

49
24



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

FACULTAD DE INGENIERIA

**DISEÑO HIDRAULICO DE CAPTACIONES
CON LUMBRERA VERTICAL**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO CIVIL

P R E S E N T A :

CYNTHIA LOMBARDO ABURTO

ASESOR: M.I. GILBERTO SOTELO AVILA

MEXICO, D. F.

1996

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-1-180/95

Señorita
CYNTHIA LOMBARDO ABURTO
Presente.

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor **M.I. GILBERTO SOTELO AVILA**, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de **INGENIERO CIVIL**.

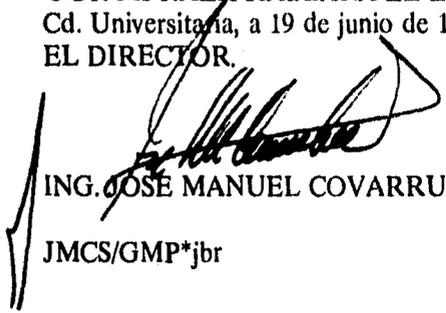
"DISEÑO HIDRAULICO DE CAPTACIONES CON LUMBRERA VERTICAL"

- I. ANTECEDENTES**
- II. CRITERIOS DE DISEÑO**
- III. LUMBRERAS DE RANURA VERTICAL**
- IV. EJEMPLO DE DISEÑO**
- V. CONCLUSIONES**

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria, a 19 de junio de 1996.
EL DIRECTOR.


ING. JOSÉ MANUEL COVARRUBIAS SOLIS

JMCS/GMP*jbr

GRACIAS ...

A DIOS

Por haberme dado todo cuanto tengo

A MIS PADRES

Por el desinteresado amor que incondicionalmente me han brindado

A JOSÉ LUIS

Por permitirme compartir tanta felicidad

A MIS HERMANOS

Por su constante apoyo

A MIS AMIGOS, MAESTROS Y COMPAÑEROS

Por haberme acompañado durante esta etapa de mi vida

AL M.I. GILBERTO SOTELO ÁVILA

Por su paciencia y dedicación

A LA FACULTAD DE INGENIERÍA

Por haberme enseñado a amarla

A LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Por haberme mostrado un mundo nuevo

ÍNDICE:

	pág.
1. ANTECEDENTES	
1.1 <i>Planteamiento del problema</i>	1
1.2 <i>Descripción de las estructuras empleadas</i>	2
1.3 <i>Aplicaciones en México</i>	8
2. CRITERIOS DE DISEÑO	
2.1 <i>Cámara espiral</i>	
2.1.1 Geometrías propuestas	9
2.1.2 Gastos de diseño	12
2.2 <i>Estructura de cámara espiral estudiada por Quick</i>	
2.2.1 Descripción	19
2.2.2 Cálculo del gasto	20
2.3 <i>Flujo en la lumbrera</i>	
2.3.1 Determinación del diámetro de la lumbrera	22
2.3.2 Determinación de la velocidad media	22
2.4 <i>Disipación al pie de la lumbrera</i>	
2.4.1 Energía excedente al pie de la lumbrera	24
2.4.2 Cálculo de f (factor de fricción de Darcy)	25
2.4.3 Fórmulas empíricas para calcular el flujo de aire en la lumbrera	25
3. LUMBRERAS DE RANURA VERTICAL	
3.1 <i>Estructura vórtice de ranura vertical: Modelo de Quick</i>	
3.1.1 Descripción	27
3.1.2 Análisis del flujo en la lumbrera	28
3.1.3 Cálculo del gasto total	30
3.1.4 Funcionalidad del método propuesto por Quick	33
3.2 <i>Experimentos realizados en México</i>	
3.2.1 Condiciones a satisfacer antes de una lumbrera de ranura	36
3.2.2 Modificaciones a la estructura propuesta por Quick	39
3.3 <i>Aplicaciones del diseño en la ciudad</i>	
3.3.1 Experimentación en el modelo hidráulico de la lumbrera 1 del semiprofundo Gran Canal. Subetapa 1.(Ref. 6)	48
3.4.2 Experimentación en el modelo hidráulico de la lumbrera 1 del semiprofundo Gran Canal. Subetapa 2.(Ref. 6)	50
4. EJEMPLO DE DISEÑO	
4.1 <i>Diseño de la ranura</i>	54
4.2 <i>Flujo en la lumbrera</i>	61
4.3 <i>Disipación y descarga</i>	63

5. CONCLUSIONES

ANEXO A

REFERENCIAS

1. ANTECEDENTES

1.1 Planteamiento del problema

Es frecuente la necesidad de conducir el agua desde un nivel alto hasta uno bajo, misión que resulta bastante complicada debido a la gran cantidad de energía que acumula el agua en la caída. Casos de este tipo se presentan principalmente en las presas, para conducir el volumen de excedencias hasta el lecho del río; también en los sistemas de drenaje profundo de las grandes ciudades, donde se desea conducir hasta dicho sistema los caudales provenientes de los distintos subsistemas de drenaje superficial.

La forma más sencilla de salvar un gran desnivel en obras hidráulicas urbanas es mediante una caída libre (Fig. 1.1), ya que, como su nombre lo indica, el agua cae libremente a través de un conducto vertical hasta el nivel deseado. Sin embargo, en este tipo de descarga la energía acumulada por el agua poco se disipa en el trayecto, lo que provoca impactos importantes en el fondo. Además, en la caída libre ocurre un gran arrastre de aire que ayuda a la disipación, pero que al verse atrapado por el agua, puede llegar a ser presurizado aguas abajo y volverse explosivo cuando se libera bruscamente.

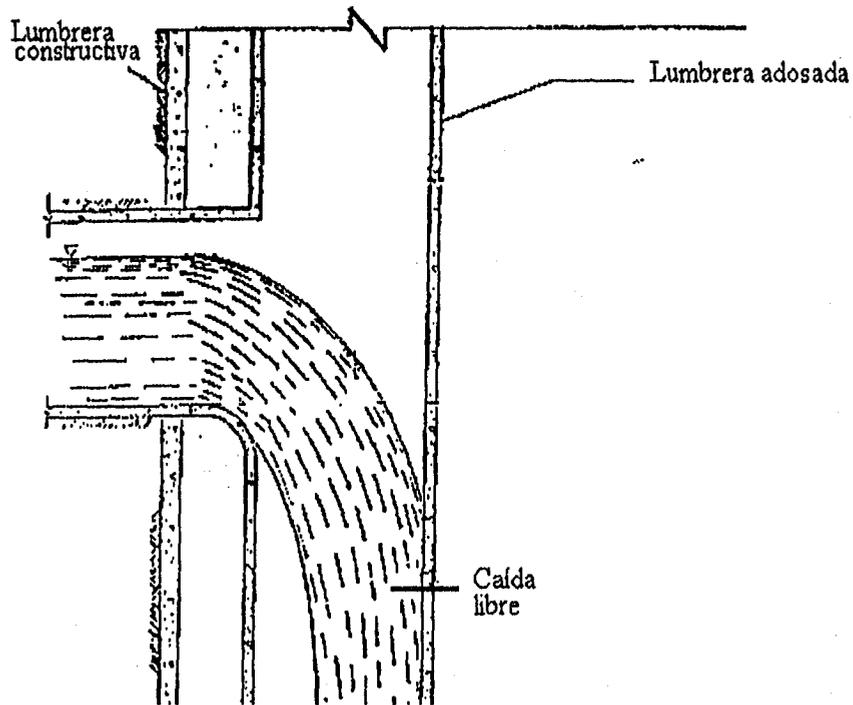


Figura 1.1.- Caída libre

Con el fin de optimizar el diseño de estas conducciones se han ideado diversas estructuras, resaltando por su importancia las de cámara espiral, las de cimacio y las de ranura vertical. En todas éstas el agua se encuentra en un nivel superior y se conduce por un canal rectangular hasta una lumbrera o conducto vertical. Aquí, cae hasta el nivel

deseado y se descarga al exterior o a otro conducto mediante una estructura de desfogue. De acuerdo con lo anterior, las estructuras mencionadas están formadas por tres partes principales: la cámara o estructura de entrada, la lumbrera de caída vertical y la estructura de desfogue.

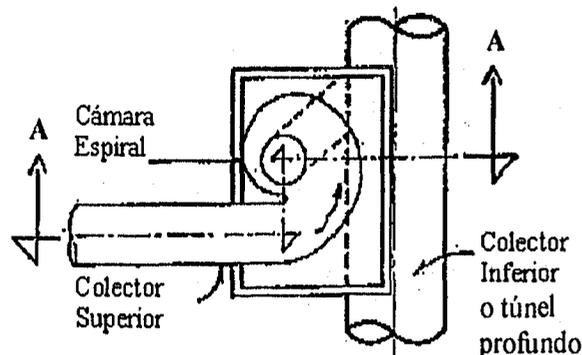
Durante la construcción de los sistemas de drenaje profundo se excavan las llamadas lumbreras constructivas que son verticales y tienen aproximadamente 9 m de diámetro. Estas lumbreras se utilizan en el momento de la construcción como apertura de frentes de trabajo, para la introducción y extracción de equipo y para facilitar los cambios de dirección del túnel. Posteriormente se utilizan para alojar en sus paredes a la lumbrera de caída, por lo que ésta recibe también el nombre de lumbrera adosada. Además, permiten la ventilación del sistema de drenaje así como la operación y mantenimiento del mismo.

1.2 Descripción de las estructuras empleadas

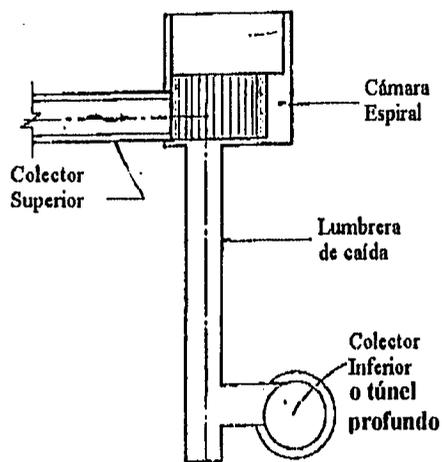
Estructuras de entrada

Las primeras estructuras de entrada que se idearon fueron las de cámara espiral. (Fig. 1.2). Éstas consisten en una gran plataforma de forma helicoidal en planta y fondo horizontal, que cubre casi toda la boca de la lumbrera constructiva. La cámara está conectada al colector superior y se apoya en la pared superior de la lumbrera constructiva, que soporta la caja de control de los colectores superficiales. Tiene la función de introducir gradualmente el agua en la periferia de la lumbrera adosada. Con la cámara espiral se genera un movimiento de rotación tipo vórtice en el flujo entrante, lo que provoca la adherencia del agua en las paredes de la lumbrera de caída. Este comportamiento hidráulico resulta de suma importancia por las siguientes razones:

- Existe una mayor disipación de energía debido a la fricción del agua contra las paredes de la lumbrera vertical de caída.
- Se genera un núcleo de aire estable que, además de permitir la ventilación de la lumbrera, produce, por efecto centrífugo, un exceso de presión del agua sobre las paredes de la misma. Dicho efecto evita las presiones negativas en la pared y propicia una mayor fricción.



a) Planta



b) Corte A-A

Figura 1.2.- Cámara espiral

Por mucho tiempo se diseñaron distintas geometrías para las cámaras espirales. La primera fue ideada por Drioli (Ref 9). Más tarde se generaron modificaciones sobre este diseño dando lugar a las estructuras propuestas por Knapp (Ref. 13), Adami (Ref. 1) por el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (U.N.A.M.) (Ref. 12). Así mismo, se han realizado diversos estudios teóricos y experimentales para encontrar la relación carga contra gasto de estas estructuras, llegando con esto a los métodos propuestos por Viparelli (Ref. 1), Knapp (Ref. 13), Drioli (1969), Ackers y Crump (Ref. 7), Pica (1970), Adami (1967), Hager (Ref. 2) y Quick (Ref. 3) ; de los cuales, el más sencillo y que conduce a resultados satisfactorios es el propuesto por Hager.

Si bien las cámaras espirales resultaron ser estructuras confiables y seguras desde el punto de vista de disipación de energía, tienen el gran inconveniente del alto costo de construcción que implica su gran tamaño y elaborado diseño. Además, le restan espacio a la lumbrera constructiva para las maniobras de mantenimiento del sistema de drenaje profundo. También representan un problema estructural, pues su gran peso y tamaño las convierte en estructuras difíciles de soportar.

Ante las desventajas de las cámaras espirales, se dió la tarea de buscar otro tipo de estructura que resolviera el problema. Así se pensó en las caídas con cimacio, las cuales consisten en un canal rectangular, de fondo casi horizontal, que interseca a la lumbrera mediante un cimacio y cambia gradualmente la dirección del flujo de horizontal a vertical. Con este arreglo se logra reducir o suprimir el aire que se acumula entre la lámina inferior de la vena líquida y la lumbrera, impidiendo así la formación de presiones negativas. Sin embargo, una vez en la lumbrera, se vuelve a presentar la caída libre del agua, lo que genera los inconvenientes antes mencionados. Por otro lado, el cimacio necesario para aliviar las presiones negativas entre la vena líquida y la lumbrera es de grandes dimensiones, por lo que resulta poco económico y difícil de construir por la falta de

espacio. Por lo anterior, las caídas con cimacio tuvieron poco éxito y fueron muy pocas las construidas en el Distrito Federal con dicha geometría.

En el intento de encontrar una estructura eficiente para hacer la conducción, Quick introdujo las lumbreras de ranura vertical (Fig. 1.3), que consisten en un tubo vertical con una ranura practicada en pared de la lumbrera adosada hasta su extremo superior y un muro guía vertical que conduce el flujo de aproximación hasta la ranura. Con estas estructuras se logra resolver el problema de disipación de energía, ya que el muro guía tangente a la pared de la lumbrera induce la formación de un vórtice desde la entrada de la lumbrera, que permite disipar, mediante la fricción del agua con las paredes, gran parte de la energía ganada en la caída. Además, se elimina la losa en forma de espiral solucionando el problema de espacio para el mantenimiento de la lumbrera constructiva. El desarrollo teórico de Quick para las lumbreras de ranura vertical es poco claro. Sin embargo, con algunas adaptaciones a esta estructura, la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica del Departamento del Distrito Federal, en México (D.G.C.O.H.), realizó experimentos diversos que comprueban la eficiencia y aplicabilidad de dichas estructuras.

