pérdidas por la unión o transición obedecen al aumento o a la disminución de la velocidad debido a un cambio de diámetro, pendiente o adición de caudal. La forma general de expresión de dichas pérdidas es:

$$\Delta H_t = k \left(\frac{V_2^2}{2g} - \frac{V_1^2}{2g} \right) \quad \text{Ecuación 4.2.2}$$

$k = 0.1$ para un aumento de velocidad.

$k = 0.2$ para una disminución de la velocidad.

4.2.2 Flujo Supercrítico

Si el flujo cumple ciertas condiciones y se cuenta con suficiente espacio, se construye una estructura alargada, con gran radio de curvatura. El cálculo incluye la ecuación de cantidad de movimiento, debido a las altas velocidades. En caso contrario se utiliza una estructura con caída, a fin de disipar la energía cinética del flujo. El cálculo supone que se pierda la totalidad de la energía cinética y el comportamiento es equivalente al de una masa estacionaria de agua en un recipiente con un orificio en la base, que corresponde al colector de salida.

Unión De Colectores Sin Caída En La Estructura De Unión

En algunos casos es posible hacer la unión de colectores sin necesidad de proveer a la estructura de unión de un pozo de caída. Para esto se requiere lo cumplir con los siguientes requerimientos hidráulicos:

- a. La cota de la superficie de agua en los colectores afluentes a la estructura debe ser aproximadamente la misma. Contribuciones menores al 10% del caudal principal pueden eventualmente llegar por encima de la cota de la superficie de agua en el colector de salida.
- b. La cota de energía del colector de salida debe ser menor que la de los de entrada para evitar la formación de resaltos hidráulicos en la estructura de conexión.
- c. El máximo ángulo de intersección entre los colectores principales de entrada y salida depende del diámetro del colector de salida según la Tabla 4-2:

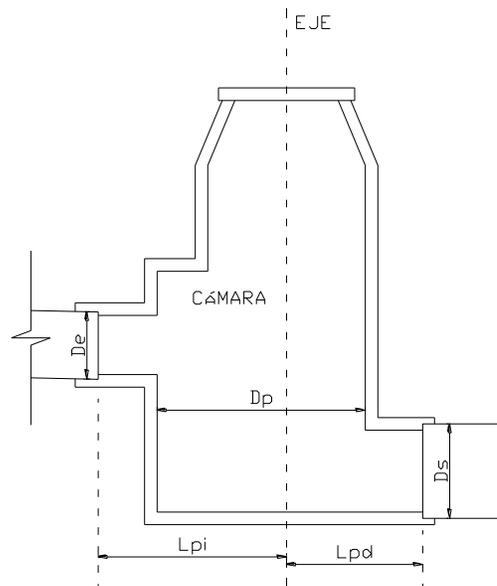
Tabla 4-2 Máximo Ángulo de Intersección Para Colectores Sin Caída. Fuente: RAS 2000.

Máximo ángulo de intersección	
Diámetro del colector de salida D_s (mm)	Ángulo
$D_s < 250$	90
$250 < D_s \leq 350$	75
$350 < D_s \leq 530$	60
$530 < D_s \leq 900$	45
$D_s > 900$	15

- d. Es necesario adecuar la unión en la estructura para evitar alteraciones en el flujo y disminuir las pérdidas en la confluencia de los colectores. Para esto puede construirse una curva en el sistema principal de recolección y evacuación de aguas residuales o lluvias que esté de acuerdo con las dimensiones de los colectores principales y las deflexiones definidas en la Tabla 4-2. Dependiendo de los elementos de la curva (radio, deflexión, tangencia, etc.), ésta puede ser desarrollada en la cañuela dentro de la estructura de unión, o a lo largo de la intersección, entre las longitudes L_{pi} y L_{pd} , de la Figura 4-1, requiriéndose una altura adecuada de la cañuela para las condiciones del caudal de diseño. La pendiente del colector en el desarrollo de la curva (P_p), está definida por la pérdida de

energía en la estructura de unión, D_{HC} , la cual se debe principalmente al cambio de dirección en el alineamiento.

Figura 4-1 Estructura de Unión con Pozo de Inspección. Fuente: RAS 2000.



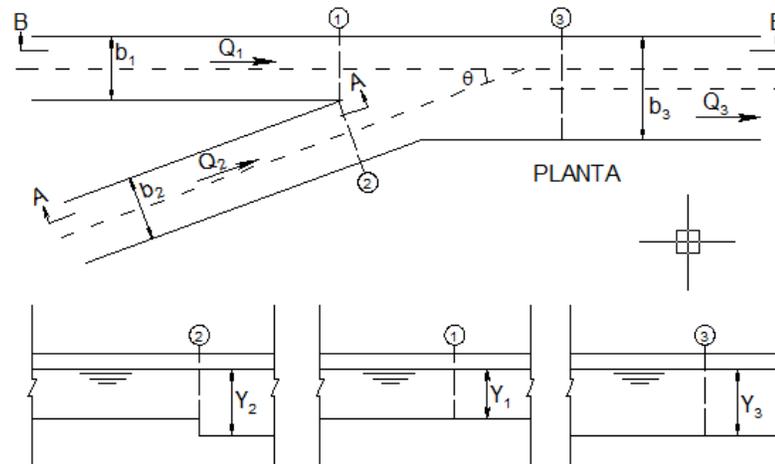
En la Tabla 4-3 Valor del Coeficiente K_c , se presentan los valores del coeficiente K_c de pérdidas de energía en flujo curvilíneo como función del radio de curvatura y el diámetro del colector de salida. D_{HC} se calcula entonces como el producto de K_c y la altura de velocidad en el colector de salida.

Tabla 4-3 Valor del Coeficiente K_c . Fuente: RAS 2000.

Coeficiente K_c	
D_p/D_s	K_c
6 - 8	1.2
8- 10	1.3
> 10	1.4

- e. Cuando se unen dos colectores con diámetros mayores a 900 mm, el análisis hidráulico de la estructura de conexión debe basarse en la ecuación de cantidad de movimiento, que puede expresarse de la siguiente forma, de acuerdo con las definiciones mostradas en la Figura 4-2.

