

XIX SEMINARIO NACIONAL DE HIDRÁULICA E HIDROLOGÍA

HIDRÁULICA DE CÁMARAS DE QUIEBRE DE ALTA CAÍDA. MODELACIÓN FÍSICA

Juan Saldarriaga¹, Eccehomo Quejada², Rosana Cortina² y Lilieth Maldonado²

¹Profesor Titular, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental - Director, Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados –CIACUA–, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia; email: jsaldarr@uniandes.edu.co

²Investigadores, Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados –CIACUA–, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia; emails: e.quejada86@uniandes.edu.co, rochy324@gmail.com, li-maldo@uniandes.edu.co

RESUMEN

Una situación típica de ciudades con alto gradiente superficial o localizadas en terrenos montañosos es que los cambios de pendiente impiden que los colectores que integran el sistema de drenaje sean proyectados de forma paralela al terreno, generando así la necesidad de estructuras de caída que adicionalmente disipen la energía. En este trabajo se aborda el problema de disipación de energía en sistemas de drenaje mediante el análisis del comportamiento hidráulico del flujo en una estructura de caída con bandejas de disipación. Se encontró variabilidad en la eficiencia de la disipación de energía en este tipo de estructuras, teniendo en cuenta diferentes condiciones geométricas y del flujo de aproximación.

ABSTRACT

A typical situation that presents itself in cities built on high superficial inclines or which are located upon mountainous terrain, is that gradient alterations may stop the collectors which integrate the system from being layed parallel to the terrain. This generates the need for Drop structure in order to dissipate additional energy. Throughout this work, the problem of energy dissipation in drainage systems will be tackled through an analysis of the flow's hydraulic behavior within a Drop structure with dissipation trays. Variations in energy dissipation efficiency were encountered in these constructions when a myriad of geometric and flow approximations were used.

PALABRAS CLAVES

Sistemas de drenaje, Disipación de energía, Cámaras de quiebre.

INTRODUCCIÓN

La topografía del territorio de muchos países suramericanos como Colombia es bastante variada; desde zonas completamente planas, hasta zonas donde debido a la presencia de la cadena montañosa de los Andes se tienen topografías muy quebradas. En la construcción de alcantarillados en terrenos con topografías quebradas la pendiente longitudinal de los colectores suele ser menor que la pendiente del terreno. Para evitar que el flujo adquiera velocidades que sobrepasen los límites admisibles y causen daños en el material de recubrimiento de los conductos y estructuras del sistema de drenaje se usan estructuras de caída. El diseño con pendientes menores hace que se presenten fuertes desniveles y se debe resolver frecuentemente el problema de conducir las aguas hasta un nivel inferior, dentro de espacios y desarrollos longitudinales reducidos. La solución que se ha dado para resolver el problema es utilizar cámaras de caída cuya función es disipar la energía potencial debida al desnivel y a las altas pendientes, para de esta manera entregar un flujo tranquilo y uniformizado, evitando así daños en las estructuras.

El objetivo de esta investigación fue entender la operación y comportamiento hidráulico de una cámara de quiebre de alta caída, haciendo énfasis en la estructura de bandejas para diferentes condiciones de flujo y valorando su funcionamiento como estructura de disipación de energía.

CÁMARAS DE CAÍDA (ESTADO DEL ARTE)

Las cámaras de caída son estructuras que conducen el agua de un determinado nivel hasta otro inferior, existiendo en este proceso una disipación de energía efectiva antes de la entrega final. Durante la caída el agua se mezcla con el aire creando unas condiciones de flujo que no siempre son favorables para las estructuras. Su aplicación se da en muchos de los sistemas de aprovechamiento hídrico como centrales hidroeléctricas, riego, drenaje urbano y en sistemas de control de erosión y estabilización de lechos naturales. Cuando la energía generada en la caída es mayor que la puede resistir la estructura se hace necesaria la utilización de disipadores de energía.

Se pueden distinguir los siguientes tipos de cámaras de caída en sistemas de alcantarillado:

1) Pozo de caída libre

Los pozos de caída son estructuras verticales que sirven para descargar caudales, salvando desniveles medianos o pequeños. El flujo en este tipo de estructuras se caracteriza por la gran velocidad que adquiere el flujo por acción de la gravedad. Debido a la velocidad con que llega el agua se requiere de un colchón amortiguador al pie de ésta para evitar o minimizar los daños que pueda producir la corriente sobre el cauce o a la estructura que recibe el flujo del pozo.

Este tipo de estructura es la más utilizada y por tanto se han realizado diversos estudios para evaluar su comportamiento. Chanson (2004) realizó varios experimentos variando algunas características de la estructura como la dirección de salida, la altura de caída y la presencia o no de un pozo en la cámara. En este estudio se observaron tres patrones de flujo: El régimen 1 (caudales bajos) donde el chorro impacta directamente sobre el fondo de la cámara o impacta en el pozo en caso de que este exista. Para caudales medios (Régimen 2), el chorro impacta directamente sobre el canal de salida para el caso en que la salida se encuentre a 180°. Para el caso en que la salida es a 90° esta situación no se presenta. Para caudales altos, el chorro impacta en la pared opuesta de la estructura. La mayor disipación de energía se obtuvo cuando la dirección de salida de la cámara era de 90°. La altura de caída y la

profundidad del pozo no son influyentes en la tasa de disipación de energía. En los regímenes 1 y 3 la disipación de energía es mayor que para el régimen 2.

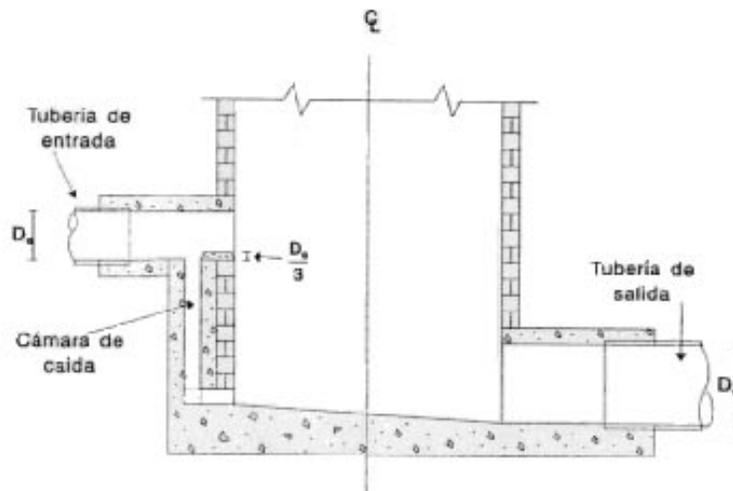


Figura 1.- Pozo de caída Libre.