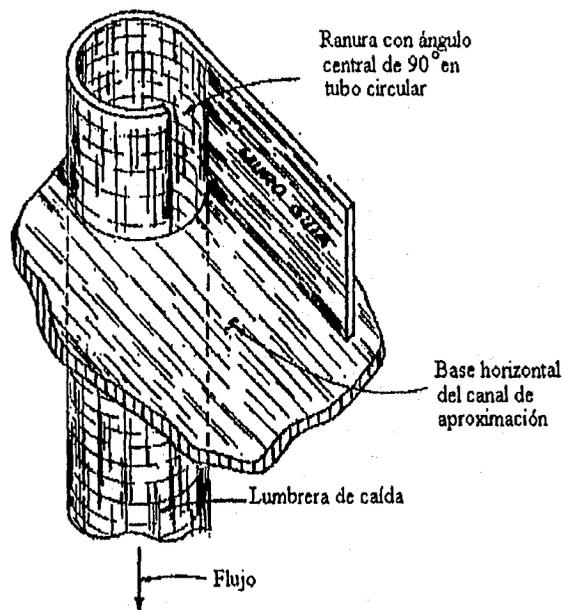


Figura 1.3.- Lumbreras de ranura vertical

El tema medular de este trabajo lo constituyen las lumbreras de ranura vertical, por lo que se expondrán con detalle en los siguientes capítulos.

Lumbreras adosadas

Las lumbreras verticales que se utilizan en la conducción se forman generalmente a base de tubos de concreto prefabricados de diámetro comercial.

Tanto en las estructuras de entrada con cámara espiral como en las de ranura vertical, el flujo que se presenta en la lumbrera es del mismo tipo. Como ya se mencionó, en ambas se da un flujo de tipo vórtice que permite que el agua se adhiera a las paredes de la lumbrera y se forme un núcleo de aire en el centro del vórtice que ayuda a la ventilación interior de la lumbrera y a evitar la separación del flujo de las paredes.

Al respecto, se han realizado estudios para determinar la magnitud de la velocidad del agua en la lumbrera, el diámetro de la misma, la energía excedente y la obtención de fórmulas empíricas para conocer el arrastre de aire. Dichas investigaciones se presentan en el desarrollo de este trabajo.

Estructuras de desfogue

Las estructuras de desfogue tienen la finalidad de eliminar parte de la energía excedente con la que el agua llega al pie de la lumbrera adosada, de manera que exista una buena conducción hacia el conducto inferior y se evite la turbulencia a la entrada del túnel.

La disipación de energía puede ocurrir después del cambio de dirección de la corriente o directamente en el extremo inferior de la lumbrera.

En el primer caso se han empleado dos tipos de estructuras que se colocan al final de la lumbrera:

- Una curva que guía el agua al túnel y que puede estar dotada de un umbral para amortiguar el flujo.
- Un codo que estrangula la sección transversal originando una retención y un colchón de agua al pie de la lumbrera. Con la posterior ampliación que se produce, se origina la reducción de la velocidad del flujo y el ascenso del aire arrastrado hacia la superficie libre. (Fig. 1.4)

Estos dos tipos de estructuras fueron muy poco utilizadas; de hecho, en México no se usó ninguna de ellas. La que se muestra en la figura 1.2 se usó con pocos resultados positivos debido a la gran cantidad de azolve que se acumula en el extremo inferior de la lumbrera adosada.



Figura 1.4.- Codo al pie de la lumbrera

En el D.F se han utilizado tanques amortiguadores colocados a una altura intermedia de la lumbrera constructiva.(Fig. 1.5). A estos tanques llega el agua que sale del extremo inferior de la lumbrera adosada, formándose un colchón de agua, retenido por un muro vertedor, que amortigua la energía. El agua que se acumula en el tanque vierte por encima del muro y cae verticalmente al colector inferior.

Una vez descrito el funcionamiento de los tanques intermedios, se pueden ver los inconvenientes que presentan. Por un lado, la descarga al túnel profundo crea una gran barrera de agua transversal al flujo del colector, lo que genera condiciones de turbulencia que reducen la capacidad del túnel. Esta es una situación poco recomendable, en especial si se toma en cuenta el alto costo de los túneles de gran diámetro, que se utilizan en el sistema de drenaje profundo. Por otra parte, la enorme cantidad de azolves que transporta el agua se deposita en el tanque y reduce su efecto amortiguador, además de que acumula el agua residual y propicia malos olores.

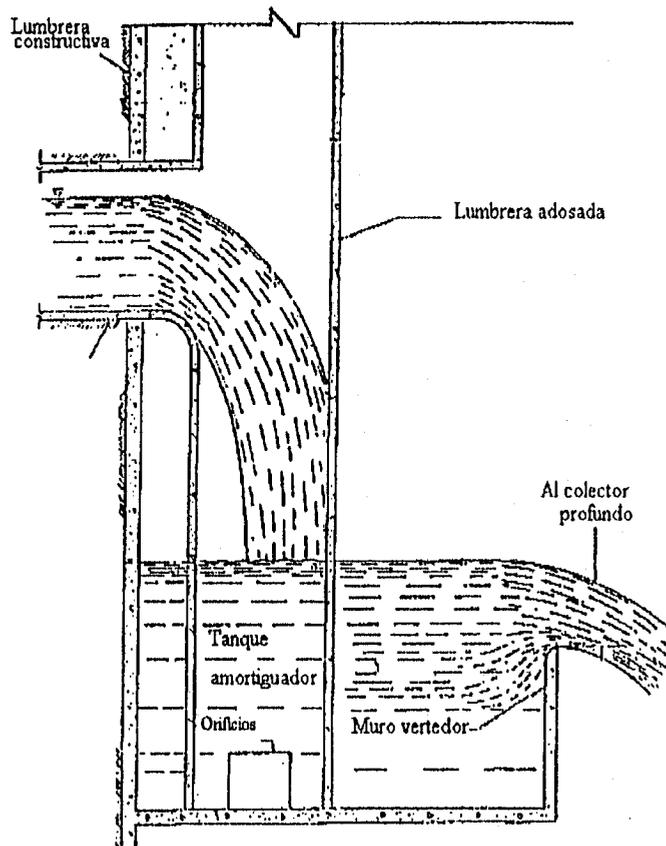
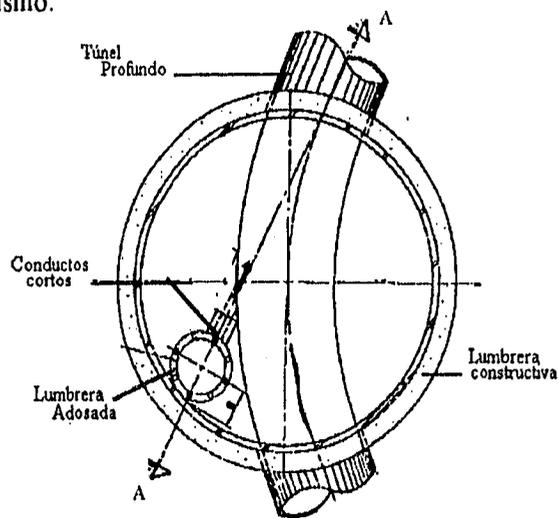
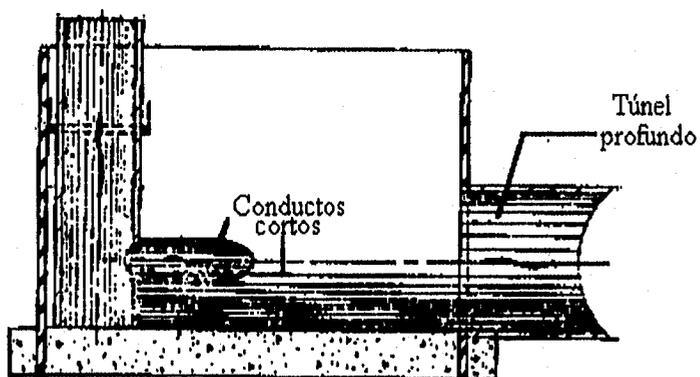


Figura 1.5.- Tanque amortiguador

Debido a la poca funcionalidad de estas estructuras de desfogue, la D.G.C.O.H. ideó una descarga por medio de conductos cortos que salen a distintos niveles de la lumbrera adosada y que dirigen el flujo hacia el colector profundo.(Fig. 1.6). Con esto no sólo se evita la turbulencia generada por la columna de agua transversal, sino que además, al tener el flujo del colector la misma dirección que el agua de desfogue, se logra aumentar la capacidad del mismo.



a) Planta



b) Corte A-A

Figura 1.6.- Conductos cortos que dirigen el flujo

1.3 Aplicaciones en México

La D.G.C.O.H. ha ideado y construido distintos tipos de captaciones, que en esencia difieren en la forma de entrada a la lumbrera y en la manera de descargar al túnel.

Por lo que se refiere a la forma de la entrada, se han probado tres tipos:

- Descarga directa en caída libre del colector superficial a la lumbrera adosada (figura 1.1)
- Cámara espiral (figura 1.2)
- Caída con cimacio

En relación a las estructuras de descarga al túnel se han probado dos tipos:

- Descarga mediante tanques intermedios (figura 1.5)
- Descarga directa de la lumbrera al túnel, a través de conductos cortos que dirigen el flujo hacia el mismo (figura 1.6)

La combinación más ampliamente utilizada hasta ahora ha sido la de cámara espiral y tanque intermedio. Sin embargo, los experimentos realizados por la D.G.C.O.H., han permitido diseñar, para casos concretos de aplicación en la ciudad, lumbreras de ranura con conductos cortos que dirigen el flujo, tales como la lumbrera 1 del Semiprofundo Gran Canal. Hasta ahora, esta última combinación es la que mejores resultados ha dado.

2. CRITERIOS DE DISEÑO

2.1 Cámara espiral

2.1.1 Geometrías propuestas

Como ya se mencionó, la geometría de la cámara espiral ha ido evolucionando con el tiempo para proporcionar una mejor eficiencia hidráulica, adaptarse a las condiciones de espacio existentes y construirse con métodos más sencillos.

La primera cámara espiral que se ideó es de forma circular y plantilla horizontal (figura 2.1). No ofrece mayores dificultades constructivas, pero ocupa un gran espacio e hidráulicamente no constituye una solución óptima. (Ref. 10).

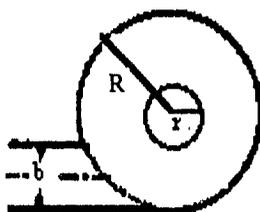


Fig. 2.1. Cámara de forma circular

Por su parte, Drioli propuso la construcción de una cámara espiral a base de arcos de círculo, cuya fácil construcción y buen funcionamiento hidráulico han mostrado su bondad en la práctica. El fondo de la cámara es horizontal y cuenta con cantos redondeados en los bordes de entrada del agua a la lumbrera, es decir, en la intersección del círculo interior de la cámara con el extremo superior de la lumbrera (figura 2.2). Dicho redondeo debe de ser pequeño, de manera que mejore el paso del agua y prolongue la formación del vórtice. El diseño de este tipo de cámara consiste en proponer los siguientes parámetros, mostrados también en la figura 2.2:

- b ancho del canal de acceso
- D diámetro de la lumbrera adosada
- Δr redondeo
- c, s distancias mostradas en la figura.

Con base en estos datos, Drioli propuso las siguientes expresiones para el cálculo de otros parámetros geométricos y para la obtención de los radios de los diferentes arcos que conforman la estructura. Estos son los siguientes:

$$r_a = r + \Delta r$$

$$r_1 = c + e + r_a$$

$$a = r_a + s + b/2$$

$$r_2 = c + 2e + r_a$$

$$e = \frac{b + s}{7}$$

$$r_3 = c + 4e + r_a$$

$$r_4 = c + 6e + r_a$$

donde r es el radio de la lumbrera adosada.

Estas recomendaciones se encuentran en la referencia 1.

Otra geometría para la cámara espiral fue propuesta por el Instituto de Ingeniería de la U.N.A.M. Este método se basa en una serie de curvas experimentales $\frac{Q}{\sqrt{g} b^{5/2}}$ vs. $\frac{H}{b}$ obtenidas para diferentes relaciones de $\frac{D}{b}$, donde Q es el gasto de diseño de la cámara espiral, g la aceleración de la gravedad, b el ancho del canal de aproximación, H el tirante máximo permisible en la cámara por condiciones de espacio y D el diámetro de la lumbrera.

Mediante las curvas experimentales es posible obtener el diámetro de la lumbrera y conocer las condiciones de operación de la cámara espiral. Adicionalmente, se efectuaron otros experimentos que permiten relacionar el diámetro de la lumbrera con los parámetros e , s , c , a y $b/2$. (Refs. 1 y 12).

La espiral se diseña de acuerdo con los parámetros anteriores, con los siguientes radios de curvatura y con una pendiente S sobre la línea de centros a lo largo de la espiral. (figura 2.2).

$$R_1 = a + b/2 - e$$

$$R_2 = a + b/2 - 3e$$

$$R_3 = a + b/2 - 5e$$

$$R_4 = a + b/2 - 6e$$

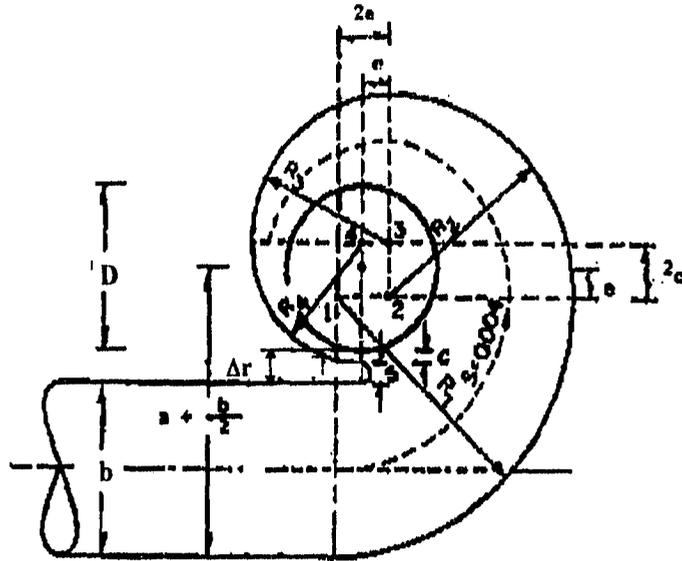


Figura 2.2. Cámara espiral propuesta por el Instituto de Ingeniería de la UNAM.

En la referencia 1 se establece una comparación entre las dos últimas geometrías, cuya conclusión acepta que las dimensiones propuestas por Drioli siempre serán mayores que las establecidas por el Instituto de Ingeniería.

Para régimen subcrítico, se idearon estructuras resultantes de estudios experimentales, cuyo radio de curvatura cambia continuamente. Así se tienen las propuestas por Knapp (Ref. 13) y Adami (Ref. 1), que se basan en las expresiones respectivas siguientes (ver figura 2.3):

$$\frac{\alpha}{2\pi} = \frac{r_A - r}{b}$$

$$\frac{\alpha}{2\pi} = -\frac{H_c}{Q} \ln \frac{r_A}{r} + \frac{C^3}{4gQ} \left(\frac{1}{r^2} - \frac{1}{r_A^2} \right)$$

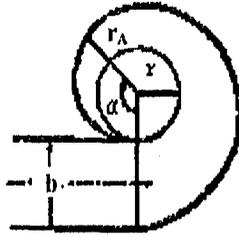


Figura 2.3. Cámara con arcos de círculo variables.