Figura 4-2 Análisis de estructura de unión sin caída. Fuente: RAS2000



$$\frac{Q_3^2}{gA_3} + \frac{b_3 Y_3^2}{2} = \frac{Q_1^2}{gA_1} + \frac{Q_2^2}{gA_2} \cos \theta + b_3 \frac{b_3 Y_1^2}{2} \quad \text{Ecuación 4.2.3}$$

En la anterior ecuación todos los valores son conocidos excepto los de b_3 y Y_3 , por lo cual para su solución se puede iterativamente adoptar valores de b_3 para encontrar el correspondiente valor de Y_3 . Es necesario además, calcular el número de Froude en la sección 3-3 para garantizar que el régimen continuo siendo supercrítico y así evitar posibles resaltos dentro de la estructura.

Unión De Colectores Con Caída En La Estructura

Para los casos en los cuales no es justificable o no hay espacio para construir estructuras de unión como las anteriores, en particular cuando los diámetros son mayores que 900 mm, pueden hacerse estructuras de unión convencionales, que aunque son estructuras más compactas requieren en ciertos casos caídas relativamente grandes dentro de la estructura. En general, este tipo de estructura de unión (ver Figura 4-4) está limitada a caudales efluentes hasta de $5 \text{ m}^3/\text{s}$, con control de velocidades que puedan generar abrasión dentro de la estructura. En casos particulares y para caudales mayores al anterior, se deben diseñar estructuras especiales de caída que regulen el flujo, como estructuras escalonadas o parabólicas, entre otras.

En general, el análisis hidráulico en estos casos considera que la totalidad de la energía cinética del flujo se pierde en la estructura de unión y por lo tanto el comportamiento es equivalente al de una masa de agua estacionaria que para salir de la estructura de unión debe hacerlo por el orificio formado por el colector de salida. Esto corresponde al flujo en un conducto cerrado con control en la entrada, donde la capacidad del colector es mayor que la capacidad de entrada de agua a éste.

El diseño debe determinar la elevación del agua en la estructura de unión, de tal forma que la cota del agua en la estructura de unión no sobrepase las elevaciones de los flujos afluentes, las cuales pueden estimarse suponiendo flujo uniforme en la entrada de los colectores afluentes.

La entrada de agua al colector de salida puede presentarse de manera sumergida o no sumergida, dependiendo del diámetro del colector y del caudal efluente.

Entrada No Sumergida:

Se presenta cuando

$$\frac{Q}{D_s^2 \sqrt{gD_s}} \leq 0.62 \quad \text{Ecuación 4.2.4}$$

La caída en la estructura de unión (H_w) se puede estimar con la siguiente ecuación:

$$H_w = k \left(\frac{H_c}{D_s} + \frac{H_e}{D_s} \right) \quad \text{Ecuación 4.2.5}$$

$$H_e = 0.589 D_s \left(\frac{Q}{D_s \sqrt{gD_s}} \right)^{2.67} \quad \text{Ecuación 4.2.6}$$

en dónde:

Q = caudal de salida de la tubería, m³/s.

D_s = diámetro interno de la tubería de salida, m.

H_c = energía específica para las condiciones de flujo crítico.

H_e = incremento de altura debido a las pérdidas.

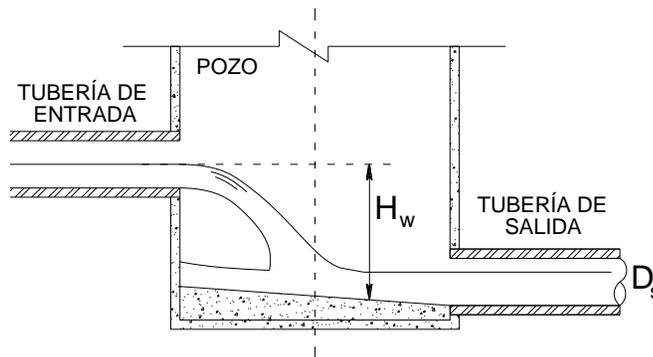
k = Coeficiente que depende de la relación entre el diámetro del pozo y el de la tubería saliente.

g = Aceleración de la gravedad.

Tabla 4-4 Valor del Coeficiente K. Fuente: RAS 2000.

Coeficiente K	
Dp/Ds	K
> 2.0	1.2
1.6 - 2.0	1.3
1.3 - 1.6	1.4
< 1.3	1.5

Figura 4-3 Condición No Sumergida. Fuente: RAS 2000.



Entrada Sumergida:

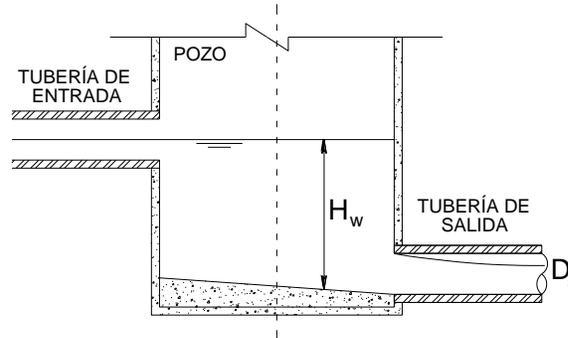
Se presenta cuando:

$$\frac{Q}{D_s^2 \sqrt{gD_s}} > 0.62 \quad \text{Ecuación 4.2.7}$$

La caída en la estructura de unión (H_w) se puede estimar con la siguiente ecuación:

$$H_w = kD_s \left[0.70 + 1.91 \left(\frac{Q}{D_s^2 \sqrt{gD_s}} \right)^2 \right] \quad \text{Ecuación 4.2.8}$$

Figura 4-4 Condición Sumergida. Fuente: RAS 2000.



MEJORA EN LAS CONDICIONES DE ENTRADA

En algunos casos la caída en las estructuras de unión puede ser lo suficientemente grande para resultar en una estructura muy costosa, ya sea porque es necesario profundizar demasiado o porque se requiere utilizar tuberías con capacidad mayor que el caudal de diseño. En estos casos es posible mejorar las condiciones de entrada, las cuales constituyen el punto crítico del sistema, haciendo una transición o boquilla en la cual se aumenta el diámetro de entrada a la estructura, disminuyendo así la elevación del agua en la estructura y por consiguiente la caída H_w en el mismo.