Rajaratnam, Mainali y Hsung (1997) realizaron estudios probando los efectos que se producen al tener una entrada curva, la cantidad de aire requerida, la disipación de energía y las presiones en el fondo de la cámara. Rajaratnam encontró que para caudales bajos, a partir de cierta altura, el chorro se vuelve circular y continúa así hasta que golpea el fondo; éste tiene una apariencia suave y brillante. En la medida en que el caudal aumenta el chorro toma forma de herradura y su apariencia se vuelve áspera indicando la turbulencia presente en él. Cuando el chorro impacta sobre una pared, éste se separa formando una parábola sobre la lámina. También encontraron que a medida que el caudal aumenta la disipación de energía disminuye. Si la cantidad de aire que ingresa al sistema no es suficiente, se pueden presentar problemas de presión que pueden causar ruidos y vibraciones en la estructura o en el peor de los casos problemas de cavitación.

Chanson (2003), encontró las mismas propiedades del flujo mencionadas anteriormente, es decir, tres regímenes de flujo. Para el régimen de flujo 1 y 3 se obtuvo una gran disipación de energía y una gran aireación del flujo. Caso contrario ocurre para el régimen 2 donde se obtiene poca disipación de energía y no hay aireación del flujo porque el chorro impacta en el canal de salida. Igualmente se realizó mediciones de tiempo de residencia de partículas sólidas y la distribución de tamaño de las burbujas. Para el régimen 1 las partículas muestran un comportamiento bimodal; algunas partículas caen al pozo y salen de él inmediatamente, otras partículas se quedan atrapadas en los vórtices que se dan al interior del pozo y posteriormente salen.

Chanson (1999) estudió los pozos de caída en los acueductos romanos. En este estudio Chanson realizó un modelo físico de estos para mirar el comportamiento hidráulico de la estructura y compararlo con el de las estructuras que existen en la actualidad. Luego realizó comparaciones de la energía disipada por el modelo del acueducto romano y los resultados obtenidos por Rajatarnam et al. (1997) y con las disipaciones que se presentan en los pozos de caída modernos. El modelo del acueducto romano mostró la mayor disipación de energía y un mejor entrampamiento de aire, ya que éste cuenta con un pozo en el fondo donde se forma un colchón de agua que ayuda a disipar la energía. Las estructuras de caída actuales no tiene un pozo al final por facilidades constructivas; además existe el problema del estancamiento del agua en periodos secos lo que podría producir problemas sépticos.

2) Canal con estructura escalonada

Las cámaras de caída con estructura escalonada son aquellas en las que el flujo cae desde un escalón hasta el siguiente como una sucesión de caídas, lo cual genera disipación de energía. Las estructuras de cascadas tienen muchas aplicaciones: cunetas para carreteras, sistemas de alcantarillado de aguas lluvias y de aguas residuales. También se utilizan en plantas de tratamiento de agua y se pueden crear formas artificiales de cascadas para oxigenar el flujo.

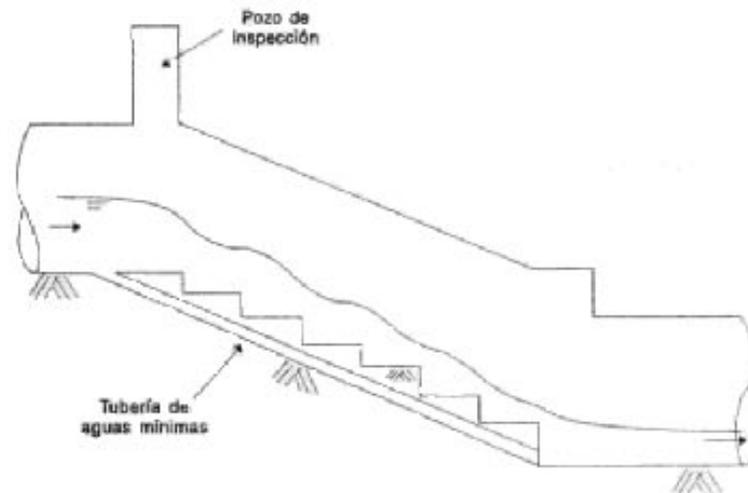


Figura 2.- Canal con estructura escalonada.

Chanson y Toombes (2002) diseñaron un modelo de un canal de 24 m de longitud y 0.5 m de ancho para analizar el comportamiento de este tipo de estructuras respecto a los patrones de flujo, entrampamiento de aire y disipación de energía. Para todos los ensayos el flujo sobre los escalones 2, 3 y 4 fue rápidamente variado y con grandes cambios en las propiedades del flujo cuando este pasa de un escalón al otro. Después de esta zona, la forma del flujo es casi idéntica entre los escalones. Para la primera configuración el flujo era una secuencia de varias caídas a superficie libre con flujo supercrítico para todos los caudales ensayados. Se presentó entrada de aire por la parte superior e inferior del chorro con una mayor aireación cuando el chorro chocaba con el pozo del escalón de aguas abajo. Para la segunda configuración el flujo no tiene esa apariencia suave de los flujos rasantes ni tampoco una sucesión de caídas, por lo cual ellos lo consideraron un flujo de transición. Para este flujo transicional, se observaron unas variaciones longitudinales del perfil, caracterizado por un pozo con agua que recirculaba y aguas abajo del punto de impacto una deflexión del agua. Igualmente se observó una región donde el agua se dispersaba en el aire (efecto rocío). A medida que el caudal aumentó para la configuración 2 se presentó un flujo saltante, la superficie libre no era paralela al fondo del canal pero se observó una superficie ondulada.