Estas estructuras de radio de curvatura variable no representan ninguna ventaja hidráulica, pero su construcción resulta más sencilla.

2.1.2 Gastos de diseño

Al igual que con las geometrías, se han introducido numerosos métodos para el cálculo del gasto de capacidad en la cámara espiral y en la lumbrera de caída.

Método de Viparelli

Viparelli obtuvo tres expresiones para relacionar las condiciones de entrada a la cámara espiral con el gasto Q de descarga. La deducción de dichas expresiones se basan en las siguientes hipótesis:

- La presión atmosférica actúa sobre el centro de la lumbrera y por lo tanto, un nivel de agua constante a la entrada y a lo largo de las paredes es la situación que impera en el fenómeno.
- Se desprecia la pérdida de energía en la estructura de acceso, por lo que la energía de entrada permanece constante a lo largo del flujo.
- Se considera un flujo circular de tipo vórtice libre dentro de la lumbrera, por lo que $v_t r$ es una constante, donde v_t es el componente tangencial de la velocidad, r el radio de la lumbrera de caída y c una constante.
- A una distancia f por debajo de la plantilla de la cámara, sección 0-0, (figura 2.3) ocurre una sección de diámetro mínimo en el núcleo del vórtice, se considera que la componente radial de la velocidad v_r es nula.

Los términos que intervienen en las expresiones se muestran en la figura 2.4.

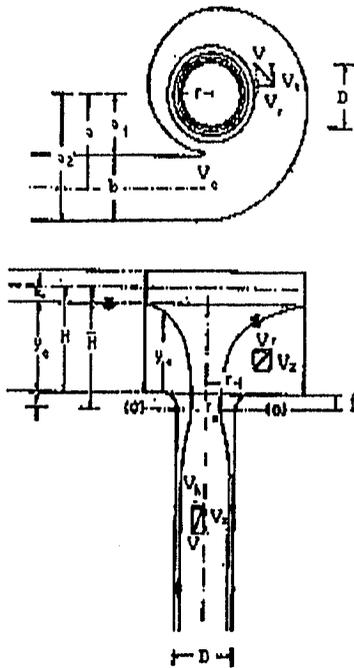


Figura 2.4. Simbología en las expresiones de gasto propuestas por Viparelli

La primera expresión de Viparelli para el gasto de capacidad establece una relación entre el nivel de energía a la entrada de la cámara, medido desde la sección 0-0, y el gasto de descarga. Se basa en las ecuaciones de continuidad y de la energía, en las que se toman en cuenta las hipótesis anteriores. Las expresiones correspondientes a esta primera relación son

$$Q = \varphi \pi r^2 \sqrt{2g\bar{H}}$$

$$\varphi = \sqrt{1-\varepsilon} - \xi \sqrt{\xi^2 - \varepsilon} - \varepsilon (\ln(1 + \sqrt{1-\varepsilon}) - \ln(\xi + \sqrt{\xi^2 - \varepsilon})) \text{ Cuando: } \varepsilon \leq \xi^2$$

$$\xi = \frac{r_0}{r} = \frac{2r_0}{D} \qquad \varepsilon = \frac{4c^2}{2g\bar{H}D}$$

donde ε , ξ , y φ son valores introducidos en la integración de la ecuación original, Q es el gasto de la estructura, r el radio de la lumbrera de caída, \bar{H} el nivel de energía a la entrada, medido desde la sección 0-0, r_0 el radio del vórtice en la misma sección, D el diámetro de la lumbrera de caída y c la constante del vórtice.

La deducción de estas ecuaciones se pueden consultar en la referencia 1

La segunda expresión de Viparelli para el gasto de capacidad establece una relación entre el tirante y_e a la entrada de la cámara y el gasto Q de descarga. Fue obtenida experimentalmente, tomando en cuenta que $c = v_e a$, donde c es la constante de vórtice, v_e la velocidad de entrada a la cámara y a la distancia del centro de la lumbrera al eje del canal de entrada. La ecuación tiene la forma:

$$Q = \mu \pi r^2 \sqrt{2g(y_e + f)}$$

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \left(\frac{\pi r^2}{by_e}\right)^2 \left(\beta \left(\frac{a}{r}\right)^2 - 1\right)}}$$

donde $f = r_0$, μ es una constante de cálculo y b el ancho del canal de entrada.

Para determinar los valores de α y β hay que tomar en cuenta las condiciones de la velocidad tangencial en la sección 0-0, teniendo así dos casos:

- $V_t r = \text{constante}$
- $V_t = \text{constante}$

Las expresiones utilizadas para cada uno de estos casos se presentan en la referencia 1.

Viparelli derivó una tercera expresión a partir de las relaciones de energía entre la sección de entrada a la cámara espiral y la sección 0-0. Esta ecuación parte de la relación empírica:

$$\frac{r_0 \sqrt{2gH}}{V_e a} = 0.7$$

La ecuación es:

$$0.5 \frac{Q^2 a^2}{b^2 y_e^2} \left(\frac{1}{r_0^2} - \frac{2}{a^2} \right) = 2g (y_e + f)$$

donde la simbología que interviene en la ecuación es la misma anteriormente definida.

Existe también una cuarta relación de Viparelli, que es un caso particular de la mencionada, donde v_r es constante. (Ref. 1).

Es importante señalar que la segunda de las cuatro expresiones que propone Viparelli es la más práctica para fines de cálculo, ya que la determinación de la constante de vórtice es bastante sencilla.

Método de Knapp

Knapp (Ref.13) se basa en la primera relación de Viparelli para determinar su propia ecuación. Toma el valor de φ propuesto por Viparelli para el límite superior de ε ; es decir, para $\varepsilon = \xi^2$ (se desprecia el valor de f) con lo que resulta un valor:

$$\varphi = \varphi_0 = \sqrt{1 - \varepsilon} + \varepsilon \ln \frac{\varepsilon}{1 + \sqrt{1 - \varepsilon}}$$

que se puede sustituir en la primera expresión de Viparelli en la que intervienen el gasto de descarga y la energía de entrada a la cámara espiral. Además, mediante la ecuación de Bernoulli es posible obtener una relación entre φ y el tirante de entrada y_e .

En la referencia 1 se puede ver la deducción de la ecuación de Knapp.

Método de Drioli

Drioli (1969) propuso otro método para el cálculo del gasto. Introdujo las magnitudes ω y ζ , la primera obtenida con base en estudios experimentales y la segunda al suponer que $v_x = v_t$ en el núcleo del vórtice. Las ecuaciones correspondientes se muestran en la referencia 1.

Método de Pica

Pica (1970) obtuvo las expresiones que establecen la relación entre el gasto de descarga y el tirante de la cámara espiral para el caso en que v_t es constante. Para deducir estas ecuaciones, Pica partió de la ecuación de Viparelli y estableció una hipótesis que iguala la circulación a la entrada de la cámara y en el interior de la misma, por lo que $V_o a = V_o r \sqrt{\beta}$. (Ref. 1). De este modo, obtuvo

$$y_e = \pi r \frac{a}{b} \psi$$

$$Q = \frac{\pi r^2 \sqrt{2g(y_e + f)}}{\sqrt{\frac{1}{\varphi^2} - \left(\frac{\pi r^2}{b y_e}\right)^2}}$$

$$\text{donde } \psi = \frac{3}{2} \frac{1-\xi^2}{1-\xi^3} \frac{\varphi}{\sqrt{1-\frac{2}{(1-\xi^2)^2}}} \text{ y } \varphi = 0.95 - \xi$$

Método de Ackers y Crump

Ackers y Crump proponen varias ecuaciones basadas en los fundamentos matemáticos de Binnie y Hookins (Ref. 15) sobre la descarga en forma de vórtice desde un recipiente circular. Además, estas expresiones son aplicables para el caso en que v_t es constante.

La primera expresión se dedujo en la sección 0-0 y establece una relación entre el radio mínimo del núcleo de aire en la sección contracta r_0 y el nivel de energía \bar{H} a la entrada, medido desde la sección 0-0, cuando se conoce la constante de vórtice. (Ref. 1). La ecuación es:

$$r_0^2 = \frac{1}{8g\bar{H}} c^2 + \sqrt{c^4 + 16r^2 c^2 g\bar{H}}$$

La segunda ecuación (1960) se establece para la condición de salida. Ésta, junto con la ecuación de descarga de Binnie y Hookings y el principio del gasto máximo, da origen a tres expresiones adimensionales que son las que en la práctica se utilizan para el cálculo del gasto de descarga. (Ref. 1). Dichas ecuaciones se muestran a continuación:

$$\frac{Q}{D c} = \frac{H}{D} \ln \frac{a_2}{a_1} - \frac{c^2}{4gD^3} \left(\frac{D^2}{a_1^2} - \frac{D^2}{a_2^2} \right)$$

$$\frac{Q}{D c} = \frac{\pi}{4} \sqrt{\frac{2(1-\sigma)^3}{\sigma}}$$

donde $\sigma = \xi^2$

$$\frac{H+f}{D} = \frac{c^2(1+\sigma)}{g D^3 \sigma^2}$$

Adicionalmente, Ackers y Crump llegan a una expresión del gasto para el caso de una demanda pequeña. A su vez, esta ecuación fue modificada por Pica para obtener una expresión que relacione el gasto de descarga con el tirante de entrada. (Ref. 1).

Método de Adami

Adami (1967) llegó a una relación adimensional entre carga y gasto de descarga al sustituir en la ecuación del gasto de Binnie y Hookings (Refs. 1 y 15) el radio mínimo del núcleo r_0 obtenido en el método de Ackers y Crump. La relación obtenida es la siguiente

$$\frac{Q}{\pi r^2 c} = \left[1 - \frac{1}{4N} (1 + \sqrt{1 + 8N}) \right] \sqrt{N - \frac{4N}{1 + \sqrt{1 + 8N}}}$$

donde: $N = 2g H r^2 / c^2$

Adicionalmente, Adami propone una expresión lineal que se aproxima mucho a la anterior, y cuya solución gráfica se presenta en la referencia 1.

Obtención de la constante c de vórtice

Varios autores han señalado diversos valores experimentales para la constante de vórtice. (Ref. 1).

La expresión que a continuación se presenta fue obtenida a partir de la combinación de las ecuaciones de Adami y de Ackers y Crump, pero difiere bastante de los valores mencionados previamente.

$$C = 0.664 \sqrt[3]{\frac{g^2 r^7}{Q}}$$

Método de Willi Hager

Para este análisis se toma en cuenta que el canal de aguas arriba es rectangular y que la pendiente del fondo de la cámara espiral es igual a la del canal de aproximación, de manera que pervalezcan condiciones pseudouniformes (la carga con respecto al fondo del canal permanece casi constante). (Ref. 21)

Para que se mantenga el núcleo central de aire en el centro de la lumbrera, no debe haber sumergencia aguas abajo. De esta manera, el gasto es una relación única de la carga existente aguas arriba, es decir: $H = y_e + V^2 / 2g$, donde V es la velocidad media de aproximación, y_e es el tirante aguas arriba y H la energía específica existente aguas arriba.

La deducción de este método (Ref. 2) parte de las ecuaciones propuestas por Pica. Hager establece algunas relaciones algebraicas con las mismas, desprecia la distancia f e introduce dos relaciones adimensionales en la fórmula de Pica para el gasto, una para el

gasto de descarga y otra para el tirante de entrada, con las cuales el gasto depende de la relación r/a . Adicionalmente demuestra que el efecto de esta relación es insignificante para el intervalo $0 < r/a < 0.5$, por lo que considera un valor de 0.5. Finalmente, para permitir una aereación suficiente señala que $\xi = 1/3$. Al introducir todos estos valores, resulta una ecuación que puede ser sustituida por la de una recta, la que con algunas modificaciones queda

$$Q = r \sqrt{gb} y_e$$

A continuación se define la simbología utilizada en esta tesis que difiere de la de Hager.

Literales	Significado
y_e	tirante a la entrada de la cámara espiral
r	radio de la lumbrera de caída
ψ	parámetro auxiliar
φ	coeficiente de gasto
ξ	relación del radio mínimo del flujo al radio de la lumbrera

La figura 2.5 muestra las curvas que se obtienen de las ecuaciones desarrolladas por Hager, y establece la relación gasto-tirante para diferentes valores de la relación r/a , donde y_0 y Q_0 son las relaciones adimensionales propuestas por Hager y se expresan de la siguiente forma:

$$y_0 = \frac{a r}{b} \qquad Q_0 = \sqrt{\frac{g a r^5}{b}}$$

Se observa que estas relaciones dependen únicamente de la geometría de la entrada a la lumbrera, por lo que una vez que se determinan al conocer el gasto de descarga o el tirante en la cámara, se puede determinar el otro parámetro por medio de la figura 2.5.

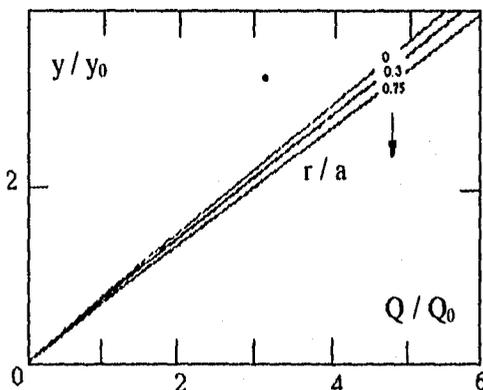


Figura 2.5. Relación tirante-gasto para las ecuaciones propuestas por Hager y distintos valores de r/a .

El método de Hager es hasta la fecha el más sencillo, ya que llega a una relación lineal de fácil aplicación. Además, es importante señalar que los resultados obtenidos con estas expresiones han sido comparados con mediciones experimentales y se ha encontrado una concordancia favorable entre ellos. Es por esto que se pueden considerar como relaciones universales gasto-tirante para cámaras espirales con flujo de aproximación en régimen subcrítico.

2.2 Estructura con cámara espiral estudiada por Quick

2.2.1 Descripción

En la estructura de cámara espiral estudiada por Quick (Fig.2.6), (Ref. 2), el diseño del muro guía espiral se mantiene con la misma geometría reportada por Hager (1985); es decir, queda definido por la expresión:

$$R = C^* e^{k \cdot q}$$

donde R es el radio definido con el ángulo q, y C* y k son constantes que quedan establecidas por radios especificados con dos valores de q.

Las condiciones de frontera pueden ser elegidas libremente, tomando en cuenta que la relación entre los radios exterior e interior establecerán una relación entre los componentes radial y tangencial del flujo. También existe cierta libertad para elegir el diámetro del muro espiral, pero faltan estudios de investigación que proporcionen un diámetro óptimo.

De acuerdo con Binnie y Hookings (1948), en las estructuras de cámara espiral anteriormente propuestas (inciso 2.1), el flujo es crítico en la sección contracta de estrangulamiento (sección 0-0). En consecuencia, el gasto es máximo para la carga dada y condiciones de torbellino.

