

1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo tiene por objetivo la revisión del diseño genérico que se adoptará en las estructuras denominadas "Captaciones". Estas tienen como finalidad descargar agua residual y pluvial desde la superficie hasta el nuevo drenaje profundo Túnel Emisor Oriente (TEO). Aprovechando las lumbreras constructivas del TEO, de aproximadamente 20 m de diámetro, las captaciones se ubicarán en su interior y se implementarán agregando una lumbrera interior de menor diámetro que se ha llamado "lumbrera adosada". El buen funcionamiento de esta implica disipar la energía que acumula durante el descenso e incorporar la descarga al TEO sin generar comportamientos adversos.

Este tipo de estructuras se han utilizado con excelentes resultados y se caracterizan por tener una gran estabilidad de funcionamiento. Tanto la fricción contra las paredes como la disipación en el fondo consumen la mayoría de la energía acumulada durante la caída permitiendo incorporar al flujo a la estructura subterránea sin inconvenientes, Hager (1985,1990).

Por otro lado, se ha observado que en descargas con caída libre (sin trayectoria helicoidal), el agua descendiende de manera violenta y al retornar el aire arrastrado, enfrenta al flujo principal provocando fluctuaciones de gasto importantes que limitan su capacidad de descarga por lo que su uso se restringe a caudales y caídas de menor magnitud.

Normalmente el flujo helicoidal se obtiene colocando una cámara espiral al inicio de la lumbrera incorporando un momento angular al flujo entrante (formando un vórtice), para los antecedentes ver Kennedy (1988) o Echávez y Ruiz (2008). El diseño de captaciones con cámara espiral, ha dado resultados satisfactorios, sin embargo su construcción resulta costosa y de cierta dificultad por las restricciones de espacio comunes en estas obras. Como alternativa a este problema se ha diseñado un ingreso a la lumbrera mediante una ranura vertical que descarga de manera asimétrica y que constituye un esquema más simple, compacto y por tanto más económico. Si bien esta estructura no es tan eficiente como la que tiene una cámara espiral, produce efectos aceptables similares a ésta.

La estructura de captación con flujo helicoidal, ordena al flujo durante la caída y le da gran estabilidad, aumentando considerablemente su capacidad de descarga. El diseño del dispositivo experimental que se analiza corresponde a un modelo genérico de una estructura de captación típica, Echávez y Ruiz (2008).

2. ANTECEDENTES

El rápido incremento de la población y los problemas de hundimientos de la zona Metropolitana de la Ciudad de México, han limitado severamente la capacidad de desalojo de las estructuras superficiales de agua residual, por lo que fue necesario construir una conducción subterránea denominada "Drenaje profundo" (DP). Esta estructura ha trabajado satisfactoriamente, sin embargo en la actualidad ya es insuficiente, tanto por el crecimiento de la zona urbanizada como por la precipitación extraordinaria. Ante este hecho se ha decidido apoyar al DP con la construcción de otra estructura paralela profunda denominada "Túnel Emisor Oriente" (TEO), que incrementará la confiabilidad y flexibilidad de operación del sistema de drenaje de agua pluvial y residual de la zona Metropolitana.



Figura 1. Esquema del Túnel Emisor Oriente

El TEO, tendrá una longitud aproximada de 62 km, 7 m de diámetro y una capacidad de desalojo de hasta 150 m³/s de aguas pluviales y residuales, estará compuesto por 24 lumbreras con profundidades que van de 26 hasta 150 m. Inicialmente en la lumbrera del túnel interceptor del Río de los Remedios, y terminará en Atotomico de Tula, en Hidalgo, cerca del actual portal de salida del Túnel Emisor Central, en su confluencia con el río El Salto, ver Figura 1.