En el año 2005 Sameh Kantoush construyó un modelo físico para el sistema de alcantarillado de La Paz, Bolivia. En esta ciudad han implementado un sistema de drenaje rectangular caracterizado por un perfil escalonado, con un techo en arco. El estudio reveló que para bajos caudales el flujo impacta contra la parte superior del conducto y genera la presurización del sistema. Para mejorar la capacidad hidráulica del sistema y para aumentar la disipación de energía, Kantoush propuso utilizar múltiples escalones.

3) Estructura de disipación tipo vórtice

Las cámaras de vórtice como su nombre lo indica son estructuras que generan un vórtice o un flujo en espiral en la parte superior de la estructura que aumenta la velocidad del flujo que está entrando a la cámara haciendo que parte de la energía potencial se convierta en energía cinética. El vórtice generado controla la cantidad de aire que entra a la cámara y permite la disipación de la energía antes de que el flujo llegue al fondo de la estructura. La energía es disipada por fricción del fluido con las paredes de la estructura.

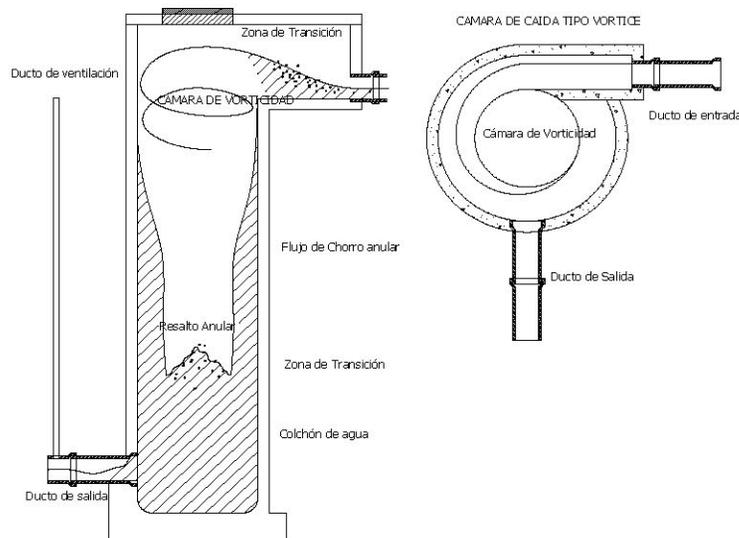


Figura 3.- Cámara de vórtice.

Moeller y Natarius desarrollaron un estudio sobre las ventajas de la estructura de vórtice para el control de los olores y de la corrosión al interior de las estructuras de caída presentes en los sistemas de alcantarillado. Como el flujo de entrada a la estructura no es lo suficientemente rápido para producir un flujo tangencial a las paredes del pozo, Moeller y Natarius proponen que la nueva cámara tenga una reducción en el diámetro para aumentar la velocidad y así lograr que el flujo permanezca pegado a las paredes de la estructura logrando una disipación de energía por fricción; además de que mantiene un núcleo de aire dentro del pozo.

Zhao, Zhu, Sun y Liu (2006) realizaron un estudio de las cámaras de vórtice en donde la relación del diámetro de la cámara y la altura de ésta es pequeña. Se encontró que la pérdida por fricción con las paredes y el movimiento en vórtice son del 34%. La mayor pérdida de energía se daba entre las dos últimas secciones donde el chorro se mezcla al colchón de agua que se encuentra en el fondo, donde la pérdida es de casi el 70%.

4) Estructura de bandejas

Las estructuras de bandejas son una serie de plataformas colocadas en forma alterna en lados opuestos del pozo en toda su altura. El flujo en este tipo de estructuras se caracteriza por un escurrimiento libre y turbulencia entre las bandejas. La estructura de bandejas tiene como objetivo disipar la energía de la masa de agua mientras descende en cada bandeja desde el canal de entrada en el nivel superior hasta el fondo de la cámara.

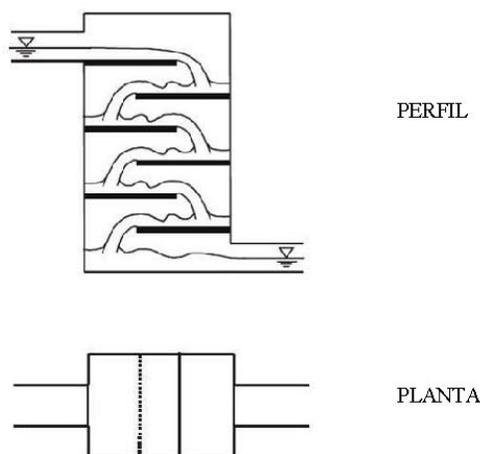


Figura 4.- Estructura de bandejas.

Castro, Hidalgo X., Hidalgo M. y Poveda (2006) desarrollaron un modelo de laboratorio para optimizar ésta estructura. El estudio consistió en evaluar algunas modificaciones para la estructura de bandejas inicialmente propuesta por el Plan Maestro de Alcantarillado para el Distrito Metropolitano de Quito. Estas modificaciones consistían en colocar una reja al final de la bandeja con varias relaciones de obstrucción y ligeras inclinaciones de la rejilla. Otra configuración propuesta para este tipo de disipador es el disipador de bandejas en laberinto, en el cual se prolonga la bandeja hasta que se deja un 10% de apertura para que esta actúe como orificio de caída de cada bandeja. Para la variación con reja se obtuvo una mejor disipación que para el diseño original de la estructura ya que la nueva configuración permite la formación de un colchón de agua en cada bandeja que evita el impacto directo sobre las paredes de la estructura. Para la variación en laberinto se obtiene igualmente una mayor disipación de energía que para la estructura original ya que el flujo que cae se distribuye uniformemente; pero presenta problemas ya que reduce la capacidad del sistema.

Este tipo de estructura de caída es el objeto de la presente investigación, descrita en este artículo.