Para las estructuras de cámara espiral estudiadas por Quick se demuestra que la constante c del vórtice se puede determinar en términos del tirante de aguas arriba, de la geometría del muro guía y de la lumbrera de caída. Esto implica que el control no se encuentra en la sección crítica, ya que la geometría es asimétrica y el muro provoca la formación de un torbellino que limita la descarga. Así pues, el control se comparte entre la sección de estrangulamiento y el torbellino producido en el flujo de aproximación.

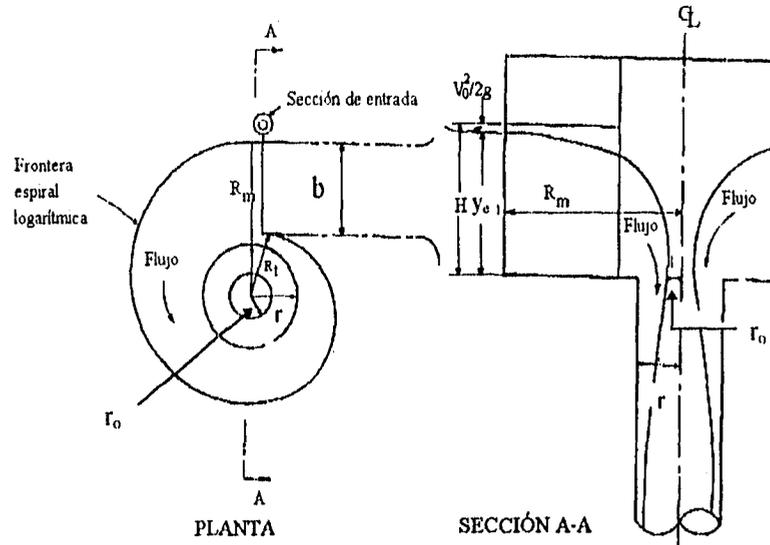


Figura 2.6.- Estructura de cámara espiral estudiada por Quick

2.2.2 Calculo del gasto

El gasto para este tipo de estructuras se obtiene por medio de una relación lineal, mediante un método iterativo que converge rápidamente y proporciona valores muy aproximados a los obtenidos experimentalmente.

El método parte de la energía específica en la sección crítica y supone una distribución de vórtice libre (Ref. 2).

La obtención del gasto se efectúa al llevar a cabo los siguientes pasos: (las ecuaciones que aparecen en los pasos mostrados provienen del desarrollo de Quick, Ref. 2)

- Se obtiene un valor inicial de la constante de vórtice con la expresión:

$$c = kr\sqrt{2gH}$$

donde c es la constante de vórtice, k es una constante menor de uno, r el radio de la lumbrera, H la energía total en el flujo de aproximación y g la aceleración de la gravedad.

- Se calcula un valor inicial de r_o (radio del flujo de aire en la sección crítica) introduciendo el valor inicial de c y de acuerdo con la expresión

$$r_o^2 = \frac{c^2 \pm \sqrt{c^4 + 16c^2 r^2 gH}}{8gH}$$

- Con el mismo valor de c se hace una aproximación de la velocidad de entrada a partir de

$$u_m = \frac{c}{R_m}$$

donde u_m es la velocidad total a la entrada para el radio R_m , que es el radio máximo a la entrada.

- Se estima la velocidad tangencial del vórtice en la sección crítica (u_b) mediante la expresión

$$u_b = \frac{c}{r_0}$$

- La primera estimación del gasto se obtiene de

$$Q_1 = \pi (r^2 - r_0^2) \left(2gH - \frac{c^2}{r_0^2} \right)^{1/2}$$

- A partir de las condiciones de entrada obtenidas se llega a otra expresión, con la que se obtiene un segundo gasto de aproximación y que es

$$Q_2 = \frac{c^3}{4g} \left[\frac{1}{R_m^2} - \frac{1}{(R_m - b)^2} \right] - y_c \ln \left[1 - \frac{b}{R_m} \right]$$

donde b es el ancho del canal de aproximación y y_c el tirante crítico a la entrada.

- Este gasto se sustituye en la siguiente ecuación para obtener una nueva velocidad

$$V' = \frac{Q_2}{\pi (r^2 - r_0^2)}$$

- Para el incremento Δc requerido se utiliza la expresión

$$\Delta c = \frac{V r_0^2 \Delta V}{c}$$

donde V es la velocidad en la iteración anterior y $\Delta V = V' - V$

- El nuevo valor de c es

$$c = c + \Delta c$$

el cual se utiliza para reiniciar la secuencia de cálculo desde el segundo paso hasta alcanzar la precisión deseada.

2.3 Flujo en la lumbrera

La cámara espiral produce un flujo casi horizontal a la lumbrera, en la cual, el componente horizontal de la velocidad disminuye debido a la fricción con las paredes, mientras que el vertical aumenta con la caída.

El flujo en la lumbrera es de tipo espiral o vórtice lo que permite su adherencia a la pared. En un principio se pensó que esta adherencia era provocada sólo por la fuerza centrífuga e incluso se construyeron lumbreras con muros guía que ayudaran a darle dicho movimiento al agua. Sin embargo, ahora se sabe que la presión atmosférica y el mismo flujo de aire en la lumbrera ayudan también a mantener esta adherencia. La adherencia también es función de la rugosidad de la pared y disminuye conforme esta última aumenta, formándose así una caída libre. Se debe mencionar que a menos que la rugosidad sea grande, no será decisiva para que desaparezca el movimiento helicoidal, aunque sí originará la transformación de energía.

2.3.1 Determinación del diámetro de la lumbrera

Se tratará de determinar el menor diámetro posible que permita cumplir con los requerimientos hidráulicos y con las condiciones de aereación. Esto nos lleva a encontrar la menor relación $\xi = r_0 / r$ posible.

Existe una ecuación sencilla para conocer el diámetro en función del gasto máximo de descarga, de la altura de caída y de una constante adimensional h , determinada experimentalmente a partir de los distintos métodos existentes para calcular el gasto (Ref. 1). Sin embargo, los valores de h son muy variados y poco confiables, por lo que la expresión arroja resultados incorrectos. De ahí que se recomiende utilizar el método de diseño de cámaras espirales propuesto por el Instituto de Ingeniería.

Se debe de tomar en cuenta que la lumbrera es una estructura de concreto, formada por la unión de varios tubos prefabricados, por lo que se recomienda escoger un diámetro comercial.

2.3.2 Determinación de la velocidad media

Steffan encontró la velocidad media que tiene el flujo a una cierta profundidad en la lumbrera (Ref. 19). La expresión deducida por este investigador fue desarrollada mediante las ecuaciones de continuidad y de energía establecidas en dos secciones cualesquiera de la lumbrera. La ecuación resultante es la siguiente

$$dz = \frac{1}{\psi} \frac{d\phi}{(1-\phi^{3/2})}$$

que al integrarse queda

$$z\psi = \frac{1}{3} \ln \frac{1+\sqrt{\phi}+\phi}{1-2\sqrt{\phi}+\phi} - \frac{2}{\sqrt{3}} \arctan \left(\frac{2\sqrt{\phi}+1}{3} \right) + c$$

siendo

$$\psi^{3/2} = \frac{f\pi D\sqrt{2g}}{4Q} \quad y \quad \phi = \frac{V^2}{2g}\psi$$

donde z es la altura entre las dos secciones consideradas (en m), ψ y ϕ son constantes de integración, f es el factor de fricción de Darcy, D el diámetro de la lumbrera (en m), V la velocidad media del flujo en la lumbrera (en m/s) y Q el gasto total de descarga (en m^3/s).

En la referencia 1 se presentan expresiones más simples para casos particulares, que permiten determinar la velocidad al sustituir condiciones de frontera. El más común de estos casos ocurre cuando a lo largo de la lumbrera existe un flujo uniformemente acelerado con una velocidad inicial nula que se incrementa a lo largo de la caída, presentándose así las siguientes condiciones de frontera: $\phi_0 = 0$ y $0 < \phi < 1$.

En este caso, la integral definida propuesta por Steffan resulta

$$\int_z^{z_0} dz = \frac{1}{\psi} \int_0^\phi \frac{d\phi}{(1-\phi^{3/2})}$$

que al integrar queda

$$(z - z_0)\psi = \frac{1}{3} \ln \left(\frac{1+\sqrt{\phi}+\phi}{1-2\sqrt{\phi}+\phi} \right) - \frac{2}{\sqrt{3}} \arctan \left(\frac{2\sqrt{\phi}+1}{3} \right) + 0.605$$

La figura 2.7 muestra la gráfica de la función $I = \int_0^{\phi} \frac{d\phi}{(1-\phi^{3/2})}$ contra ϕ , por tanto,

de la figura se tiene que $I = (z_0 - z) \phi$ en la que $z_0 - z$ representa la distancia entre la sección 0-0 y otra sección cualquiera.

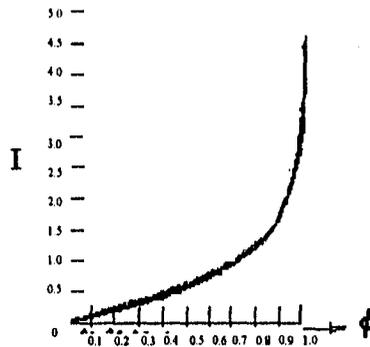


Figura 2.7.- Gráfica de la función $I = \int_0^{\phi} \frac{d\phi}{(1-\phi^{3/2})}$ vs. ϕ para la determinación de la velocidad media

2.4 Disipación al pie de la lumbrera

2.4.1 Energía excedente al pie de la lumbrera

El flujo en las cámaras espirales pierde mucha energía al rozar con las paredes. Sin embargo, una pequeña parte de esta energía no se disipa, y debe ser eliminada para que el flujo circule correctamente dentro de un canal a superficie libre o a una galería a presión. Esta energía se disipa en las distintas estructuras de descarga que se mencionaron en la introducción de este trabajo.

La expresión que se presenta a continuación permite calcular la relación entre la energía potencial cedida en la lumbrera y la energía potencial total. (Ref. 1)

$$\eta = \frac{\frac{\phi_0}{\psi} + z_0 - z - \frac{\phi}{\psi}}{\frac{\phi_0}{\psi} + z_0 - z}$$

en la que η es la relación entre la energía potencial cedida en la lumbrera y la energía potencial total, ψ y ϕ constantes de integración obtenidas previamente en el cálculo de la velocidad media en la lumbrera y $z - z_0$ la distancia entre la sección 0-0 y otra sección cualquiera.

A partir de ésta, se puede obtener la energía excedente al pie de la lumbrera como $1 - \eta$.

La referencia 1 presenta una ecuación simplificada para el caso en que $\phi_0 = 0$.

2.4.2 Cálculo de f (factor de fricción de Darcy)

El factor f se mantendrá constante mientras el flujo permanezca adherido a las paredes de la lumbrera. Si el flujo llegara a separarse, se presentarán zonas con variaciones grandes de velocidad y quizá una caída libre. En cualquiera de estos dos casos, f dejará de ser constante.

Para la estimación de f se utiliza el diagrama de Moody o la ecuación de Colebrook-White.

2.4.3 Fórmulas empíricas para calcular el flujo de aire en la lumbrera.

De acuerdo con Viparelli, cuando hay una descarga libre del chorro hacia aguas abajo de la lumbrera y existe un núcleo de aire pequeño, se utiliza la siguiente expresión para el cálculo del aire arrastrado

$$\frac{Q + Q_a}{Q_m} = \sqrt{\frac{Q}{Q_m}}$$

donde Q_m es el gasto de agua para un llenado total en la lumbrera, Q_a el gasto de aire arrastrado y Q el gasto descargado. El valor de Q_m se obtiene de la expresión siguiente

$$\frac{V^2}{2g} \left(1 + f \frac{l}{2r} \right) = \frac{Q_m^2}{2gr^4 \pi^2} \left(1 + \frac{l}{2r} \right)$$

donde f es el factor de fricción de Darcy.

Cuando el gasto real entrante es considerablemente más pequeño que el gasto de agua para un llenado total de la lumbrera y por tanto existe un flujo de aire considerable, Viparelli propone la siguiente expresión

$$\frac{Q_a}{Q_{a \text{ lim}}} = 0.04 \sqrt[3]{\frac{\ell^2}{D^2}}$$

en la que

$$Q_{a \text{ lim}} = r^2 \sqrt[5]{\frac{1}{n^3} \sqrt{\frac{Q}{\pi D}}} - Q$$

donde ℓ es la longitud del tubo y n el coeficiente de Manning.

En esta ecuación se supone que la velocidad del aire es igual a la del agua descargada.

Cuando en el tramo de aguas abajo de la lumbrera se tiene una transición a tubo lleno y la cantidad de aire arrastrada es de 1/4 a 1/5 del gasto de aire que se tendría si esta transición no existiera, la ecuación que se aplica resulta

$$\frac{Q_a}{Q} = 0.022 \sqrt[3]{\frac{h^3}{D^3}}$$

donde h es la longitud de la lumbrera en la que no se presenta caída libre.

En este caso también se puede utilizar la expresión propuesta por F.M. Dawson y A. Kalinske, que es

$$Q_a = V_a \left(\pi r^2 - \frac{Q}{V} \right)$$

donde V_a es la velocidad media del flujo de aire.

3. LUMBRERAS DE RANURA VERTICAL

3.1 Estructuras vórtice de ranura vertical: Modelo de Quick

3.1.1 Descripción

Las condiciones de flujo y análisis de esta estructura son bastante diferentes a las de caída con muro guía espiral. Sin embargo, las relaciones carga-gasto de ambas son muy similares, así como el núcleo de aire estable que se produce en las dos estructuras. Algunas de las ventajas que proporciona la nueva estructura sobre la de muro guía espiral son la facilidad para construirlas y su reducido tamaño, que la hacen especialmente adecuada para instalaciones subterráneas.

La lumbrera consiste en un tubo vertical con una ranura rectangular a 90° practicada en su extremo superior; con un muro guía vertical que conduce el flujo de aproximación hasta la ranura. Ver figs. 1.3 y 3.1.

El flujo que se presenta es bastante similar al de un vertedor, sólo que en este caso se ve influenciado por el mismo flujo que gira en espiral, chocando con la pared en el lado que ingresa el chorro. Este flujo de retroalimentación (Fig. 3.1) reduce el flujo total a través de la ranura por el incremento de presión en el sitio de unión y por la reducción de la velocidad debida a la compartición del momentum al juntarse el chorro primario de la ranura y el secundario de retroalimentación.

La sección crítica en este tipo de estructuras se presenta cerca de la entrada a la lumbrera, lo que limita el gasto de entrada y previene las oscilaciones en masa.