5 METODOLOGÍAS ALTERNAS DE CÁLCULO

5.1 FLUJO SUBCRÍTICO

No existen métodos que hayan sido desarrollados específicamente para condiciones de flujo subcrítico; sin embargo teniendo en cuenta que tal como se mencionó en el numeral 2.2.1, se ha establecido que cuando se trabaja bajo esta condición resulta apropiado el uso de coeficientes de pérdidas localizadas al estilo de los conductos a presión; el uso de cualquier método que aplique estos coeficientes podría ser válido para dicho propósito.

Gracias a la difusión del programa SewerCad, en Colombia son conocidos los siguientes métodos:

- Método Absoluto
- Método Estándar
- Método Genérico
- Método AASHTO
- Método de la pérdida de energía (HEC 22-2001), ver numeral 2.3.2
- Método de la pérdida de energía compuesta (HEC 22-2001), ver numeral 2.3.2

El método AASHTO fue publicado en el “Model Drainage Manual” de 1991; sin embargo para la versión 2005, la AASHTO declinó en favor de los métodos presentados por la HEC 22 en su edición 2001. Los otros son métodos bastante simplificados y mucho más antiguos.

En principio el procedimiento más completo y con mayor base experimental y teórica es el de la pérdida de energía compuesta. No obstante, un estudio²¹ realizado en cámaras de inspección plásticas fabricadas por PAVCO encontró que éste método, al igual que el de la pérdida de energía, subestimaban la caída de energía y que el método que presentaba la mayor correlación con los datos obtenidos experimentalmente era el de la AASHTO.

Por tal motivo y teniendo en cuenta que no se justifica un procedimiento tan complejo e impráctico como el del método de la pérdida de energía para obtener un simple coeficiente de pérdida local, para efectos de comparación de resultados en el caso práctico con flujo subcrítico, se tomarán como referentes los métodos de la AASHTO y de la pérdida de energía. Por ser estos últimos bastante conocidos, no se describen en el presente trabajo. También se pueden consultar en la referencia 1.

Es conveniente resaltar que los anteriores no son métodos de diseño propiamente dichos, sino que permiten determinar la pérdida producida por la cámara de inspección a fin de tenerla en cuenta para el cálculo de la línea de energía.

5.2 FLUJO SUPERCRÍTICO – METODOLOGÍA DEL CIACUA

La metodología desarrollada en esta investigación se puede resumir de la siguiente manera:

- Determinar la velocidad, profundidad de flujo y el número de Froude en cada una de las tuberías de entrada.
- Si hay entrada de flujo a la cámara por más de una tubería, determinar la altura de caída y verificar que se encuentre entre los límites que se indican adelante.
- Identificar el conducto hidráulicamente dominante y a su vez establecer cuál es la onda dominante dentro de la cámara.
- Calcular la altura de la onda con las ecuaciones empíricas encontradas, las cuales son función de la relación de llenado, el número de Froude y la altura de caída a la entrada de la cámara. El valor obtenido equivale a la altura necesaria de la cañuela de piso.
- Calcular la longitud requerida de la cañuela de piso.
- Calcular el diámetro requerido de la cámara de inspección.
- Calcular la pérdida de energía.

La caída mínima en la cámara para evitar la formación de un resalto es de 0.25 veces el diámetro de la tubería de entrada. La caída máxima para evitar el fenómeno de ahogo en la cámara está dada por la siguiente ecuación:

$$S_{\max} = 0.75 - 0.75D_0 \quad \text{Ecuación 5.2.1}$$

dónde:

S_{\max} = Caída máxima permitida (m).

D_0 = Diámetro interno real de la tubería de entrada (m).

Para determinar el conducto hidráulicamente dominante se aplica uno de los siguientes criterios:

- Conducto con menor ángulo de deflexión.
- Conducto con mayor altura de velocidad [$V^2/2g$].
- Conducto con mayor valor resultante al multiplicar el caudal por la velocidad.

Seguidamente se determina el tipo de onda dominante que se forma al interior de la cámara:

Tabla 5-1 Ecuación de la Onda Para Diferentes Configuraciones. Tomada de la referencia 1.

CONFIGURACIÓN	TUBERÍA DOMINANTE	CONDICIÓN	TIPO DE ONDA DOMINANTE	ECUACIÓN
Una tubería con paso directo	No aplica	Ninguna	Onda A	$h = 2.91Y_1^{1.015}F_1^{-0.025}S_1^{0.068}$
Una tubería con giro a 90°	No aplica	Ninguna	Onda C	$h = 3.41Y_2^{0.84}F_2^{0.41}S_2^{0.128}$
Una tubería con paso directo y otra con giro de 90°	Tubería con paso directo (T1)	$Q_{T2} < 10\%Q_{T2}$	Onda A	$h = 2.91Y_1^{1.015}F_1^{-0.025}S_1^{0.068}$
		$Q_{T2} > 10\%Q_{T2}$	Onda E	$h = 3.902Y_1^{0.21}Y_2^{0.55}F_1^{0.11}F_2^{0.078}S_1^{0.033}S_2^{0.129}$
	Tubería con giro a 90° (T2)	Ninguna	Onda C	$h = 2.66Y_1^{0.16}Y_2^{0.57}F_1^{0.056}F_2^{0.42}S_1^{0.0077}S_2^{-0.098}$

El diámetro interno de la cámara se obtiene con:

$$D_c = \frac{D_s}{\cos\left(\frac{\Delta}{2}\right)} \quad \text{Ecuación 5.2.2}$$

dónde:

D_c = Diámetro interno real de la estructura de conexión.

D_s = Diámetro externo real de la tubería de salida (m).

Δ = Ángulo de intersección entre los tramos.

La longitud de la cañuela o trayectoria de flujo se determina con:

$$X_c = V_c \sqrt{\frac{2h}{g}} \quad \text{Ecuación 5.2.3}$$

dónde:

X_c = Trayectoria del flujo.

V_c = Velocidad crítica.

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

g = Aceleración de la gravedad.

Se debe verificar que $D_c \geq 2X_c$

Para el cálculo de las pérdidas de energía se cuenta con las siguientes ecuaciones:

Tabla 5-2 Ecuación Para la Pérdida en la Cámara. Tomada de la referencia 1.