METODOLOGÍA

Para el desarrollo de esta investigación se construyó un modelo físico de una estructura de caída con bandejas de disipación en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad de los Andes en Bogotá Colombia. Las dimensiones del modelo quedaron determinadas teniendo en cuenta limitaciones de espacio: Para el canal de entrada se tomó un ancho de 40 cm y un caudal máximo a probar de 90 l/s. Para el diseño del canal de entrada, se utilizó la ecuación de Manning para canales abiertos. Resolviendo la ecuación se obtiene una profundidad de flujo máxima de 38.4 cm; teniendo en cuenta este valor máximo de profundidad de flujo se toma un valor de altura del canal de 60 cm, quedando definido un canal de entrada de 40 cm de ancho y 60 cm de altura.

Al canal se le incorporaron dos pantallas de aquietamiento del flujo de entrada y una compuerta para variar el régimen de flujo, por lo cual la longitud del canal se estimó en 2.65 m y una altura de caída de 2.25 m. En La Figura 5 se muestra una vista longitudinal del modelo físico construido y en la Figura 6 se muestra el canal de entrada al igual que el sistema de alimentación.

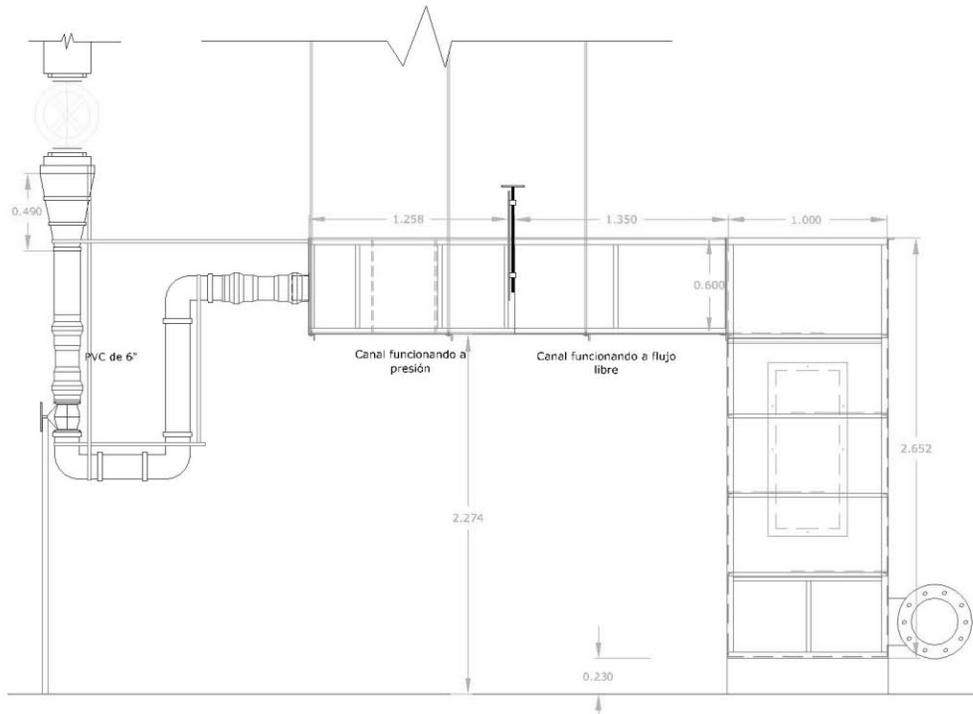


Figura 5.- Vista en Perfil del Modelo Físico Construido.



Figura 6.- Sistema de Alimentación y Canal de Entrada.

Para el diseño de la estructura escalonada de disipación, se realizó el análisis para un solo escalón y el resto de escalones se consideraron igual al diseño anterior, con lo cual se definieron las dimensiones de las bandejas. El diseño del escalón se hizo teniendo en cuenta el procedimiento de diseño de estructuras de caída propuesto por la Administración Federal de Carreteras de los Estados Unidos (2006, [U.S. FHWA], por sus siglas en inglés):

$$N_d = \frac{q^2}{qh_o^3} \quad [1]$$

donde N_d = Número de caída; q = Caudal unitario (m³/s/m); h_o = Altura de caída (m).

$$L_1 = 4.30h_oN_d \quad [2]$$

$$Y_1 = 1.0h_oN_d^{0.22} \quad [3]$$

$$Y_2 = 0.54h_oN_d^{0.425} \quad [4]$$

$$Y_3 = 1.66h_oN_d^{0.27} \quad [5]$$

donde L_1 = Longitud de caída (m); Y_1 = Profundidad del pozo bajo la napa (m); Y_2 = Profundidad de flujo en el pie de la napa (m); Y_3 = Profundidad subsecuente a Y_2 , como se muestra en la Figura 7.

Estos parámetros fueron calculados para diferentes alturas de caída y caudales unitarios.

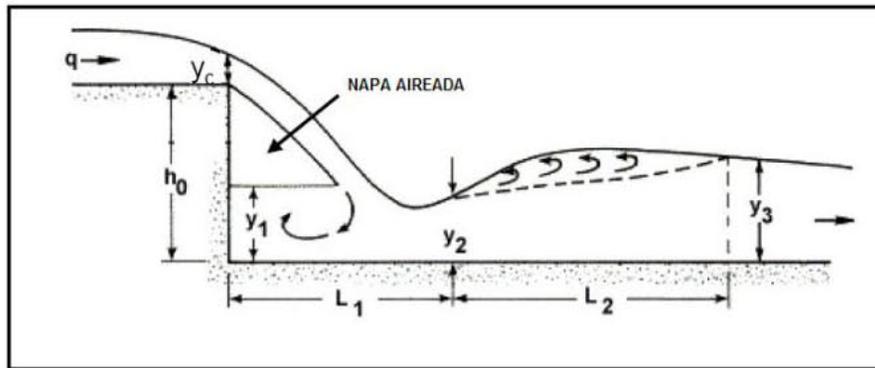


Figura 7.- Geometría del Flujo en una Caída Directa.