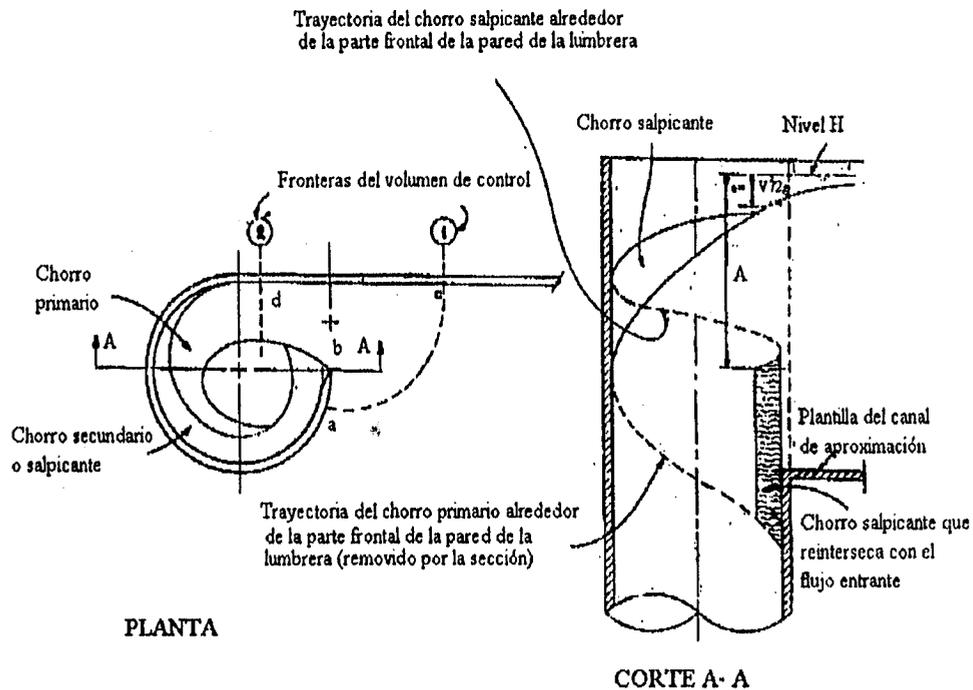


Figura 3.1.-Planta y corte de la lumbrera de ranura vertical

3.1.2 Análisis del flujo en la lumbrera (fig. 3.1) (Ref. 3)

Al hacer el análisis de momentum para el flujo del vertedor puro (sin flujo retornante) en el volumen de control limitado por las secciones 1 y 2, se observa que el momentum en la sección 1 más la fuerza debida a la pared ab, más los esfuerzos cortantes en dirección del momentum considerado sobre cd es igual al flujo de momentum en la sección 2 expresado por $\rho Q_0 V_0$, donde ρ es la densidad del agua, Q_0 el gasto normal del vertedor rectangular y V_0 la velocidad media de dicho flujo.

Cuando existe chorro de retroalimentación incidiendo sobre el flujo principal, la ecuación de momentum en la dirección del flujo principal se convierte en

$$\rho Q_0 V_0 = \int_c^A \rho q_m V dh + \int_A^H \rho (q_m + q_s) V dh + \int_0^{H-A} \rho q_s V_s dh \quad (3.1)$$

donde ρ, Q_0, V_0 son condiciones en la sección 1 que permanecen prácticamente constantes, ρ la densidad del agua, q_m el gasto por unidad de tirante entrando desde el flujo de aproximación, V la velocidad media en la sección 2, q_s el gasto por unidad de tirante del chorro lateral retornante, V_s la velocidad media del flujo retornante, A el tirante en el punto de intersección del chorro, e la carga de velocidad de aproximación $V_0 / 2g$ y H la energía total del flujo de aproximación.

Desglosando cada término de la integral, se tiene

$\int_c^A \rho q_m V dh$ representa el flujo de momentum por arriba del nivel principal

$\int_A^H \rho (q_m + q_s) V dh$ es el momentum combinado de los flujos del chorro principal y lateral.

Se supone que el chorro lateral se mezcla con el principal y sus momenta se comparten en el proceso.

$\int_0^{H-A} \rho q_s V_s dh$ representa la fuerza ejercida por el chorro lateral sobre el principal en la

dirección del flujo. Aquí se supone que aunque la velocidad del chorro lateral en el sitio de impacto con el chorro principal se reduce a cero, el momentum que se produciría con la velocidad original del chorro lateral ($\rho Q_s V_s$) es sustituido por una presión omnidireccional de igual valor que el momentum.

Integrando el primer término de la ecuación 3.1, se obtiene

$$\rho Q_0 V_0 = \int_0^H \rho C_D \frac{D}{2} \sqrt{2gh} \sqrt{2gh} dh$$

donde $V_0 = \sqrt{2gh}$, $Q_0 = V_0 A_0$ y C_D es el coeficiente de descarga

Incluyendo e en el coeficiente de descarga, se tiene:

$$\rho Q_0 V_0 = \int_0^H \rho C_D \frac{D}{2} \sqrt{2gh} \sqrt{2gh} dh = \rho C_D g \frac{D}{2} H^2 \quad (3.2)$$

donde h es la profundidad de un punto abajo de la línea de energía y D el diámetro de la lumbrera de caída.

Integrando de manera similar los sumandos del segundo término de la ecuación 3.1, resulta

$$\int_0^A \rho q_m V dh = \rho C_D \frac{D}{2} g A^2 \quad (3.3)$$

$$\int_0^H \rho (q_m + q_s) V dh = \rho C_D \frac{D}{2} k^2 g (H^2 - A^2) \quad (3.4)$$

donde k es un factor constante de reducción de la velocidad, que se deriva de suponer la unión de los chorros principal y lateral en uno de menor gasto e igual sección transversal.

$$\int_0^{H-A} \rho q_s V_s dh = \rho C_D \frac{D}{2} \alpha g (H - A)^2 \quad (3.5)$$

donde α es un factor de reducción derivado del hecho de que el gasto lateral es sólo parte del flujo entrante.

Al sustituir las ecuaciones 3.2 a 3.5 en la 3.1, se obtiene una expresión que permite calcular el factor k cuando A , H y α son conocidos. La ecuación es la siguiente

$$k^2 (H^2 - A^2) + (1 + \alpha) A^2 - 2 \alpha A H - (1 - \alpha) H^2 = 0 \quad (3.6)$$

3.1.3 Cálculo del gasto total

El gasto total se define por el flujo de aproximación δq_m y la parte del chorro salpicante que regresa al flujo de aproximación (flujo retornante) δq_s . Es decir

$$Q_T = \int_0^A \delta q_s + \int_A^H \delta q_m \quad (3.7)$$

Abajo de la intersección del chorro salpicante con el principal, el chorro principal ocupa la fracción $1-f$ y el retornante, la f . Ver fig. 3.2.

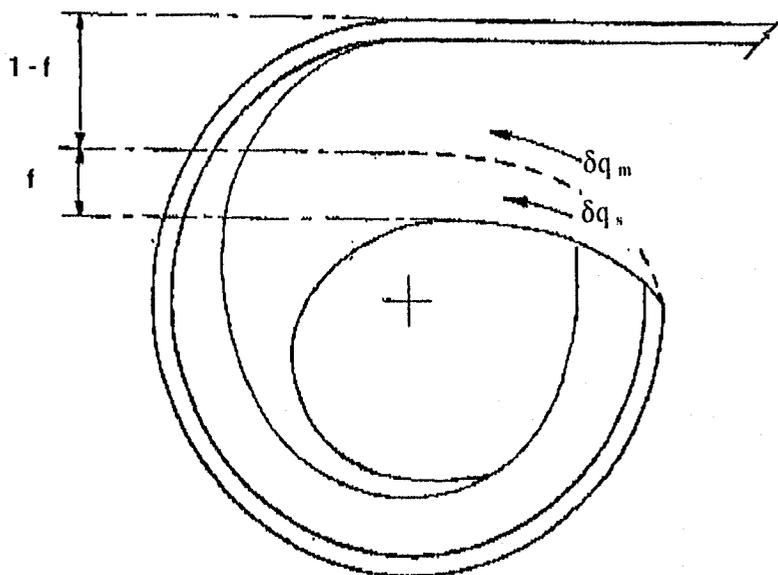


Figura 3.2.- Definición de las fracciones de chorro principal y lateral para el cálculo del factor f

Así pues, el chorro retornante en esta sección se define con alguna de las siguientes expresiones

$$dq_s = C_D \frac{D}{2} \alpha \sqrt{2g(h-A)} dh \quad (3.8)$$

$$dq_s = f C_D \frac{D}{2} k \sqrt{2gh} dh \quad (3.9)$$

Al igualar las ecuaciones 3.8 y 3.9 y despejar, resulta

$$f = \frac{a}{k} \sqrt{\frac{h-A}{h}} \quad (3.10)$$

Así mismo, para el chorro de aproximación en esta misma sección horizontal es:

$$\delta q_m = (1-f) C_D \frac{D}{2} k \sqrt{2gh} dh \quad (3.11)$$

Sustituyendo el valor de f en la ecuación 3.11

$$\delta q_m = C_D \frac{D}{2} \left[1 - \frac{\alpha}{k} \sqrt{\frac{h-A}{h}} \right] k \sqrt{2gh} dh \quad (3.12)$$

Arriba del punto A de intersección

$$\delta q_s = C_D \frac{D}{2} \sqrt{2gh} dh \quad (3.13)$$

Sustituyendo las ecuaciones 3.12 y 3.13 en la ecuación 3.7 e integrando se obtiene la ecuación para el gasto total, en la que queda por definir A , k y α en términos del diámetro y de la carga de la lumbrera. Dicha ecuación es

$$Q_T = \frac{2}{3} C_D \frac{D}{2} \sqrt{2g} \left\{ A^{3/2} + k(H^{3/2} - A^{3/2}) - \alpha (H-A)^{3/2} \right\} \quad (3.14)$$

- *Cálculo de α*

El chorro principal entrante a la lumbrera choca con el muro y se divide en un chorro ascendente o de "salpicadura" (Q_u) y uno descendente (Q_d). Ver figura 3.3.

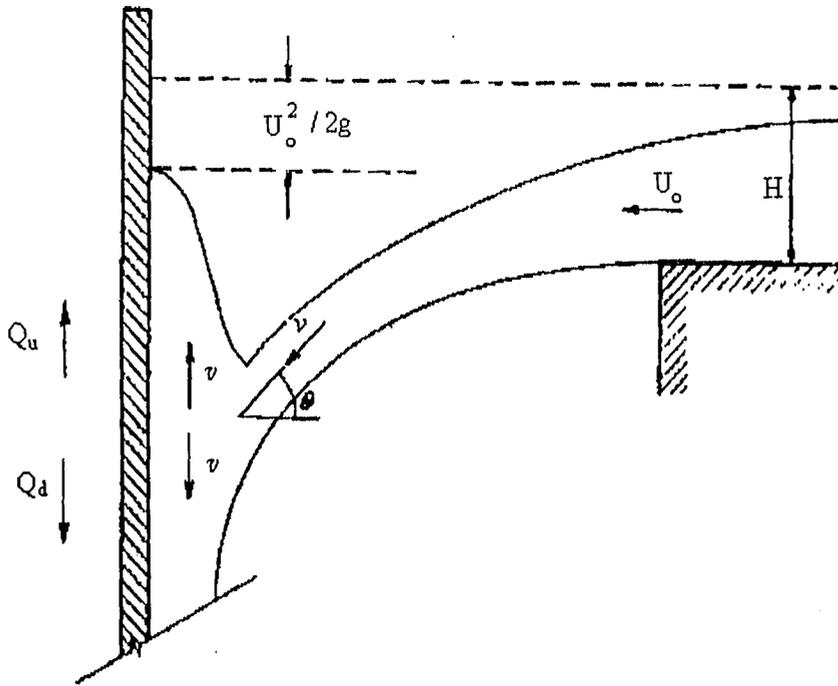


Figura 3.3.- Fracción del chorro salpicante y definición del factor α .

Esto es

$$Q = Q_u + Q_d \quad (3.15)$$

donde Q es el gasto principal entrante

Además, por el momentum vertical en el muro, en la fig. 3.3 se tiene

$$QV \sin \theta = Q_d V - Q_u V \quad (3.16)$$

Al despejar Q_d de las ecuaciones 3.15 y 3.16 e igualarlas, se obtiene la definición de α en la forma

$$\frac{Q_u}{Q} = \frac{1}{2}(1 - \sin \theta) = \alpha \quad (3.17)$$

en la que α es el factor de reducción del gasto para el flujo salpicante.

De las ecuaciones de caída libre (Ref. 3) se tiene

$$\tan \theta = \frac{v}{U_0} = \frac{3}{4} \beta \pi \frac{D}{H} \quad (3.18)$$

donde θ es el ángulo que forma la caída del chorro con la horizontal (fig. 3.3), v la velocidad vertical del chorro en el muro, U_0 la velocidad horizontal del chorro, β la fracción de la circunferencia atravesada por el chorro, D el diámetro de la lumbrera y H la carga en el flujo de aproximación.

Para la geometría considerada consistente en tres cuartos de círculo, β toma un valor aproximado de 0.75.

- *Cálculo del tirante de intersección del chorro A*

El chorro de salpicadura se mueve con una velocidad horizontal U_0 , por lo que la altura máxima de salpicadura se alcanza a un nivel $U_0^2 / 2g$ por debajo del nivel inicial de energía H_0 . Dicha altura se alcanza en el sitio donde el muro frontal es perpendicular a la dirección de incidencia.

Calculando el valor de A como caída libre (Ref. 3), se obtiene

$$A = \frac{3}{2H} \left(\frac{1}{8} \beta^2 \pi^2 D^2 \right) \quad (3.19)$$

En resumen, con las ecuaciones 3.19, 3.17 y 3.6 se pueden conocer respectivamente A, α y k para sustituirlas en la ecuación 3.14 y obtener el gasto total en la estructura.

3.1.4 Funcionalidad del método propuesto por Quick

Como se puede ver, el desarrollo de Quick para lumbreras de ranura es un tanto teórico. De hecho, aún no se logra comprender la deducción del mismo. Por otro lado, los experimentos efectuados por Quick para demostrar la funcionalidad de su teoría fueron escasos y por lo tanto, no representativos. Algunos de éstos se presentan a continuación:

La figura 3.4 muestra la ley de descarga para un vertedor rectangular, es decir, $Q = C_d L H^{3/2}$, donde $C_d = k$ y $L = D/2$. Además se presentan las relaciones carga - gasto teórica y experimental para la estructuras de Quick.

Al interpretar la gráfica se observa que los resultados teóricos y experimentales son prácticamente iguales, con lo que Quick pretende dar validez a su desarrollo teórico. Por otra parte, para cargas pequeñas se ve que la ecuación del vertedor coincide con la de la estructura de caída, lo que se debe, según Quick, a que en este caso no existe influencia del chorro retornante.