Figura 2. Modelo Hidráulico, escala 1:20

En este trabajo se hace la revisión del diseño genérico que se adoptará en las estructuras denominadas "Captaciones". Estas estructuras tienen como finalidad descargar agua residual desde la superficie al TEO, lo cual implica disipar la energía que acumulan durante el descenso e impedir que se presente cualquier efecto adverso a la conducción principal tal como sería generar un remanso o provocar daño a la propia estructura. Las captaciones serán ubicadas en algunas de las lumbreras constructivas del TEO y consistirán en una lumbrera interior de menor diámetro que se ha llamado "lumbrera adosada". Esta estructura permitirá descargar un caudal máximo de 40 m³/s con 45 m de caída.

3. INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

En el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, se construyó el modelo, ver Figura 2. Consiste en un conducto de aproximación, con un ducto de sección cuadrada de 0.193 m de lado que termina con una reducción a la mitad de su ancho formando una ranura vertical, una lumbrera vertical de sección circular con 0.193 m de diámetro interior con una altura de 3.04 m que en su parte inferior se conecta a un ducto de sección circular de 0.0127 m, que permite el retorno del agua, después de su medición con un vertedor rectangular de 0.40 m de ancho de cresta, al cárcamo de bombeo. El modelo se construyó en Plexiglass transparente para permitir la visualización del flujo.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se identificaron seis secciones para medir la pérdida de energía en la lumbrera, como se ve en la Figura 3. La sección 1' con elevación Z1'=2.49 m. La sección A por abajo del canal de aproximación de la lumbrera con ZA=2.09 m. Una sección intermedia B a la mitad de la lumbrera con ZB=1.32 m, la sección C que se localiza justo arriba del salto hidráulico anular con ZC=0.56 m y, finalmente la sección 3, localizada a la salida del túnel con Z3=0.

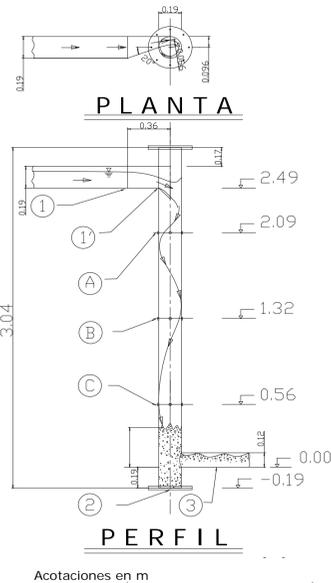


Figura 3. Esquema de la instalación experimental

Entre las secciones A y C, se asume que es un flujo anular gradualmente variado con vórtice libre típico, Quick (1990) y Jain (1987). Se considera que la circulación es ω , donde v es la velocidad tangencial y r es la coordenada radial. La distribución de presión, ver Zhao (2001, 2006) en cada una de las secciones es:

$$p(r) = \frac{1}{2} \rho \omega^2 \left[\frac{1}{R^2(1-t)^2} - \frac{1}{r^2} \right] \quad [1]$$

donde: b , espesor de agua; R , radio de la lumbrera; t , espesor relativo de flujo, $t=b/R$; ρ , densidad del agua.

La energía específica para cada sección se calculó usando la siguiente ecuación:

$$E = \frac{V_z^2}{2g} + \frac{2\Omega^2}{gD^2(1-t)^2} \quad [2]$$

donde: D , diámetro de la lumbrera; g , aceleración de la gravedad; V_z , velocidad vertical. La velocidad vertical en cada sección se obtiene mediante:

$$V_z = \frac{4Q}{\pi D^2(2-t)} \quad [3]$$

En la Figura 4 y 5 se muestra el vórtice que se forma a la entrada de la lumbrera para los diferentes gastos ensayados. Para los tres gastos ensayados se observa, que a lo largo de la lumbrera el flujo se pega a la pared, se ve perfectamente el agua blanca en el fondo, lo cual indica que tiene un funcionamiento adecuado y cumple con su fin la entrada en ranura.