Del canal de entrada el flujo pasa a la cámara de caída donde se encuentra la estructura de disipación; las bandejas están separadas cada 50 cm (modificable) y tienen una longitud de 60 cm. La salida se hace a través de un codo de fibra de vidrio de 12", el cual descarga a un tanque en el cual se encuentra instalado un vertedero rectangular empleado para la medición de los caudales ingresados del modelo. En la Figura 8 se muestra la cámara de caída con flujo sobre las bandejas de disipación.

El modelo está diseñado para cambiar la altura de separación entre las bandejas y adicionar más bandejas de ser necesario, con el fin de encontrar la configuración que ofrezca la mayor disipación de energía. Igualmente el modelo cuenta con una puerta de acceso a través de la cual se pueden cambiar las bandejas, ya sea en cuanto a su forma o a su longitud.

Se realizaron mediciones de las profundidades de flujo en el canal de entrada utilizando piezómetros instalados a lo largo de éste. En la cámara de caída se instalaron cintas métricas para determinar la profundidad de flujo sobre cada bandeja. El vertedero para la medición de caudales tiene contracciones laterales de 0.1 m en cada lado y su cresta está ubicada a 0.3 m del fondo del tanque de salida. En la Figura 9 se muestra el vertedero empleado.



Figura 8.- Cámara de Caída con Bandejas.



Figura 9.- Vertedero Rectangular.

La energía en las caídas y en toda la estructura de disipación se evaluó a través de la ecuación de Bernoulli.

$$H = Z + y + \frac{q^2}{2gy^2} \quad [6]$$

donde Z = altura respecto al nivel de fondo de la cámara; y = profundidad del flujo; q = caudal unitario; g = aceleración de la gravedad.

La eficiencia de disipación en la estructura se analizó mediante la ecuación 7.

$$\text{Eficiencia} = \frac{H_i - H_{i+1}}{H_i} * 100 \quad [7]$$

donde H_i = energía en el punto i ; H_{i+1} energía en el siguiente punto.

Debido a las características extremadamente turbulentas del flujo en la estructura, también se llevaron a cabo mediciones en un modelo a escala del modelo ya construido, con el fin de medir adecuadamente los campos de velocidad empleando el sistema de medición de velocimetría por imágenes de partículas o PIV (por sus siglas en Inglés) cuyo equipo de medición es no intrusivo, adaptable a distintas alturas de la lámina de agua y las mediciones no son afectadas por efectos de intrusión de aire.

En este método de medición se adquieren pares de imágenes en tiempos conocidos para calcular la velocidad. Se debe iluminar el plano en que se desea calcular la velocidad introduciendo un gran número de partículas de igual o similar densidad a la del fluido, las cuales reflejan la luz para que puedan ser materializadas por medio de una fotografía. En la Figura 10 se enseña un esquema del proceso de medición de velocimetría por imágenes de partículas.

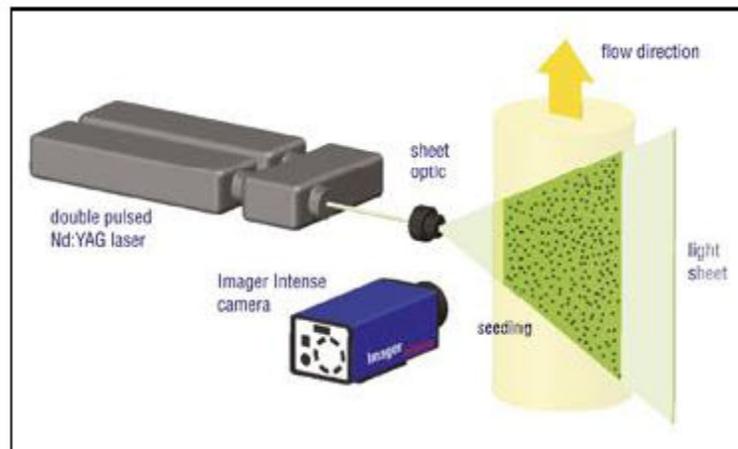


Figura 10.- Sistema de medición de velocimetría por imágenes de partículas.
(<http://www.lavision.de/en/techniques/piv.php>).

Para la medición se empleó entonces una cámara CCD de doble imagen para correlación cruzada y demás componentes del sistema PIV del Laboratorio de Bioingeniería de la Universidad de Los Andes (Bogotá, Colombia).

La escala del modelo para llevar a cabo las mediciones de PIV se definió teniendo en cuenta el campo visual máximo que cubre la cámara, la distancia focal, caudal máximo de la bomba peristáltica del Laboratorio de Bioingeniería y el rango de caudales y dimensiones de la estructura prototipo localizada en el Laboratorio de Hidráulica. El dimensionamiento se hizo con base en el criterio de similitud de Froude teniendo en cuenta que los efectos predominantes son los gravitacionales.

En conjunto las pruebas realizadas en ambos modelos (Prototipo y prototipo escalado) incluyeron pruebas con diferentes geometrías o configuración de las bandejas de disipación: bandejas horizontales, bandejas con pendiente en contra del flujo (adversa) y bandejas triangulares, como se muestra en la Figura 11.

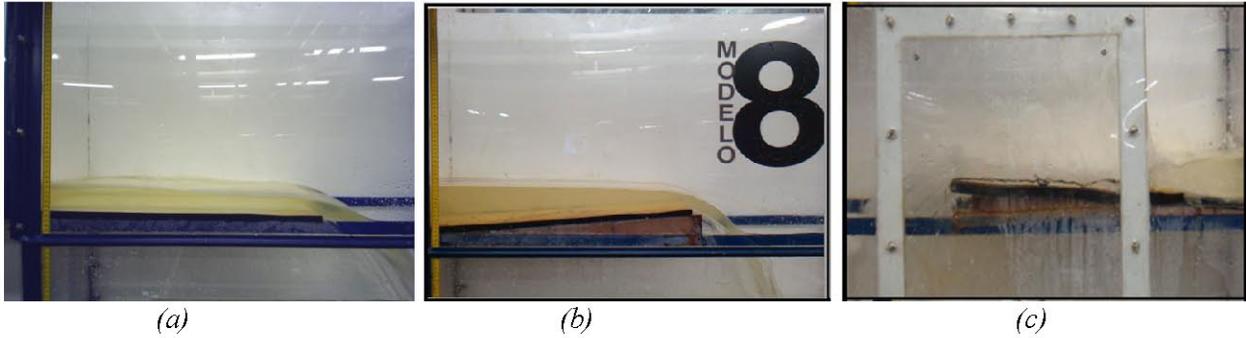


Figura 11.- Geometría y configuraciones de Bandeja: (a) Horizontal, (b) Pendiente Adversa, (c) Triangular.