Gasto, en m^3/s

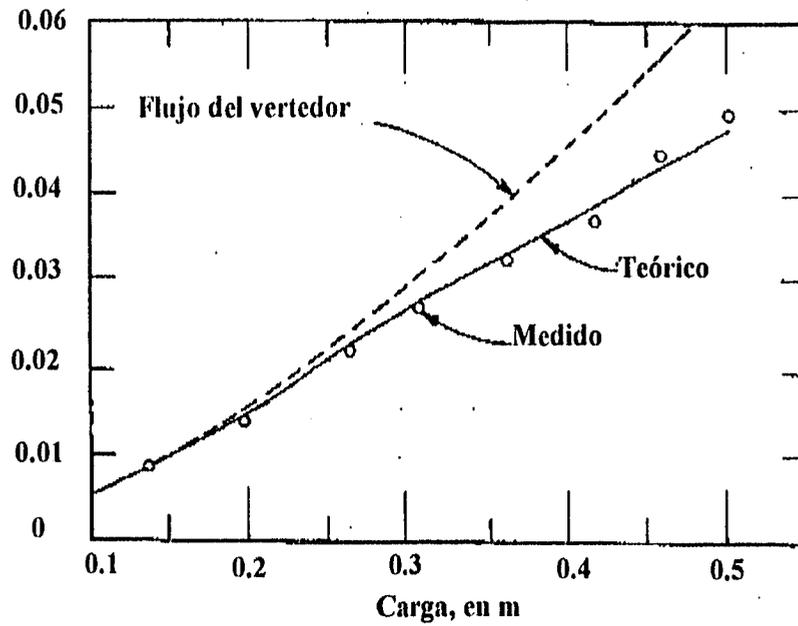


Figura 3.4.- Resultados teóricos y experimentales de carga - gasto para la estructura de ranura vertical

Además, Quick realizó otros experimentos con el fin de comparar la eficiencia de la lumbrera de ranura con la de cámara espiral. Así, obtuvo la figura 3.5, que muestra la similitud de las relaciones carga - gasto para las estructuras con muro guía espiral y para las de ranura vertical.

Gasto, en m³/s

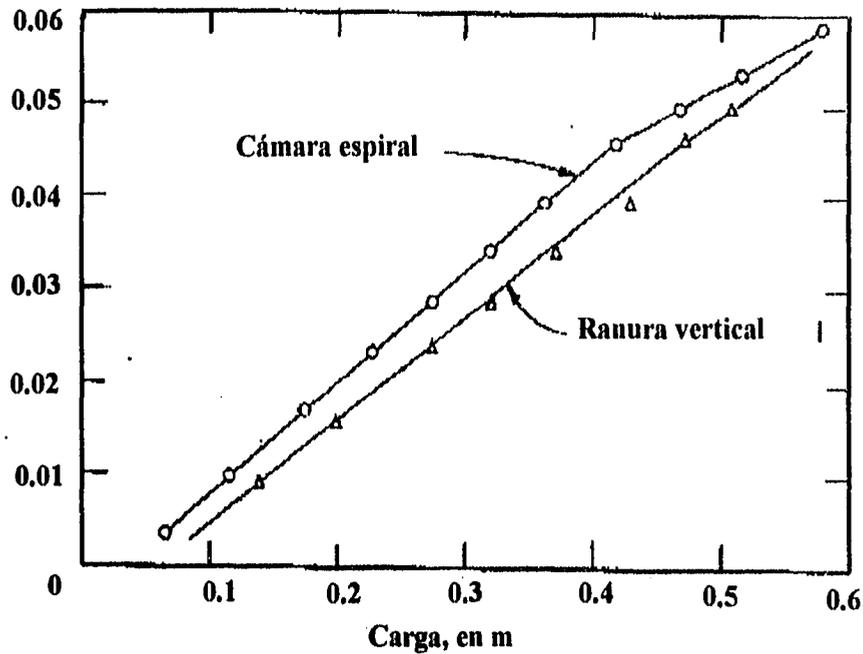


Figura 3.5.- Comparación de los resultados carga - gasto para estructuras de cámara espiral y para las de ranura vertical.

De la misma gráfica, Quick obtuvo una ecuación combinada, tanto para la espiral logarítmica como para la de ranura, que relaciona el gasto con el diámetro y la carga en la lumbrera. La ecuación es

$$Q = 1.12 D^{1.5} H$$

con la que se pueden obtener resultados aproximados.

Así mismo, llegó a otra expresión para escalar estructuras con geometrías similares en diseños preliminares

$$Q_2 = Q_1 \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^{1.5} \frac{H_2}{H_1}$$

Las condiciones de los experimentos realizados para estas estructuras se presentan en la referencia 3.

3.2 Experimentos realizados en México

3.2.1 Condiciones a satisfacer antes de una lumbrera de ranura (Ref. 5)

Aspectos generales

En las captaciones con lumbreras de ranura vertical, el agua se introduce mediante un canal rectangular que es la prolongación de un gran colector superficial, con frecuencia de sección circular.

El gasto que recibe la captación depende de la energía específica que se tiene en dicho colector y por lo tanto también en el canal de aproximación.

La ley que relaciona el gasto de entrada a la ranura con la energía específica en el canal de llamada coincide bastante con la ley obtenida de la teoría del régimen crítico en la sección de la ranura. Por ello, para fines de cálculo se supondrá régimen crítico en la misma.

La descarga en la lumbrera varía de acuerdo al tipo de régimen que se tenga en el canal de aproximación.

En seguida se evalúan las condiciones para cada tipo de flujo, haciendo referencia a las figuras 3.6 y 3.7. En estas figuras Q es el gasto total que desea captarse, b_1 ancho de la sección del canal de llegada antes de la transición, b_3 el ancho de la ranura igual a $D/2$, q_1 el gasto unitario en la sección 1, q_3 el gasto unitario en la sección 3, d_c el tirante crítico y H_c la energía específica mínima.

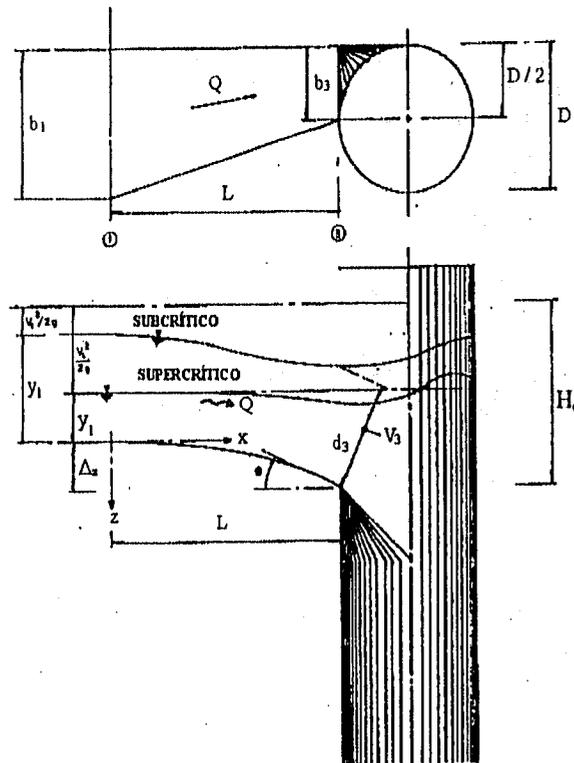


Figura 3.6.-Condiciones a satisfacer antes de la lumbrera de ranura

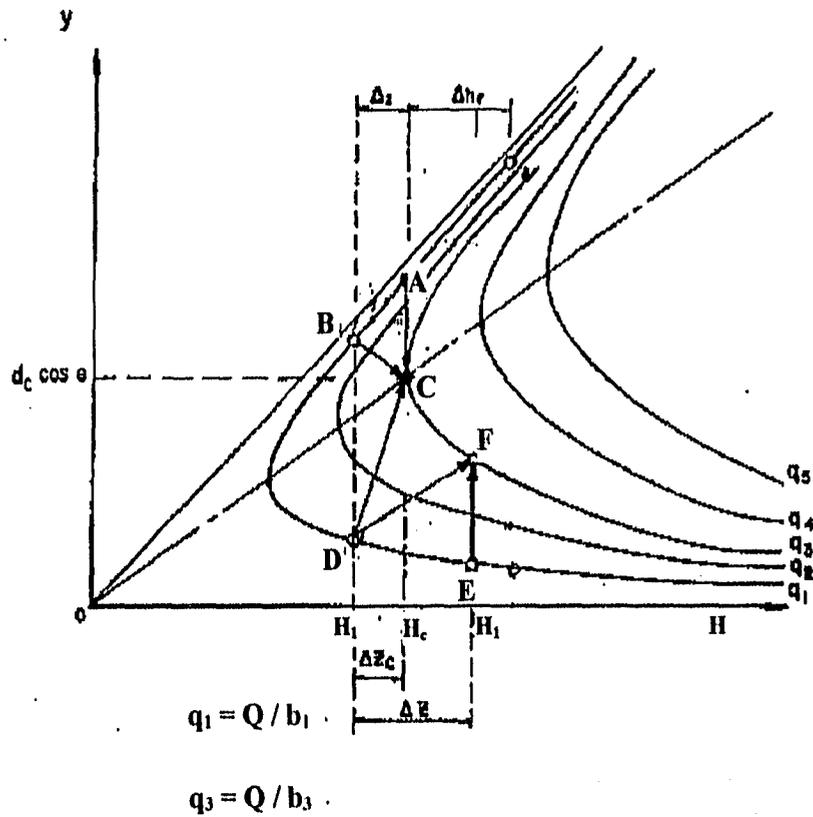


Figura 3.7.-Curva E-y para la lumbrera de ranura

Régimen crítico en la ranura

Al existir régimen crítico en la ranura, se tiene

$$H_c = d_c \cos \theta + \frac{V_c^2}{2g}$$

Además, $b_3 = \frac{D}{2}$, $A_c = \frac{D}{2} d_c$ y $d_c \cos \theta = \frac{2}{3} H_c$

donde H_c es la energía específica crítica, d_c el tirante crítico, V_c la velocidad crítica, θ el ángulo de la plantilla con la horizontal, D el diámetro de la lumbrera adosada y A_c el área de la sección transversal en la ranura.

Al sustituir las segundas expresiones en la primera y aplicando la ecuación de continuidad se obtiene la ley de gastos contra energía específica para la ranura, la cual suele cambiar por la interferencia del chorro retornante. La ecuación es la siguiente:

$$\frac{H_c}{D} = \left[\sqrt{\frac{27}{2}} \frac{Q}{\sqrt{g} D^{5/2}} \cos \theta \right]^{2/3} \quad (3.20)$$

Régimen subcrítico en el canal aguas arriba

De acuerdo con las figuras anteriores, en la sección 3 se presenta la energía mínima o sección crítica de control, por lo que el cálculo del perfil del agua se hará desde esta sección hacia aguas arriba y la energía específica irá aumentando debido a las pérdidas.

El aumento de energía específica en la sección 1 podrá provocar ahogamientos en las cajas de control, en los colectores madrina o en los colectores menores. De ahí que se recomiende un desnivel descendente, Δz , entre las secciones 1 y 3, que se podrá obtener con la siguiente expresión

$$H_1 = H_3 - \Delta z$$

donde H_1 es la energía específica en la sección 1, H_3 la energía específica en la sección 3 (energía crítica) y Δz la altura del escalón descendente.

Adicionalmente habría que añadir a la energía específica de la sección 1 las pérdidas por fricción (casi despreciables) y las de conversión.

Régimen supercrítico en el canal de aguas arriba

En este caso, menos frecuente, la sección 1 será la sección de control, pudiéndose presentar dos casos:

- a. Las condiciones de flujo en el canal aguas arriba quedan representadas por el punto D (fig. 3.7), siendo la energía específica en la sección 1 menor que la crítica ($H_1 \leq H_c$). En este caso se presentará un salto hidráulico que puede ser evitado al hacer un escalón descendente, Δz , entre las secciones 1 y 3, de manera que $\Delta z > \Delta z_c$, donde $\Delta z_c = H_c - H_1$. Con esto se cambiará del punto D al F (fig. 3.7), permaneciendo un régimen supercrítico, muy cercano al crítico.
- b. Las condiciones de flujo quedan representadas por el punto E (fig. 3.7), siendo la energía específica en la sección 1 mayor que la crítica ($H_1 > H_c$), por lo que no hay peligro de salto hidráulico. Así pues, se presenta únicamente una transición en el ancho del canal, en la que la energía específica permanece constante.

3.2.2 Modificaciones a la estructura propuesta por Quick

Con el afán de encontrar una estructura hidráulicamente óptima que resolviera el problema de la conducción del agua al sistema de drenaje profundo de la Ciudad de México, la D.G.C.O.H. adoptó el diseño propuesto por Quick y realizó los estudios y experimentos necesarios para conocer el funcionamiento de esta estructura y adaptarla a las condiciones particulares de cada problema que se presenta en la práctica; en especial, a los del sistema de drenaje profundo. Por otro lado se requería un método eficaz y rápido para diseñar las estructuras, ya que el propuesto por Quick requiere de cálculos laboriosos. Es así que la D.G.C.O.H. decidió modificar adecuadamente la estructura propuesta por Quick y desarrolló un programa experimental para cubrir el mayor número de casos que pudiesen presentarse en una captación.

Los experimentos desarrollados para estos fines se llevaron a cabo en el Laboratorio de Xotepingo de la D.G.C.O.H.

Una primera etapa (Ref. 4) se efectuó para conocer las condiciones de flujo, bajo diferentes condiciones que se presentaban en el canal de aproximación de la nueva estructura, y para demostrar que las condiciones de funcionamiento y eficiencia de la misma eran similares o mejores a las de la cámara espiral.

Para iniciar los experimentos se agregó a la estructura original de Quick un segundo muro guía paralelo al primero, formando así un canal rectangular de ancho b que se adaptara a las necesidades del flujo de aproximación de un colector (figuras 3.8 y 3.9).

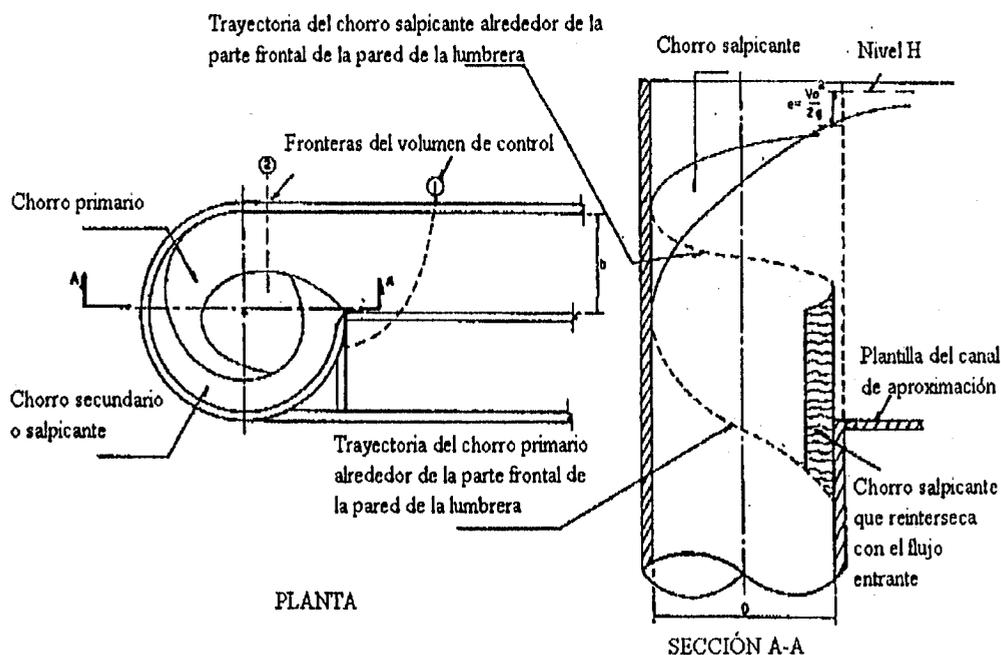


Figura 3.8.- Planta y elevación de la lumbrera vórtice de ranura vertical modificada por la D.G.C.O.H.