CONFIGURACIÓN	TUBERÍA DOMINANTE	ECUACIÓN
Una tubería con paso directo	No aplica	$\Delta E = 0.368F_1^{-0.266}Y_1^{-0.469}S_1^{-0.109}$
Una tubería con giro a 90°	No aplica	$\Delta E = 0.224F_2^{0.533}Y_2^{-0.196}S_2^{-0.278}$
Una tubería con paso directo y otra con giro a 90°	Tubería con paso directo (T1)	$\Delta E = 0.233F_1^{0.084}Y_1^{-0.363}S_1^{-0.276}$
	Tubería con giro a 90° (T2)	$\Delta E = 0.192F_2^{0.512}Y_2^{-0.161}S_2^{-0.291}$

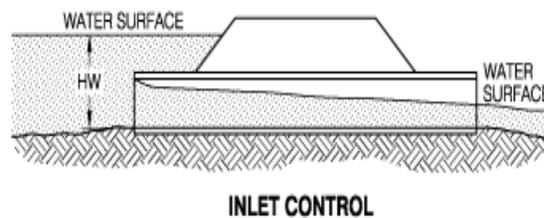
5.3 METODOLOGÍA DE LA FHWA-HEC 22 TERCERA EDICIÓN

Para poder entender esta metodología, es necesario primero aclarar el concepto de control hidráulico.

Control hidráulico: Es la sección de la tubería que determina el máximo caudal que se puede transportar. Se reconocen dos tipos de control:

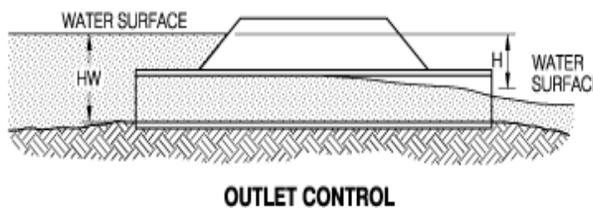
Control a la entrada: Ocurre cuando la sección de control se encuentra a la entrada o cerca a la entrada de la tubería. En este caso las características geométricas de la entrada y las pérdidas generadas en este punto dificultan el ingreso del flujo en tal forma que este circula y sale de la tubería más rápido de lo que puede entrar. Una tubería con control a la entrada siempre fluye parcialmente llena en régimen supercrítico

Figura 5-1 Control a la Entrada. Fuente FHWA.



Control a la salida: Ocurre cuando la sección de control se encuentra a la salida o cerca de la salida. En este caso las condiciones de entrada son óptimas y el caudal transportado obedece a las características hidráulicas de la tubería (rugosidad, pendiente, diámetro, etc.). Las tuberías con control a la salida pueden trabajar parcial o completamente llenas bajo flujo subcrítico.

Figura 5-2 Control a la Salida. Fuente FHWA.



Se debe anotar que los dos controles se pueden dar de forma sumergida o libre.

La metodología se compone de tres pasos fundamentales:

a. PASO 1: DETERMINAR LA ENERGÍA DE ACCESO A LA CÁMARA (E_{ai})

Se toma como la máxima calculada bajo tres condiciones posibles, lo cual a su vez determina el tipo de control y régimen hidráulico en la estructura:

- **Control a la salida:**

Control a la salida con flujo lleno.

Control a la salida con flujo parcial.

$$E_{ai} = E_i + H_i \quad \text{Ecuación 5.3.1}$$

$$E_i = EGL_i - Z_i \quad \text{Ecuación 5.3.2}$$

$$H_i = K_i (V^2/2g) \quad \text{Ecuación 5.3.3}$$

dónde:

K_i = Coeficiente de pérdida a la entrada = 0.2.

EGL_i = Altura de la línea de gradiente hidráulico a la salida.

Z_i = Cota batea de la tubería de salida.

V = Velocidad.

g = aceleración de la gravedad.

- Control a la entrada (entrada sumergida): Como las características de la entrada a la tubería de salida limitan el flujo, la profundidad del agua en la cámara se incrementa de tal forma que la salida puede ser tratada como un orificio.

Se utiliza el parámetro intensidad de descarga:

$$DI = \frac{Q}{[A(gD_0)^{0.5}]} \quad \text{Ecuación 5.3.4}$$

dónde:

A = área transversal de la tubería de salida (m^2).

g = aceleración de la gravedad (m/s^2).

D_0 = diámetro de la tubería de salida (m).

Q = Caudal (m^3/s).

Luego:

$$E_{ai} = D_0(DI)^2 \quad \text{Ecuación 5.3.5}$$

- Control a la entrada (entrada no sumergida): El mismo caso anterior con la diferencia de que la altura del agua en la cámara no es suficiente para el tratamiento como orificio sino como vertedero:

$$E_{ai} = 1.6D_0(DI)^{0.67} \quad \text{Ecuación 5.3.6}$$

Según la HEC 22, Los datos experimentales indican que esta condición se presenta para intensidades de descarga entre 0 y 0.5, lo cual no limita la validez de la ecuación.

b. PASO 2: AJUSTES POR CAÑUELA, ÁNGULO DE ENTRADA Y FLUJO EN CAÍDA

El nivel de energía inicial calculado en el paso 1 es usado como base para estimar pérdidas adicionales por:

- Cañuela.
- Tuberías de entrada a la cámara con ángulos diferentes de 180°.
- Flujos de entrada a la estructura por encima del nivel del agua en la misma.

Estos efectos pueden ser estimados y aplicados a la energía de entrada usando el principio de superposición. La energía de acceso corregida (E_a) es igual a la estimada en el paso 1, modificada por cada uno de los tres factores:

$$E_a = E_{ai} + HB + H\theta + HP \quad \text{Ecuación 5.3.7}$$

dónde:

HB = Pérdida en la cañuela.

H θ = Pérdida por ángulo de entrada a la cámara.

HP = Pérdida por caída.