RESULTADOS

Se encontró que para caudales bajos ($Q < 10$ l/s) en la primera caída (segunda bandeja) se forma un resalto hidráulico, mientras que a partir de esta el flujo desciende sobre cada bandeja formándose una separación de chorros que chocan entre sí, atrapando aire. Finalmente el flujo cae sobre un pozo que se encuentra en el fondo de la cámara donde la energía residual que posee el flujo es disipada por impacto.

Para caudales mayores a 10 l/s el flujo se acelera y no se forma resalto hidráulico en la bandeja 2, por lo tanto no se disipa la suficiente energía trayendo consigo que el flujo golpee las paredes de la cámara y fluya verticalmente sobre estas. Este comportamiento no es el deseado para el funcionamiento de la cámara porque genera desgaste de la estructura. En la Figura 10 se muestra la operación de la estructura para diferentes regímenes de flujo.



Figura 12.- Comportamiento del Modelo: (a) Caudales Bajos, (b) Caudales Altos.

A medida que el flujo desciende por las bandejas va disipando la energía que contiene. Se realizó un análisis de la eficiencia de la estructura para la profundidad de la mezcla (agua – aire) y para la profundidad de flujo que solo incluye agua; suponiendo una concentración de aire del 30%. En la Tabla 1 y en la Tabla 2, se muestran los análisis para los dos casos explicados.

Tabla 1.- Análisis de Disipación de Energía. (Mezcla).

Q	Q/Q _{máx}	Froude entrada	Energía entrada	Energía salida	ΔE	Eficiencia Total
m3/s			m	m	m	%
0.006	0.162	1.29	2.094	0.215	1.879	89.72
0.008	0.227	2.05	2.105	0.197	1.908	90.66
0.008	0.227	1.52	2.108	0.208	1.901	90.16
0.017	0.459	2.50	2.178	0.252	1.926	88.45
0.019	0.501	1.79	2.157	0.230	1.927	89.33
0.024	0.659	2.54	2.215	0.261	1.954	88.22
0.024	0.659	1.75	2.176	0.267	1.910	87.74
0.035	0.941	1.08	2.159	0.302	1.857	86.01
0.035	0.941	1.10	2.159	0.300	1.859	86.10
0.037	1.000	0.99	2.159	0.302	1.857	86.01

Tabla 2. Análisis de disipación de energía. (70% Mezcla).

Q	Q/Q _{máx}	Froude entrada	Energía entrada	Energía salida	ΔE	Eficiencia Total
m3/s			m	m	m	%
0.006	0.162	1.29	2.094	0.151	1.943	92.79
0.008	0.227	2.05	2.105	0.138	1.966	93.42
0.008	0.227	1.52	2.108	0.146	1.962	93.08
0.017	0.459	2.50	2.178	0.178	2.000	91.82
0.019	0.501	1.79	2.157	0.164	1.993	92.40
0.024	0.659	2.54	2.215	0.186	2.028	91.58
0.024	0.659	1.75	2.176	0.190	1.986	91.25
0.035	0.941	1.08	2.159	0.214	1.945	90.07
0.035	0.941	1.10	2.159	0.213	1.946	90.14
0.037	1.000	0.99	2.159	0.214	1.945	90.07

El caudal se graficó contra la eficiencia de la disipación tanto para la mezcla agua aire como para el flujo sin considerar intrusión de aire (Profundidad del 70% de la mezcla), lo cual se muestra en la Figura 11 y en la Figura 12. Como se observa en estas figuras la eficiencia en la disipación de energía en la estructura disminuye con el aumento del caudal mediante una relación lineal.

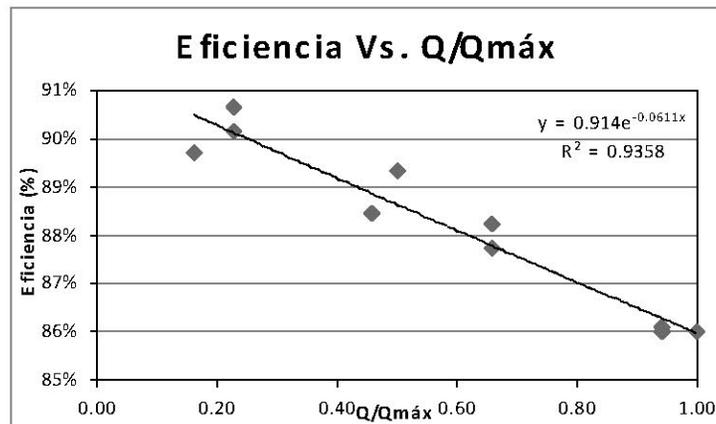


Figura 13.- Eficiencia de disipación Vs. Caudal (Mezcla agua-aire).

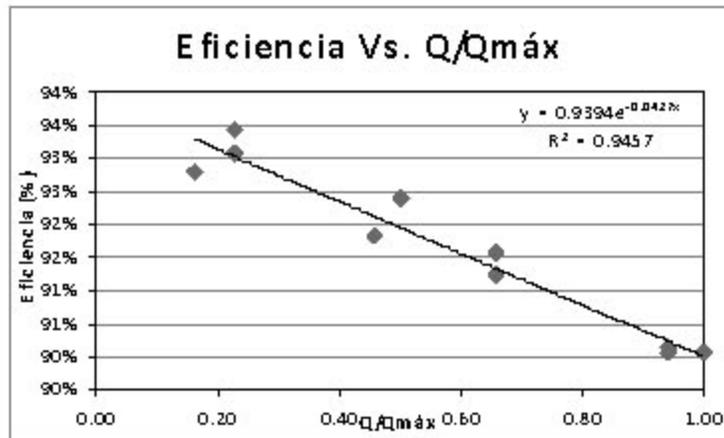


Figura 14.- Eficiencia de disipación Vs. Caudal (70 % de la Mezcla).