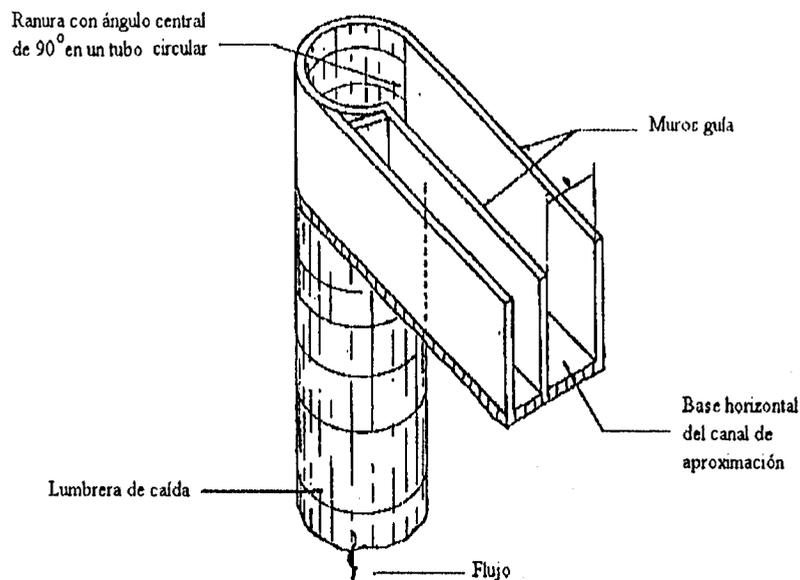


Figura 3.9.-Isométrico de la lumbrera vórtice de ranura vertical modificada por la D.G.C.O.H.

Características del modelo hidráulico utilizado

Se diseñó un modelo que tuviera versatilidad para simular diferentes dimensiones (fig. 3.10). La lumbrera adosada se simuló con un tubo de lucita de 9.56 cm de diámetro interior. El corte hecho en el tubo para representar la ranura vertical se hizo desde la plantilla del canal de aproximación hasta su bordo superior, con una altura total de 30cm. El canal de aproximación se construyó de lucita con una altura en sus paredes de 30cm; una pared se construyó fija (muro guía) y la otra adoptó posiciones variables que permitieron cambiar el ancho del canal desde 4.78 cm hasta 25 cm. Al canal se le dió una pendiente cero. La altura total de la lumbrera fue de 1.48 m. En su extremo inferior se instaló un conducto corto para dirigir la descarga al tunel (fig. 1.6), con un diámetro tal que impidiera la formación de carga sobre la lumbrera para gastos pequeños y permitiera la formación de un colchón disipador de energía para gastos grandes.

$$\begin{aligned}
 b &= 0.305 \text{ m} \\
 w &= 0.335 \text{ m} \\
 k &= 0.250 \\
 a &= 0.160 \text{ m}
 \end{aligned}$$

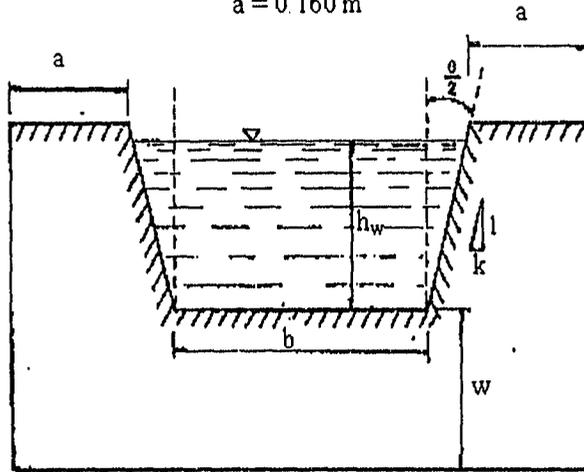


Figura 3.11.- Vertedor Cipolletti utilizado en el modelo de la primera etapa de experimentación

Los tirantes para determinar las cargas y los perfiles fueron medidos con limnímetros de punta.

Se consideró la posibilidad de que la ranura vertical pudiera ser usada como controladora de gasto, por lo que se previó la posibilidad de instalar sobre ella una compuerta plana (simulada con una placa de lucita).

Adicionalmente, se definieron algunos parámetros adimensionales importantes, característicos de los fenómenos que se estudiaron, para así establecer una relación entre las variables medidas y las buscadas.

Experimentos realizados

Para todos los experimentos realizados, el régimen en el canal fue subcrítico, efectuándose los siguientes experimentos:

- a. Para una pendiente en el canal de aproximación $S_0 = 0$, un ancho de canal $b = 25 \text{ cm}$, una relación $b/D = 2.61$ (donde $D =$ diámetro de la lumbrera), sin compuerta en la ranura de la lumbrera y con una abertura pequeña en la válvula de alimentación al dispositivo, se midió la carga sobre el vertedor, el gasto y el tirante en el canal a una distancia de $3 D$ de la ranura. El procedimiento se repitió para gastos mayores hasta la capacidad máxima del canal.

b. Se hicieron pruebas semejantes a las descritas en el inciso a. , pero con diversas aberturas de la compuerta instalada en la ranura, que permitieran pasar el 75%, 50% y 25% del gasto máximo.

Se ensayó sin compuerta para otros anchos del canal de aproximación: 12.5, 9.56, y 4.78 cm. Adicionalmente, se obtuvieron los perfiles hidráulicos para $b = 4.78$ cm y gastos diversos.

Resultados obtenidos

Los resultados obtenidos para cada uno de estos experimentos se pueden ver en el anexo C de la referencia 4.

La figura 3.1 del anexo A resume, de manera adimensional, las gráficas obtenidas en los experimentos anteriores. En ella se puede observar lo siguiente:

- La relación $\frac{H}{D}$ vs. $\frac{Q}{\sqrt{g} D^{2.5}}$ es casi lineal para régimen subcrítico, el cual incluye las pruebas sin compuertas.
- El ancho del canal y la relación b / D tienen poca influencia en la capacidad de las lumbreras.
- Para $b / D = 0.5$ y para $H / D < 1.7$, la capacidad de la estructura disminuye. La mejor eficiencia, sin compuertas, en el rango $H / D < 1.7$, se logró para la relación $b / D = 2.61$. Para $H / D > 1.7$, la mayor capacidad de la lumbrera se obtuvo para $b / D = 0.5$.
- La linealidad de la relación se pierde al introducir una compuerta. Físicamente, esto se refleja en una disminución de la capacidad de la lumbrera, que se agudiza entre menor sea la abertura de la compuerta.

La figura 3.2 del anexo A representa los perfiles de flujo para $b / D = 0.5$, $S_0 = 0$ y sin compuerta y se puede ver que para gastos mayores a 4.94 l / s se presenta un salto hidráulico incipiente cerca de la ranura.

En la figura 3.3 del anexo A se hace la comparación entre las estructuras de cámara espiral propuestas por Hager, las de cámara espiral propuestas por Quick, las de ranura determinadas por Quick y las de ranura experimentadas en Xotepingo. Se ve que de todas, las primeras son las más eficientes. Las de ranura de Quick, y las de Xotepingo son muy parecidas, excepto para $H / D > 1.5$, rango en el que estas últimas presentan mayor capacidad, lo que se refleja en una ventaja para dichas estructuras. También resulta claro que la captación en espiral según Quick es más eficiente que la de ranura de Xotepingo para $H / D < 2.45$; caso contrario se presenta para el rango $H / D > 2.45$.

Método para determinar el diámetro de una lumbrera de ranura vertical

De acuerdo con los resultados obtenidos en los experimentos anteriores se ideó un método iterativo para conocer el diámetro requerido en una lumbrera de ranura vertical. Los pasos a seguir son los siguientes:

- Se conoce la geometría del canal de aproximación: ancho, altura y distancia entre la caja de control y la lumbrera.
- Se determina el tirante máximo y que puede aceptar el canal de acuerdo con su altura.

- Con el gasto de diseño del canal se calcula su carga de velocidad
- Se obtiene la carga en el canal, $H = h + \frac{V^2}{2g}$
- Se obtiene un diámetro inicial de la lumbrera. El diámetro original recomendado es $D = 2b$, donde b es el ancho del canal de llamada.
- Con las relaciones H / D y b / D se entra a la figura 3.1 del anexo A y se obtiene el gasto correspondiente.
- Se repite el procedimiento, proponiendo otros diámetros comerciales para la lumbrera, hasta que el gasto obtenido en la figura 3.1 del anexo A coincida con el de diseño.
- Se verifica que la geometría de la lumbrera sea congruente con el canal de aproximación y las demás estructuras; así como la factibilidad y economía de su construcción.

En una segunda etapa de experimentación (Ref. 5), se hicieron algunas modificaciones al modelo anterior, con el fin de conocer las condiciones de flujo en el canal de aproximación, en la lumbrera de ranura y en los conductos de descarga.

Características del modelo hidráulico utilizado

Para llevar a cabo la segunda etapa de experimentación se usó el modelo e instalaciones de las etapas anteriores, adaptándolas a los requerimientos del programa experimental. Se utilizó el arreglo mostrado en la figura 3.12. En el modelo se usó una transición vertical colocada en la periferia de la lumbrera de caída (fig. 3.13), pues se pensó que podría incrementar la capacidad de captación. Además se instalaron piezómetros en la parte inferior de la lumbrera de caída para la medición de tirantes. El tirante en el canal de aproximación se midió con un limnómetro de punta instalado en la sección de medición (fig. 3.12). Las mediciones anteriores se verificaron con reglas.

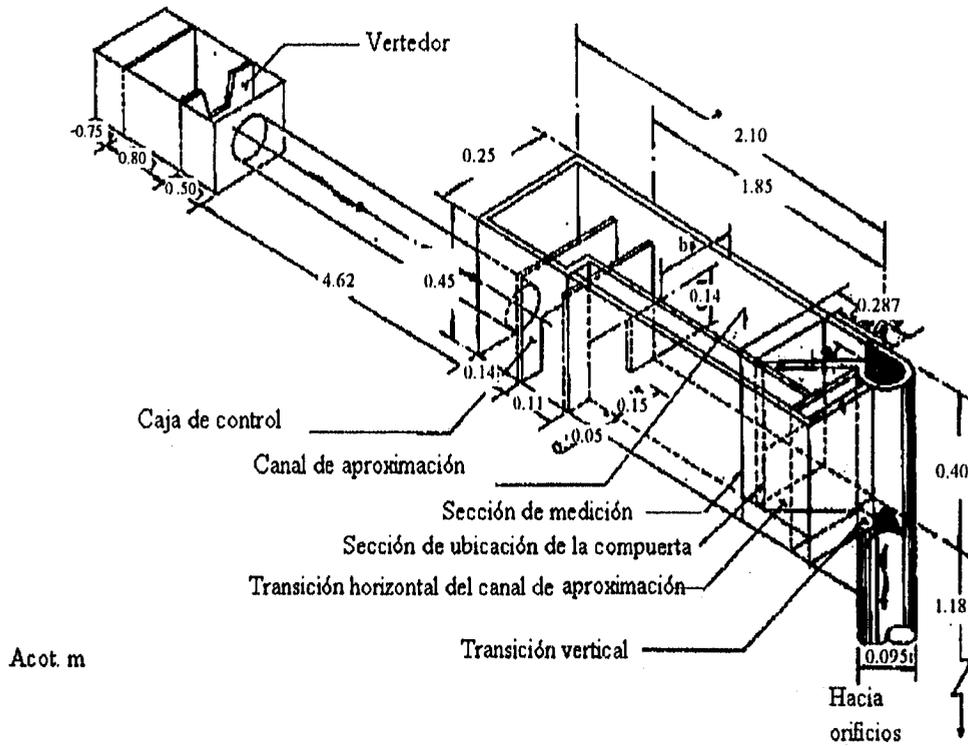
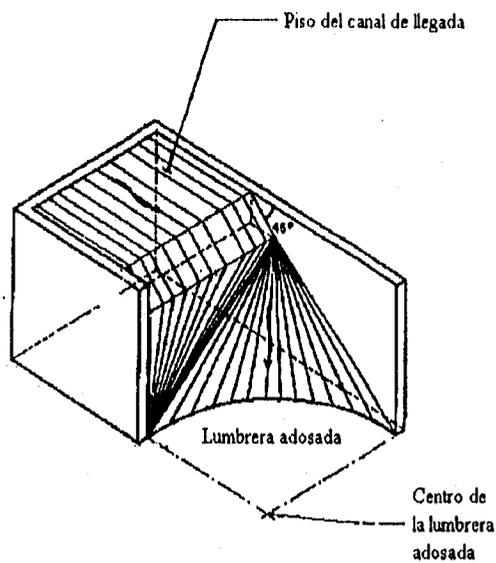


Figura 3.12.-Modelo de la lumbrera de ranura vertical utilizado en la segunda etapa de experimentación



ISOMÉTRICO

Figura 3.13.- Transición vertical empleada en la segunda etapa de experimentación

Experimentos realizados y resultados obtenidos

El programa experimental consistió de:

a. Estudio de distintas transiciones horizontales para conectar el canal de aproximación con la ranura:

Utilizando el modelo de la figura 3.12 sin compuerta, se midieron los tirantes en la sección indicada para distintos gastos, distintas relaciones b/D y diversos θ (ángulo entre el eje del canal y el muro de la transición horizontal). El objetivo de este estudio fue el determinar la capacidad de la lumbrera para diferentes transiciones. Se llevaron a cabo los siguientes experimentos específicos:

- Para $b = D$, transición vertical como la mostrada en la fig. 3.13, pendiente de plantilla $S_0 = 0$, $15^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$, $Q = 8$ l/s (valor intermedio entre los que puede captar la lumbrera). Se observó que las mayores variaciones de tirantes medidos se presentaban en el rango $30^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$, por lo que se decidió experimentar en este rango.
- Para $b = D$, $S_0 = 0$ y $\theta = 45^\circ$, para diferentes gastos con estabilización.
- Para $b = D$, $S_0 = 0$ y $\theta = 30^\circ$, para diferentes gastos con estabilización.
- Para $\theta = 45^\circ$ y 30° ; $b = 1.5D$ y $2D$.

Los resultados obtenidos para cada uno de estos experimentos se pueden ver en el anexo C de la referencia 5.