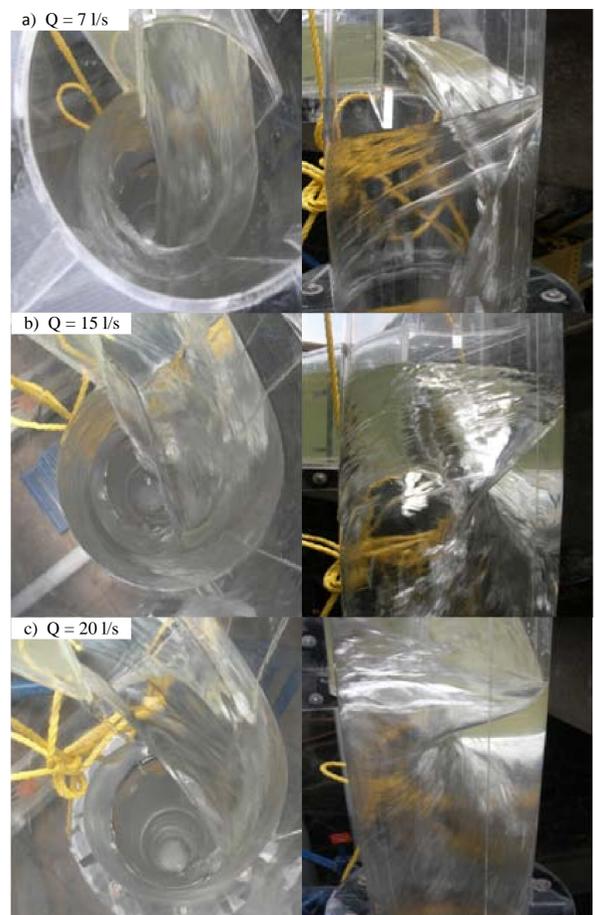


Figura 4. Vórtice formado a la entrada de la lumbrera.

Figura 5. Vista lateral del vórtice.

Se midieron los tirantes en cuatro puntos, en las secciones A, B y C, ver Figura 3, para los tres gastos ensayados. Como se ve en la Figura 6, en las secciones A y C se obtuvieron mediciones consistentes, pero en la sección B se obtuvieron inconsistencias, dado a la formación de una trenza que es inestable en esa sección ya que en unas ocasiones se presentan unos valores y otras veces otros, es importante decir que en esa sección no se tienen datos confiables y se recomienda para ensayos posteriores medir de otra manera.

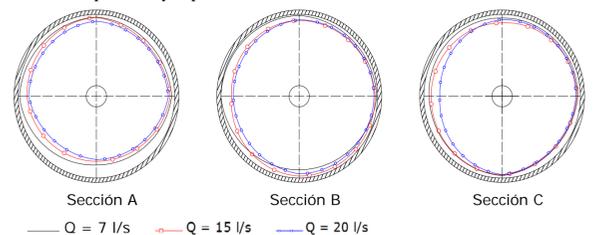


Figura 6. Perfiles de los espesores de agua, para los gastos ensayados.

Otro punto crítico en el diseño de estas estructuras en la conexión de la lumbrera con el túnel, en la Figura 7 se muestra la conexión de la lumbrera con el túnel para los gastos ensayados. Para un $Q = 7$ l/s se observa que funciona como canal, se tiene poca inclusión de aire y en el pozo la oscilación del salto hidráulico anular tiene una fluctuación moderada. En el gasto $Q = 15$ l/s se observa, en el túnel, un flujo helicoidal desde la lumbrera hasta la descarga, y en el salto hidráulico se tiene más fluctuación. Finalmente, para el gasto máximo, $Q = 20$ l/s, se observa gran cantidad de aire y en el flujo en el túnel es a tubo lleno, mientras que el salto hidráulico anular presenta más fluctuación en el nivel del agua que la observada para los demás gastos.



Figura 7. Conexión de la lumbrera con el túnel para los gastos ensayados.