Al comparar los dos casos de análisis se puede observar que para el flujo sin aire, la eficiencia en la disipación es mayor que para los flujos aireados.

También se encontró que la tasa de disminución de la eficiencia con respecto al caudal es ligeramente mayor para las bandejas con geometría triangular que para las bandejas horizontales.

Del sistema de velocimetría por imágenes de partículas se encontraron y analizaron imágenes como las de la Figura 15 y la Figura 16. En la Figura 15 (a) se observa una buena dispersión de las partículas de vidrio en el flujo, una buena densidad y un buen contraste. En la Figura 15 (b) por su parte se revela un fenómeno bastante particular que no se puede observar a simple vista y es el alto grado de vapor que genera la caída entre bandejas; hay un alto grado de saturación por vapor de agua en todos los espacios.

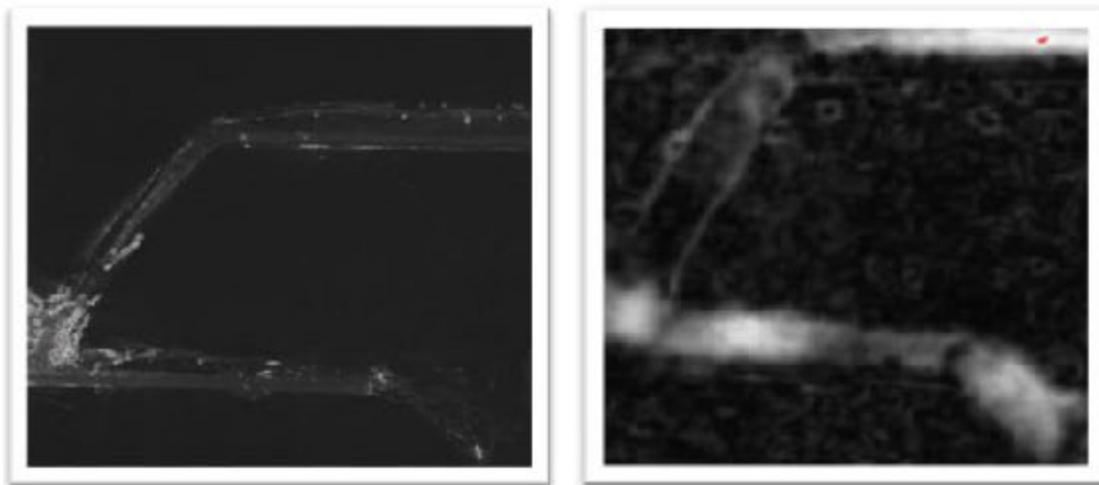


Figura 15.- Visualización del Fluido entre las Bandejas No. 1 y Bandeja No. 2

En las imágenes se puede distinguir con facilidad las dos fases de flujo: fase líquida y fase gaseosa.

En la Figura 16 se muestra la velocidad media de flujo, producto del procesamiento de los vectores de velocidad obtenidos de 100 pares de imágenes; en la Figura 16 (a) se distingue claramente las

velocidades en las diferentes zonas del fluido y de las bandejas, permitiendo observar los valores máximos de velocidad entre la bandeja 1 y la bandeja 2. En la Figura 16 (b) se muestra una prueba con el flujo pasando de la bandeja 2 a la bandeja 3, en esta imagen se puede observar que la velocidad es aproximadamente la misma en ambas fases de flujo y también existe una alta tasa de vapor; esta situación conllevó a que en las mediciones sobre el prototipo resultara bastante compleja la medición de propiedades hidráulicas como la profundidad de flujo en algunos escenarios, con lo cual se encontró diferencias de hasta el 60 % aproximadamente entre la velocidad determinada en el prototipo y la velocidad estimada en el modelo a escala.

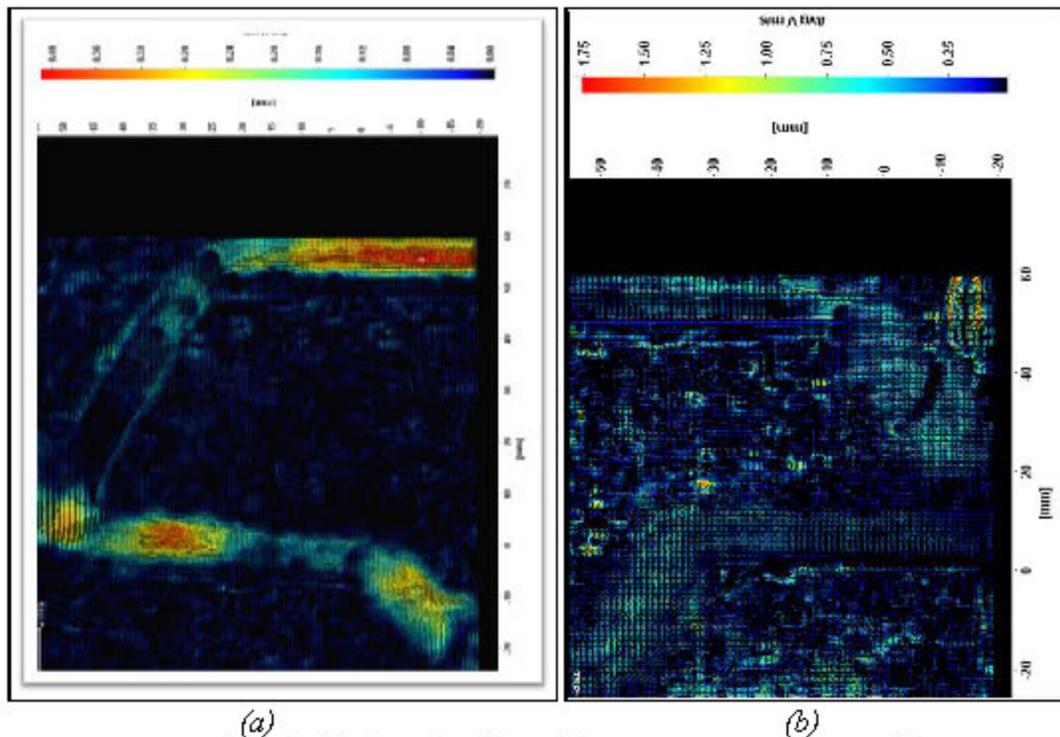


Figura 16.- Vectores de Velocidad Media: (a) Bandejas No. 1 y No. 2, (b) Bandejas No. 2 y No. 3