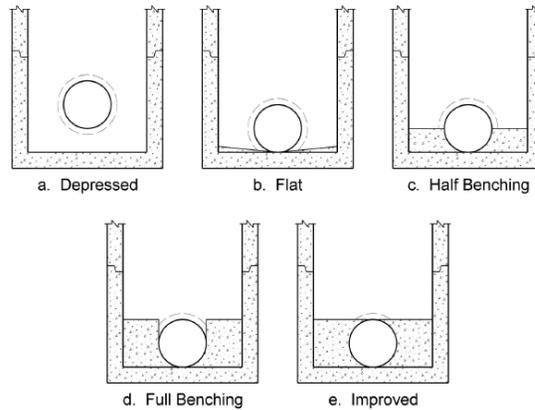
E_a = altura de la línea de gradiente hidráulico en el pozo. Sin embargo si E_a resulta ser menor que E_i , entonces E_a debe ser igualado a E_i

Si se quiere conocer la altura de la lámina de agua en el pozo, el método establece como una aproximación conservadora usar el valor de E_a .

• **Pérdida Por Cañuela**

En la Figura 5-3 se muestran las diferentes configuraciones para la cañuela de fondo.

Figura 5-3 Configuraciones de Cañuela de Fondo. Fuente: HEC-22 – 2009.



La pérdida por cañuela se calcula como:

$$HB = CB (E_{ai} - E_i) \quad \text{Ecuación 5.3.8}$$

dónde:

CB = Coeficiente de pérdida por cañuela; un valor negativo indica que la altura de la lámina se reduce. Se obtiene de la siguiente tabla:

Tabla 5-3 Valor del Coeficiente C_B . Fuente: HEC 22 – 2009.

VALORES DEL COEFICIENTE C_B		
Configuración del piso	Cañuela sumergida	Cañuela no sumergida
Deprimido (a)	0	0
Plano (b)	-0.05	-0.05
Media caña (c)	-0.05	-0.85
Canal completo (d)	-0.25	-0.93
Aumentado (e)	-0.6	-0.98

La condición sumergida se da para relaciones $E_{ai}/D_0 > 2.5$ y la condición no sumergida para $E_{ai}/D_0 > 1.0$. Los valores de C_B para condiciones intermedias se deben interpolar linealmente.

- **Pérdida Por Ángulo De Entrada**

Primero se calcula el siguiente coeficiente:

$$\theta_w = \Sigma (QJ \theta_J) / \Sigma QJ \quad \text{Ecuación 5.3.9}$$

dónde:

QJ = Caudal de entrada de la tubería J , m^3/s .

θ_J = Ángulo de entrada con relación a la tubería de salida (grados).

La suma incluye únicamente flujos sin caída; si todos los flujos se dan con caída entonces $\theta_w=180$.

Luego se calcula el coeficiente $C\theta$:

$$C\theta = 4.5 (\Sigma QJ / Q_o) \cos (\theta_w / 2) \quad \text{Ecuación 5.3.10}$$

dónde:

Q_o = caudal en la tubería de salida, m^3/s .

El valor de $C\theta$ se aproxima a cero conforme θ_w se acerca a 180° y el caudal de entrada a cero.

Luego la pérdida de energía por ángulo de entrada es igual a:

$$H\theta = C\theta (E_{ai} - E_i) \quad \text{Ecuación 5.3.11}$$

- **Pérdida Por Caída**

El flujo en caída se define como el flujo en una tubería con cota batea superior a la cota de la lámina de agua en el pozo (la altura de la lámina de agua en el pozo se aproxima como E_{ai}). El método define una altura relativa de caída “ h ” para el tubo “ k ”:

$$h_k = (z_k - E_{ai}) / D_o \quad \text{Ecuación 5.3.12}$$

dónde:

Z_k = Diferencia entre las cotas batea de la tubería de entrada y la cámara. Si $Z_k > 10D_o$ entonces se toma $Z_k = 10D_o$.

Luego se calcula el coeficiente de flujo en caída (CP):

$$CP = \Sigma (Q_k h_k) / Q_o \quad \text{Ecuación 5.3.13}$$

Por último la pérdida (HP) por caída se calcula como:

$$HP = CP (E_{ai} - E_i) \quad \text{Ecuación 5.3.14}$$

Línea de Gradiente de Energía en la Cámara

Conociendo la altura de energía a la entrada (E_a) y suponiendo que la cota batea de la cámara (z_a) es la misma de la tubería de salida (z_i), se puede determinar la altura de la línea de gradiente hidráulico (EGLa) en la cámara:

$$EGLa = E_a + Z_a \quad \text{Ecuación 5.3.15}$$

c. PASO 3: PÉRDIDAS POR SALIDA EN LAS TUBERÍAS DE ENTRADA

El paso final es calcular la línea de gradiente hidráulico (EGLo) en cada tubería de entrada.

- **Tuberías Sin Caída:**

$$EGLo = EGLa + H_o \quad \text{Ecuación 5.3.16}$$

$$H_o = K_o (V^2 / 2g) \quad \text{Ecuación 5.3.17}$$

K_o = Coeficiente de pérdida por salida de la tubería de entrada a la cámara = 0.4.

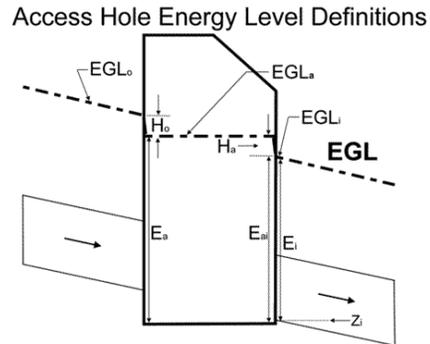
- **Tuberías con caída:**

Para tuberías con caída la línea de gradiente hidráulico es independiente de la altura de la lámina de agua en la cámara y es calculada según la hidráulica del tubo de entrada.

CONTINUACIÓN DE LOS CÁLCULOS AGUAS ARRIBA

La altura de la línea de gradiente hidráulico obtenida es usada para continuar los cálculos aguas arriba hasta la siguiente cámara. En cada pozo se repiten los tres pasos descritos.

Figura 5-4 Definiciones Para el Nivel de Energía en la Cámara. Fuente: HEC 22 - 2009



6 REVISIÓN DEL MÉTODO DE EMPATE POR LÍNEA DE ENERGÍA

Con base en las investigaciones presentadas anteriormente, que corresponden al estado del arte en el análisis del flujo en cámaras de inspección, se puede realizar entonces una crítica a los postulados del método de empate por línea de energía, indicando cuales aspectos del comportamiento real en la estructura no se reflejan en los resultados obtenidos.