El cálculo de la carga de energía se obtuvo mediante las ecuaciones (1), (2) y (3), mientras que la eficiencia de la disipación de la energía a lo largo de la lumbrera se calculó con la ecuación siguiente:

$$\eta = \left(\frac{1-H_{i+1}}{H_i} \right) \times 100\% \quad [4]$$

donde: H_i , carga total en la sección i ; H_{i+1} , carga total en la sección $i+1$; η , eficiencia.

En la Figura 8, se muestran las gráficas obtenidas del tirante promedio, carga total y eficiencia de la disipación de energía para diferentes alturas, tomando como cero, el nivel de la plantilla del conducto de llegada de sección cuadrada. En la gráfica de disipación de energía se ve que la lumbrera tiene una alta eficiencia.

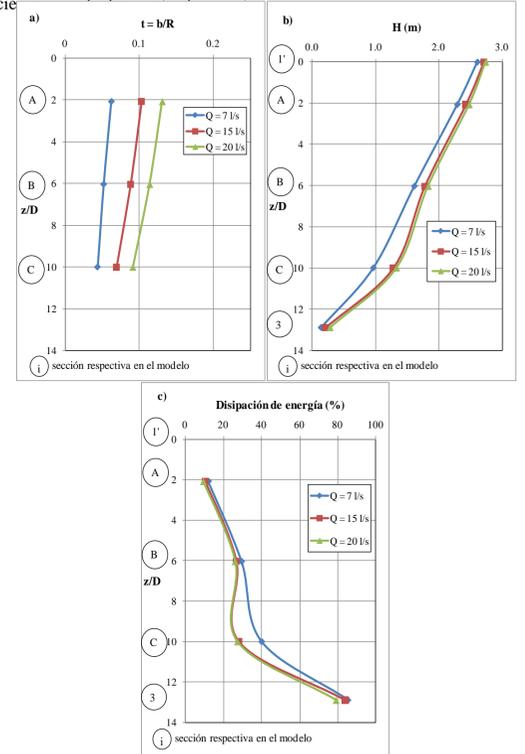


Figura 8. a) Mediciones del espesor del agua. b) Carga de energía. c) Eficiencia de la disipación de energía.

La medición del aire, se hizo mediante un anemómetro de hilo caliente marca Airflow, modelo 81322501/A, con un coeficiente de calibración de 4.04. En la Figura 9 se muestra la variación del gasto de aire junto con la de otros autores encontrados, se usaron las siguientes formulas:

$$\beta = Q_a / Q \quad [5]$$

$$Q^* = \frac{nQ}{\pi D^{4/3}} \quad [6]$$

donde: β , variación del gasto de aire; Q_a , gasto de aire de entrada; Q , gasto de agua; Q^* , gasto de agua adimensional; n , coeficiente de Manning; D , diámetro de la lumbrera.

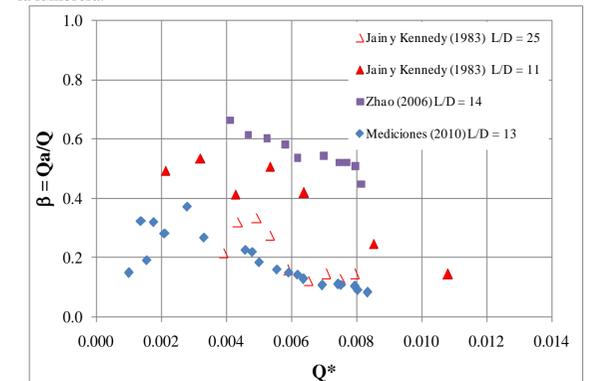


Figura 9. Variación del gasto de aire.

5. CONCLUSIONES

En el estudio experimental de la instalación genérica de la lumbrera mediante flujo helicoidal, para su uso en el TEO, se observó, en los tres gastos ensayados, que en la zona de la lumbrera se tiene una alta eficiencia en la disipación de energía debido a que el flujo se pega a las paredes cayendo con alta velocidad y reducido tirante. Sin embargo, la mayor pérdida de energía ocurre en el fondo al impactar el anillo circular de agua con el colchón formado al final de la lumbrera.