CONCLUSIONES

Para caudales altos, el flujo impacta directamente sobre la pared frontal al flujo, generando un flujo vertical sobre las paredes de la cámara, lo cual generaría desgaste prematuro de la estructura por abrasión. El aumento del caudal en primera instancia eleva la disipación de energía; sin embargo a medida que se aumenta aun más el caudal, el chorro impactará en lugares cada vez más por encima de la bandeja de destino, lo que disminuye nuevamente la disipación de energía. La estructura de bandejas debe propiciar el cambio de régimen de flujo a subcrítico ayudando así en la disipación local de energía, como también en la conservación de la estructura

La fase gaseosa del flujo afecta la eficiencia en la disipación y hace compleja la hidráulica en la estructura, induciendo a importantes errores de cálculo; este factor debe considerarse en la definición de la separación y longitud de las bandejas de tal modo que se reduzca en lo posible su efecto.

A medida que aumenta el caudal, la pérdida de energía que se da en la estructura de bandejas disminuye, lo cual reduce la eficiencia de disipación de energía de la estructura.

La eficiencia en la disipación de energía no muestra ningún aumento si se modifican las bandejas horizontales normales por bandejas con pendiente en contra del flujo. No obstante la eficiencia en disipación de energía es mayor con bandejas triangulares para caudales pequeños.

Es importante mencionar que para todo el rango de caudales que se analizaron con las bandejas triangulares, lo cuales fueron similares en magnitud a los caudales analizados en los ensayos de las bandejas normales, se presentó siempre un flujo subcrítico en la primera bandeja. La presencia de flujo subcrítico podría inducir fenómenos de sedimentación e hidrólisis de la materia orgánica.

Se debe garantizar que en el fondo de la cámara se disipe la energía residual del flujo y así asegurar una entrega del flujo en condiciones adecuadas hacia el colector de salida o corriente receptora.

La eficiencia de las estructuras de bandejas como disipador de energía resultó ser alta, de aproximadamente un 80% para flujos aireados y de un 92% para flujos sin aire.

La distancia desde el borde de la bandeja hasta la pared vertical de la estructura debe establecerse de tal forma que se supere el alcance horizontal del flujo para el caudal de diseño, más una distancia adicional con el fin de: permitir la posible formación de un resalto hidráulico y generación de un pozo de agua en la esquina de las bandejas, impacto del flujo con menor energía en la pared vertical de la estructura y un obligatorio flujo de retorno para el descenso a la próxima bandeja. Esto beneficiaría beneficiaria la disipación en la estructura.

Es de gran ayuda utilizar sistemas de estudio de imágenes por velocimetría de partículas, ya que permite obtener de manera relativamente sencilla los perfiles de velocidad media en la dirección en que se requiera. Sin embargo, resulta complicado cuadrar un delta de tiempo óptimo entre pares de fotos que garantice unos resultados veraces. Estas imágenes permiten identificar el potencial de generación de vapor que tiene la cámara de caída. Es importante analizar este efecto con profundidad ya que esta generación excesiva de gases en sistemas de alcantarillado implicaría presencia de malos olores.

Aun deben hacerse estudios futuros para definir dimensiones y configuraciones óptimas de estructuras de caída con bandejas de disipación de energía.

REFERENCIAS

- Camarago, J.R.** (1999). *Criterios de diseño de cámaras de quiebre de presión en sistemas de abastecimiento de agua y distritos de riego: Estado del arte*. Tesis de maestría. Universidad de Los Andes, Bogotá Colombia.
- Castro, M., Hidalgo X., Hidalgo M., Poveda R.** (2006). Estudio experimental del disipador de bandejas como estructura de cambio de nivel y de dirección. *XXII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*. Ciudad Guayana, Venezuela. Octubre 2006.
- Chanson, H.** (1999). Energy dissipation and drop structures in ancient times: The Roman dropshafts. *Water 99 joint congress*. Brisbane, Australia.
- Chanson, H., Toombes, L.** 2002. Energy dissipation and air entrainment in stepped storm waterway: Experimental study. *Journal of irrigation and Drainage Engineering*. Vol. 28. No 5.
- Chanson, H.** (2003). Experimental investigation of dropshaft hydraulic: Two – phase flow and acoustics. *XXX IAHR congress*. Thessaloniki, Grecia.
- Chanson, H.** (2004). Hydraulics of rectangular Dropshafts. *Journal of irrigation and Drainage Engineering*. Vol. 130. No 6.
- Kantoush, S.** (2005). Physical model tests for the sewer system of La Paz (Bolivia).

- López, A.** (1995). *Elementos de diseño para acueductos y alcantarillados*. Ed. Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Merlein, J., Kleinschroth, A., Valentin, F.** (2002). *Systematisierung von absturzbauwerken. Mitterilung N_o 69*. Lehrstuhl für hydraulik and gewasserkunde. Technischen Universität München. Alemania.
- Moeller, P., Natarius, E.** *The vortex drop structure implementation for odor and corrosion control*. Metropolitan center.
- Rajaratnam, N., Mainali, A., Hsung C.** (1997). Observations on flow in vertical dropshafts in urban drainage system. *Journal of Environmental Engineering*. Vol. 123. No 5.
- Federal Highway Administration [U.S. FHWA] (2006).** *Hydraulic Design of Energy Dissipators for Culverts and Channels*. Report No. FHWA-NHI-06-086. United States.
- Zhao C., Zhu, D., Sun, S., Liu, Z.** (2006). Experimental study of flow in a vortex drop shaft. *Journal of Hydraulic engineering*. Vol 132. No. 1.