FLUJO SUBCRÍTICO

Tal como se presentó en el numeral 2.2.1, un análisis unidimensional y el uso de coeficientes de pérdidas es una aproximación válida para el cálculo de las pérdidas en cámaras con flujo en régimen subcrítico. El método de empate por línea de energía que en adelante se denominará “**MELE**”, utiliza ese enfoque, calculando coeficientes que tienen en cuenta los efectos del cambio de dirección y aumento o disminución de la velocidad.

Teniendo en cuenta que el MELE tiene su origen en los estudios realizados en Estados Unidos para Culverts (alcantarillas para permitir el paso de agua de escorrentía bajo estructuras de caminos), el método más apropiado para realizar una comparación es el de la HEC 22 tercera edición. Al respecto, el MELE presenta las siguientes deficiencias:

- No tiene en cuenta las pérdidas generadas a la entrada y salida de la cámara.
- No tiene en cuenta las pérdidas en la cañuela y la configuración de la misma.
- No tiene en cuenta el efecto que provoca la caída del flujo cuando la cota batea de las tuberías entrantes es superior a la altura de la lámina de agua en la cámara.
- El hecho de que existan uno o varios caudales de entrada a la estructura no altera el procedimiento de cálculo.

FLUJO SUPERCRÍTICO

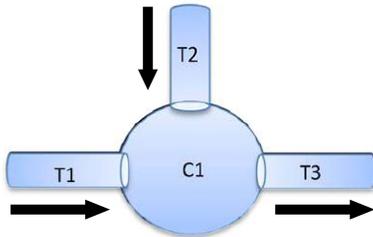
Básicamente en este caso el MELE deja de ser un procedimiento de cálculo para convertirse en uno que obliga al flujo a comportarse de una manera en la cual sí pueda analizarlo, estableciendo un control hidráulico a la entrada. Esto tampoco deja de tener sus inconvenientes, ya que en ocasiones no es posible dejar la caída necesaria para disipar la energía del flujo sin tener que recurrir posteriormente a bombeo, aparte de los mayores costos en tiempo y dinero por excavaciones y estructuras más profundas.

Por tanto no es posible hacer una crítica diferente a la mencionada, ya que el MELE no presenta un análisis matemático o experimental para esta condición.

EJEMPLO PRÁCTICO

A continuación se desarrolla un ejemplo de cálculo para comparar los resultados siguiendo las diferentes metodologías presentadas anteriormente. Se calculará con el método del CIACUA, de la HEC 22 y con el MELE para posteriormente presentar las conclusiones a lugar. A continuación se encuentran los datos de entrada:

TUBERÍA	ID	S ₀ (%)	D ₀ (m)	Q (m ³ /s)	Caída (m)
Entrada	T1	0.015	0.25	0.05	0.55
Entrada	T2	0.02	0.3	0.15	0.47
Salida	T3	0.02	0.35	0.20	0.00



METODOLOGÍA DEL CIACUA (ver numeral 5.2):

- a. Determinar la velocidad, profundidad y número de Froude en cada tubería:

TUBERÍA	Y _n	Y _n /D ₀	V (m/s)	v ² /2g	F
Entrada	0.131	0.522	1.9263	0.1891	1.91
Entrada	0.181	0.603	3.3361	0.5673	2.73
Salida	0.235	0.67	3.7893	0.7318	2.65

- b. Determinar si se cumple con las limitantes en la altura de caída (S²):

ID	D ₀ (m)	Cota batea (m)	Caída (m)	Caída min (m)	Caída max (m)
T1	0.25	110.95	0.55	0.0625	0.5625
T2	0.3	110.87	0.47	0.075	0.525
T3	0.362	110.40	0.00		

Por tanto se cumple con los requerimientos.

- c. Definir el conducto y la onda hidráulicamente dominante:

Se adopta como tubería dominante la que presente el mayor valor resultante de multiplicar el caudal por la velocidad, que resulta ser la tubería 2:

ID	Q (m ³ /s)	V (m/s)	Q x V
T1	0.05	1.9263	0.096
T2	0.15	3.3361	0.500
T3	0.20	3.7893	0.75786

Esto implica que la onda dominante en el sistema será del tipo C.

- d. Determinar la altura de la onda

ID	Y _n /D ₀	F	Caída "S" (m)	Ecuación de la Onda	h/(D ₀ /2)	Altura de la onda - h (m)
T1	0.522	1.91	0.55	$h = 2.66Y_1^{0.16}Y_2^{0.57}F_1^{0.056}F_2^{0.42}S_1^{0.0077}S_2^{-0.098}$	3.04697	0.419
T2	0.603	2.73	0.47			
T3	0.67	2.65	0.00			

- e. Determinar la pérdida de energía:

ID	Y _n /D ₀	V (m/s)	F	Caída "S" (m)	Ecuación de la Pérdida	ΔE
T1	0.46	2.6812	2.88	0.55	$\Delta E = 0.192F_2^{0.512}Y_2^{-0.161}S_2^{-0.291}$	0.537
T2	0.57	4.7668	4.06	0.47		

- f. Determinar la longitud de la cañuela o trayectoria de flujo para la tubería hidráulicamente dominante con la ecuación 5.2.3:

$$X_c = V_c \sqrt{\frac{2h}{g}} = 0.82m$$

- g. Determinar el diámetro de la cámara con la ecuación 5.2.2:

$$D_c = \frac{D_s}{\cos\left(\frac{\Delta}{2}\right)} = \frac{0.35}{\cos\left(\frac{3\pi/4}{2}\right)} = 0.91m$$

Se verifica este valor contra el doble de la trayectoria de flujo $D_c = 2X_c = 2*0.82 = 1.64m$; por tanto el diámetro de diseño para la cámara es de 1.64m.

Se tiene como resultado entonces una cámara con 1.64m, cañuelas de 0.42m de alto y 0.82m de longitud y una pérdida de energía de 0.537m.

METODOLOGÍA DE EMPATE POR LÍNEA DE ENERGÍA

Para flujo supercrítico este método sólo permite definir la altura de caída en la cámara. Primero se calcula la intensidad de descarga.

$$\frac{Q}{D_s^2 \sqrt{gD_s}} = 0.88$$

Cuando el resultado es mayor a 0.6 quiere decir que se presenta entrada sumergida, por lo que la caída en la cámara está dada por la ecuación 4.2.8:

$$H_w = kD_s \left[0.70 + 1.91 \left(\frac{Q}{D_s^2 \sqrt{gD_s}} \right)^2 \right]$$

Suponiendo una cámara tradicional de 1.20m de diámetro, el coeficiente k es igual a 1.2. Por tanto:

$$H_w = 1.2 * 0.35 \left[0.70 + 1.91 \left(\frac{0.20}{0.35^2 \sqrt{9.81 * 0.35}} \right)^2 \right] = 0.92m$$

Por tanto se tiene una cámara de 1.20m de diámetro, con una caída de 0.92m entre la altura de la lámina de agua del colector entrante más bajo y el fondo de la cámara; es decir $0.92m - 0.181m = 0.739m$ entre la batea de la tubería lateral y el fondo de la estructura. Si se tiene en cuenta el recubrimiento mínimo de 1m a la clave de la tubería más elevada, la altura total de la cámara es de 2.04m. Aparte según la normatividad vigente se deberá construir una cámara de caída.

MÉTODO DE LA HYDRAULIC ENGINEERING CIRCULAR 22 (HEC22-FHWA)

PASO 1. Determinar la energía inicial:

Se toma el mayor valor entre tres cálculos:

- Condición de control a la salida:

$$K_i = 0.2$$

$$H_i = K_i x \frac{v^2}{2g} = 0.2 x 0.73 = 0.15m$$

$$E_{ai} = E_i + H_i = 0.97 + 0.15 = 1.12m$$

- Control a la entrada en condición sumergida

$$DI = \frac{Q}{[A(gD_0)^{0.5}]} = \frac{3.79}{\sqrt{9.81x0.35}} = 2.04$$

$$E_{ai} = D_0(DI)^2 = 0.35x(2.04)^2 = 1.45m$$

- Control a la entrada en condición no sumergida

$$E_{ai} = 1.6D_0(DI)^{0.67} = 1.6x0.35x(2.04)^{0.67} = 0.90m$$

En consecuencia la condición hidráulica es control a la entrada en condición sumergida, que curiosamente es la misma que busca generar el MELE. El valor de E_{ai} queda definido como 1.45m.

Paso 2. Ajustes por Cañuela, Ángulo de Entrada y Caída

$$E_a = E_{ai} + H_B + H_\theta + H_P$$

Ajuste por cañuela:

$$H_B = C_B(E_{ai} - E_i) = -0.05 x 0.48 = -0.02$$

Ajustes por ángulo de entrada:

$$\theta_w = 112.5$$

$$C_\theta = 4.27$$

$$H_\theta = C_\theta(E_{ai} - E_i) = 4.27 \times 0.48 = 2.05m$$

Ajustes por caída:

$$H_1 = \frac{0.55 - 1.45}{0.30} = -3m$$

$$H_2 = \frac{0.47 - 1.45}{0.25} = -3.92m$$

$$C_p = -3.64$$

$$H_p = -1.77m$$

Con esto se obtiene el nivel de energía en el pozo:

$$E_a = E_{ai} + H_B + H_\theta + H_p = 1.71m - 0.02m + 2.05m - 1.77m = 1.71m$$

Paso 3. Pérdidas a la entrada

Debido a que las dos tuberías de entrada tienen flujo en caída, las pérdidas en la entrada a la cámara son independientes de las pérdidas en el pozo y la salida. El cálculo se debe hacer entonces de acuerdo con las ecuaciones de la hidráulica. Para efectos del presente trabajo no se requiere hacer dicho cálculo, pues no influye en las pérdidas totales de la estructura.

Se ve entonces que la energía en la tubería de salida es de 0.97m y la energía en el pozo, es de 1.71m lo que indica que la pérdida en la cámara es de 0.74m, mucho más que los 0.537m obtenidos con la metodología del CIACUA. Cabe resaltar que el método de la HEC 22 se comprobó para intensidades de descarga menores a 1.6 y en el presente ejercicio el valor es de 2.04; el autor del método indica en su estudio la posible falla del procedimiento para intensidades de descarga grandes, aunque no define el límite. Por otra parte la misma FHWA reconoce la dificultad en determinar la altura de velocidad al interior de la cámara.

7 CONCLUSIONES

El flujo en cámaras de inspección, principalmente bajo condición supercrítica, es un fenómeno difícil de modelar incluso bajo condiciones controladas. La determinación de la altura de la lámina de agua dentro del pozo en un flujo altamente turbulento resulta bastante problemática.

En Colombia el método aceptado y plasmado en las normas desde el año 2000 para el cálculo de las pérdidas de energía en pozos de inspección es el de Empate por Línea de Energía. Este método, que fue desarrollado de acuerdo con estudios realizados en Estados Unidos en alcantarillas para drenaje de escorrentía de aguas lluvias bajo estructuras de caminos (Culverts) presenta serias falencias que llevan a estructuras sobredimensionadas y de difícil implementación.

Para flujo subcrítico se presentan los siguientes inconvenientes:

- No tiene en cuenta las pérdidas generadas a la entrada y salida de la cámara.
- No tiene en cuenta las pérdidas en la cañuela y la configuración de la misma.
- No tiene en cuenta el efecto que provoca la caída del flujo cuando la cota batea de las tuberías entrantes es superior a la altura de la lámina de agua en la cámara.
- El hecho de que existan uno o varios caudales de entrada a la estructura no altera el procedimiento de cálculo.

Para flujo supercrítico el método de ser un procedimiento de cálculo para convertirse en uno que obliga al flujo a comportarse de una manera en la cual sí pueda analizarlo, estableciendo un control hidráulico a la entrada que implica que el sistema se comporte como una masa de agua estacionaria saliendo por un orificio. Las caídas de altura necesarias para obtener este comportamiento resultan imprácticas pues se pierden valiosos centímetros que incrementan los costos y obligan al bombeo de las aguas antes de lo necesario.

Por otra parte este método no corresponde al estado del arte para el diseño de Culverts, el cual en este momento se encuentra plasmado en el método de la HEC 22 tercera edición (2009).

El ejemplo desarrollado arrojó como resultado unas pérdidas calculadas según la HEC 22 superiores en un 37.8% a las calculadas con la metodología del CIACUA; sin embargo se debe anotar que en los estudios de la FHWA se emplearon intensidades de descarga, inferiores a las del ejercicio.

Todo lo anterior desnuda que el diseño de cámaras en el país se hace bajo criterios equivocados que generan mal funcionamiento hidráulico de los sistemas de drenaje, por lo que es necesario reevaluar el método atendiendo a los resultados de las investigaciones de los últimos doce años.

8 RECOMENDACIONES

Es necesario continuar con la investigación de este fenómeno, rompiendo las limitaciones que presentan los estudios para así completar la descripción del comportamiento del flujo en cámaras.

Mientras tanto se hace evidente la necesidad de actualizar el método de cálculo utilizado en el país, para lo cual se dispone de varias metodologías desarrolladas en los últimos años, lo cual permitirá a los ingenieros realizar diseños más acordes a la realidad y a las empresas operadoras la reducción de los costos de mantenimiento.

9 BIBLIOGRAFÍA

- Hager, Willi. *Wastewater Hydraulics*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010.
- Saldarriaga, Juan, Nataly Bermúdez, Eccehomo Quejada y Paula A. Cuero. *Comportamiento hidráulico de cámaras de inspección bajo condiciones de flujo supercrítico*. Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados CIACUA, Universidad de los Andes, 2011.
- Ministerio de Desarrollo Económico. República de Colombia. *Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS 2000*.
- Brown, Schall, Morris, Doherty, Stein y Warner. *Urban Drainage Design Manual HEC-22*. Federal Highway Administration: 2009, tercera edición; 2001 segunda edición.

10 REFERENCIAS

- ¹Juan Saldarriaga, Nataly Bermúdez, Eccehomo Quejada y Paula A. Cuero. Comportamiento hidráulico de cámaras de inspección bajo condiciones de flujo supercrítico. Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados CIACUA, Universidad de los Andes, 2011.
- ²Can-Hua Zhao, David Z. Zhu y Nallamuthu Rajaratnam. *Experimental Study of Surcharged Flow at Combining Sewer Junctions*. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 132, No. 12, Diciembre 1, 2006.
- ³Can-Hua Zhao, David Z. Zhu y Nallamuthu Rajaratnam. *Computational and Experimental Study of Surcharged Flow at a 90° Combining Sewer Junction*. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 134, No. 6, Junio 1, 2008.
- ⁴Hager, Willi. *Wastewater Hydraulics*. 2da edición, Capítulo 16.1 Springer: 2010, Berlín Heidelberg.
- ⁵Hager, Willi. *Wastewater Hydraulics*. 2da edición, Capítulo 2.4.1. Springer: 2010, Berlín Heidelberg.
- ⁶Federal Highway Administration, 1989. *Calculation of Head Loss Coefficients for Junction Manholes*, unpublished research report by F.M. Chang and R.T. Kilgore.
- ⁷Normann, J. M., Houghtalen, R. J. and Johnston, W. J., 1985. *Hydraulic Design of Highway Culverts*. *Hydraulic Design Series No. 5*, Federal Highway Administration, FHWA-IP-85-15, McLean, VA.
- ⁸ Federal Highway Administration, Revised 1993. *Urban Drainage Design Participant Notebook, Course No. 13027*. United States Department of Transportation, Federal Highway Administration, National Highway Institute Publication No. FHWA HI-89-035, Washington, D.C.
- ⁹Chang, F.M., Kilgore, R.T. et al., 1994. *Energy Losses through Junction Manholes*, Volume I: Research Report and Design Guide, FHWA-RD-94-080, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, McLean, VA.
- ¹⁰ Kilgore, R.T., 2005. *A Proposed Storm Drain Energy Loss Methodology for Access Holes*, presented at the Transportation Research Board 84th Annual Meeting, Washington, D.C., Enero 9-13.
- ¹¹ Kilgore, R.T., 2006. *A Proposed Storm Drain Energy Loss Methodology for Access Holes*, unpublished report to FHWA, January.
- ¹²Kornel Kerenyi y Sterling Jones. *Energy Losses in Storm Drain Access Holes*. FHWA-HRT-07-036 - Marzo, 2007.
- ¹³Kornel Kerenyi, Sterling Jones y Stuart Stein. *Junction Loss Experiments: Laboratory Report*. FHWA-HRT-2006-002 Public Roads Magazine Ene/Feb 2006 Vol. 69 No. 4
- ¹⁴Del Giudice, Giuseppe, Corrado Gisonni y Willi Hager. *Supercritical Flow in Bend Manhole*. Journal Of Irrigation And Drainage Engineering, 126, 48 (2000)
- ¹⁵Del Giudice, Giuseppe y Willi Hager. *Supercritical Flow in 45° Junction Manhole*. Journal Of Irrigation And Drainage Engineering, 127 No. 2, Marzo/Abril, 2001
- ¹⁶Corrado Gisonni y Willi Hager. *Supercritical Flow in the 90° Junction Manhole*. Urban Water, Diciembre de 2002, Pg 363-372.
- ¹⁷Hager, Willi y Corrado Gisonni. *Supercritical Flow in Sewer Manholes*. *Acqua e città I convegno nazionale di idraulica urbana*. Sant'Agello (NA), Septiembre 2005.
- ¹⁸ De Martino, Flavio, Corrado Gisonni y Willi Hager. *Drop in Combined Sewer Manhole for Supercritical Flow*. Journal Of Irrigation And Drainage Engineering, Noviembre/Diciembre 2002/397.
- ¹⁹ Can-Hua Zhao, David Z Zhu, Nallamuthu Rajaratnam. *Supercritical sewer flows at a combining junction: A model study of the Edworthy trunk junction, Calgary, Alberta*. Journal of Environmental Engineering and Science, 2004, 3:(5) 343-353.
- ²⁰ Fuente: RAS 2000 y "Elementos de Diseño Para Acueductos y Alcantarillados", de Ricardo Lopez Cualla.
- ²¹ Mario Moreno, Daniel Rodríguez y Fabio Amador. *Determinación del Comportamiento Hidráulico de Cámaras de Inspección Plásticas*. Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología, Mayo de 2008, Colombia.