La figura 3.4 del anexo A resume todas las gráficas de los experimentos anteriores. De dicha figura se concluyeron las siguientes aseveraciones:

- Para $1 \leq b/D \leq 2$ y $30^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$ (rango exhibido), la relación $\frac{H}{D}$ vs. $\frac{Q}{\sqrt{g} D^{2.5}}$ varía muy poco, y mientras el flujo del canal de aproximación sea subcrítico, se puede utilizar cualquier relación de éstas sin modificar sustancialmente la capacidad de la lumbrera.
- Se debe utilizar la parte de la gráfica correspondiente a la sección recomendada (a la izquierda del límite superior recomendado) para garantizar que el área transversal del núcleo de aire en el centro de la lumbrera sea cuando menos del 20 % del área transversal de la misma.
- Para valores de $\frac{Q}{\sqrt{g} D^{2.5}} < 0.9$ aproximadamente, los arreglos experimentales presentan capacidades mayores que en el estado crítico, lo que se debe a que a partir de $\frac{Q}{\sqrt{g} D^{2.5}} = 0.9$ el flujo retornante dentro de la lumbrera incide más fuertemente contra el entrante, reduciendo la eficiencia de la estructura.
- El funcionamiento hidráulico y estructural es considerablemente mejor cuando existe una transición horizontal, la cual debe utilizarse a menos que existan impedimentos constructivos.

b. Estudio de los arreglos geométricos de los tubos de descarga en el extremo inferior de la lumbrera al túnel profundo:

Estos estudios se realizaron para $b = D$, $S_0 = 0$, sin compuerta y $\theta = 30^\circ$, con el fin de obtener la relación entre el gasto, el diámetro de la lumbrera vertical, la geometría de descarga y los tirantes en la parte inferior de la lumbrera. Se utilizaron diversos arreglos midiendo los tirantes h_L en el inferior de la lumbrera para diferentes gastos (desde el mínimo hasta el máximo aceptado por el canal de aproximación). Los diámetros utilizados en los conductos de desfogue fueron de $0.53 D$, $0.75 D$, $0.85 D$; donde D es el diámetro de la lumbrera adosada. Los experimentos se hicieron para dos direcciones distintas de los conductos de descarga.

Los arreglos de tubos cortos utilizados se pueden ver en el anexo C de la referencia 5.

También se experimentó para las mismas condiciones que las anteriores pero con dos tubos de descarga: uno variable, de acuerdo a las dimensiones mostradas en la tabla anterior y otro fijo de $0.3D$. Para estos ensayos también se variaron las posiciones de los tubos, tal como se muestra en la ref. 5. La figura 3.5 del anexo A presenta un resumen gráfico de todos los casos. Las figuras 3.6 a 3.10 del anexo A presentan los resultados adimensionales obtenidos para cada caso.

Los resultados experimentales son de gran utilidad para determinar el tirante h_L que se establece para diámetros específicos de la lumbrera adosada y de el (los) tubo(s) de desfogue al túnel profundo, correspondiente al gasto de diseño. A continuación se propone una metodología para determinar h_L , utilizando los resultados experimentales señalados.

Como primer paso es necesario conocer el gasto de diseño de la estructura de captación, el diámetro de la lumbrera adosada, la altura de caída y el diámetro del túnel profundo. La metodología es la siguiente:

- Se propone un diámetro D_0 de orificio o conducto de desfogue, o el equivalente si se trata de varios orificios. Se obtiene con esto la relación D_0/D .
- Se propone un coeficiente de descarga $C_d = 0.6$.
- Se calcula el parámetro adimensional $\frac{C_d D}{D_0}$ y con éste se entra a la gráfica adimensional correspondiente a la geometría de la descarga para obtener h_L/D .
- Con h_L obtenido se calcula un nuevo coeficiente de descarga con la expresión

$$C_d = \frac{4Q}{\pi D_0^2 \sqrt{2gh_L}}$$

- Si el valor de C_d es igual al propuesto, el proceso concluye, y se conoce el valor de h_L . En caso contrario, el proceso se repite desde el paso 3 hasta obtener valores parecidos de C_d que cumplan con la tolerancia establecida.

c. Estudio del comportamiento de la captación con una compuerta deslizante sobre el canal de aproximación:

La compuerta se colocó a una distancia de $2D$ de la ranura vertical, con las siguientes condiciones: $b = D$, $S_0 = 0$, tubos de desfogue de $0.75D$ y $0.3D$ de diámetro interior, transición vertical como la mostrada en la figura 3.11 y $\theta = 30^\circ$. Los experimentos realizados fueron:

- Se fijó la abertura de la compuerta a $1.5D$ y se midieron los tirantes en la sección de medición y en la parte inferior de la lumbrera, para distintos gastos hasta el máximo aceptado por el modelo.
- Se alimentó el modelo con un gasto constante $Q = 3.31$ l/s y se varió la abertura de la compuerta midiendo el tirante h para cada abertura. Lo mismo se hizo para los siguientes gastos: 5.55 l/s, 6.98 l/s, 8.24 l/s y 9.25 l/s.

Los resultados obtenidos se pueden ver en la figura 3.11 del anexo A.

La compuerta permitió reproducir un flujo supercrítico aguas abajo de la misma, antes de la entrada de la ranura. Se pudo observar una superficie inestable del agua ingresante a la ranura, lo que se debe a la velocidad de la misma y a la intersección del flujo entrante con el secundario.

En la figura 3.12 del anexo A se muestra la relación C_d contra y/a para los datos experimentales y para la curva convencional de una compuerta plana rectangular. Se ve que el régimen supercrítico provoca la disminución del coeficiente de descarga, situación que requiere un estudio más extenso.

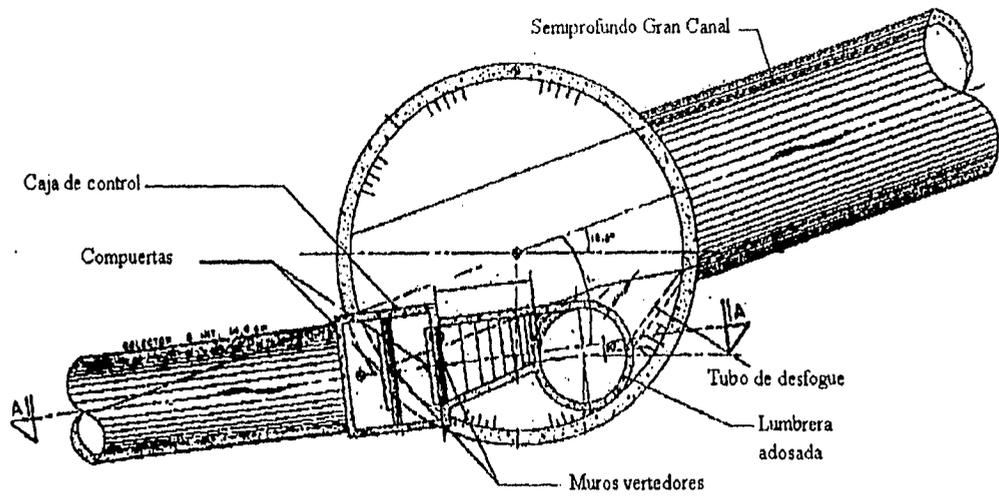
3.3 Aplicaciones del diseño en la ciudad

Además de las etapas de experimentación descritas en el subcapítulo anterior, se llevó a cabo una etapa adicional para verificar el funcionamiento del modelo hidráulico en una captación particular.

3.3.1 Experimentación en el modelo hidráulico de la lumbrera 1 del semiprofundo Gran Canal. Subetapa 1.(Ref. 5)

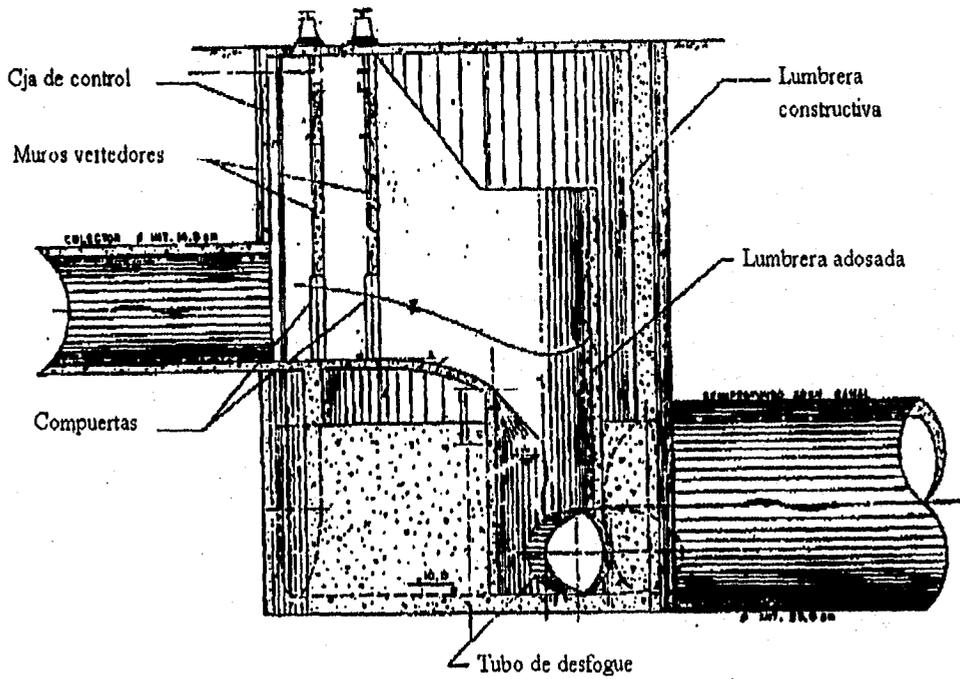
Descripción del modelo utilizado

Con el fin de evaluar el funcionamiento hidráulico de una estructura de caída con ranura vertical, diseñada de acuerdo con los experimentos realizados en Xotepingo, se utilizó el modelo hidráulico reducido de la lumbrera 1 del semiprofundo Gran Canal (figs. 3.14 y 3.15). Esta captación difiere, con respecto a los modelos anteriormente estudiados, en que la altura de caída de la descarga al fondo de la lumbrera es más pequeña, situación que amerita un estudio experimental en el que puedan medirse los tirantes que alcanza el modelo para el gasto máximo. El modelo hidráulico reducido se construyó seleccionando la escala de líneas $l_o = 21.22$.



PLANTA

Figura 3.14.-Planta del modelo de la lumbrera I del semiprofundo Gran Canal.



CORTE A-A

Figura 3.15.-Corte A-A del modelo de la lumbrera I del semiprofundo Gran Canal.

Pruebas realizadas en el modelo

Se establecieron una serie de gastos hasta el máximo admisible y se midieron los tirantes en la caja de control. Ésto se hizo con las compuertas totalmente abiertas; con una abertura en la compuerta a la mitad de la máxima, es decir, 5.90 cm y a un cuarto de la máxima, es decir 2.95 cm, manteniendo la de emergencia totalmente abierta.

Resultados obtenidos

La figura 3.13 del anexo A muestra la comparación entre la curva obtenida en el modelo y la de diseño de la captación, transformada a la escala del modelo. En esta gráfica se ve que el diseño geométrico e hidráulico resultó conforme a lo esperado. Sólo se observa un pequeño desfasamiento entre las curvas debido a la falta de capacidad del tubo de desfogue, lo que provoca un ahogamiento en la descarga de la lumbrera. Así mismo, la diferencia se debe al efecto de las pérdidas que se producen en la descarga de las compuertas. Con base en ésto, se cambió el diámetro del orificio de descarga en el proyecto por otro mayor.

3.3.2 Experimentación en el modelo hidráulico de la lumbrera 1 del semiprofundo Gran Canal. Subetapa 2.(Ref. 6)

Descripción del modelo utilizado

Los experimentos continuaron con el modelo hidráulico reducido de la lumbrera 1 del semiprofundo Gran Canal. Debido a la existencia de este modelo en el laboratorio de Xotepingo, únicamente fue necesario hacerle pequeñas modificaciones para la nueva experimentación.

Pruebas realizadas en el modelo

Se llevaron a cabo las siguientes pruebas:

- Se establecieron una serie de gastos , hasta el máximo admisible. Para cada gasto se midieron los tirantes en la caja de control, en la entrada a la ranura y en el fondo de la lumbrera. Para estas pruebas se mantuvieron las compuertas totalmente abiertas.
- Se realizaron los mismos experimentos pero con la modificación en la transición vertical que se muestra en la figura 3.13.

Resultados obtenidos

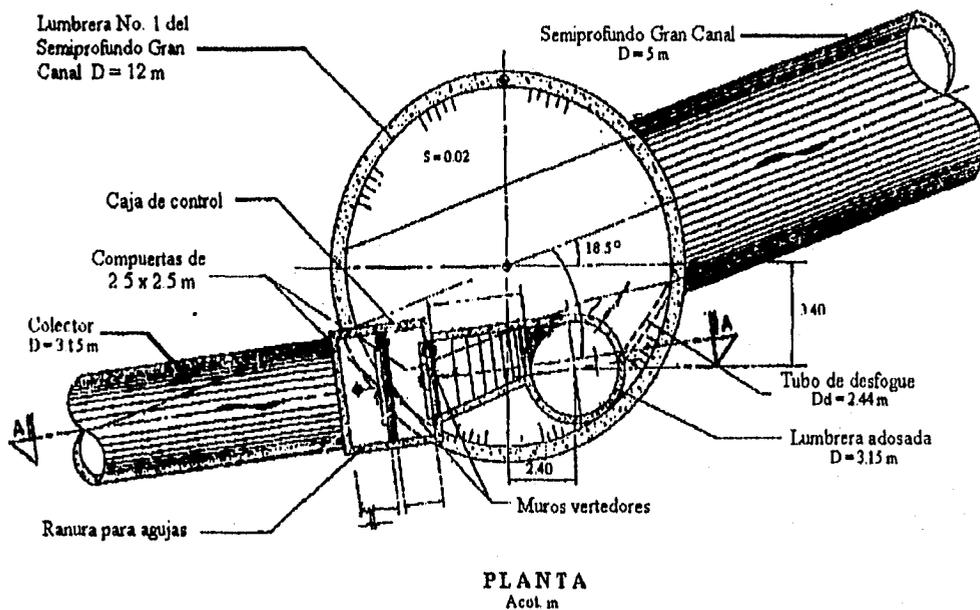
El arreglo de la figura 3.13 no otorga más capacidad que el del arreglo original, pero sí logra que la lámina de agua se adhiera mejor a la lumbrera. Debido a lo anterior, ambos modelos son recomendables.

4. EJEMPLO NUMÉRICO

Con el fin de ilustrar los procedimientos de cálculo para lumbreras de ranura vertical, se revisará el diseño de la Lumbrera 1 del semiprofundo Gran Canal, en el D.F.

Se eligió hacer esta revisión y no el diseño de una captación cualquiera debido a que existen estudios experimentales para esta lumbrera (mismos que se discutieron en el capítulo anterior). Además, se cree que este ejemplo podrá reflejar algunos de los problemas que se tienen en el sistema de drenaje profundo del D.F.

La figura 4.1 muestra las dimensiones de la lumbrera mencionada.



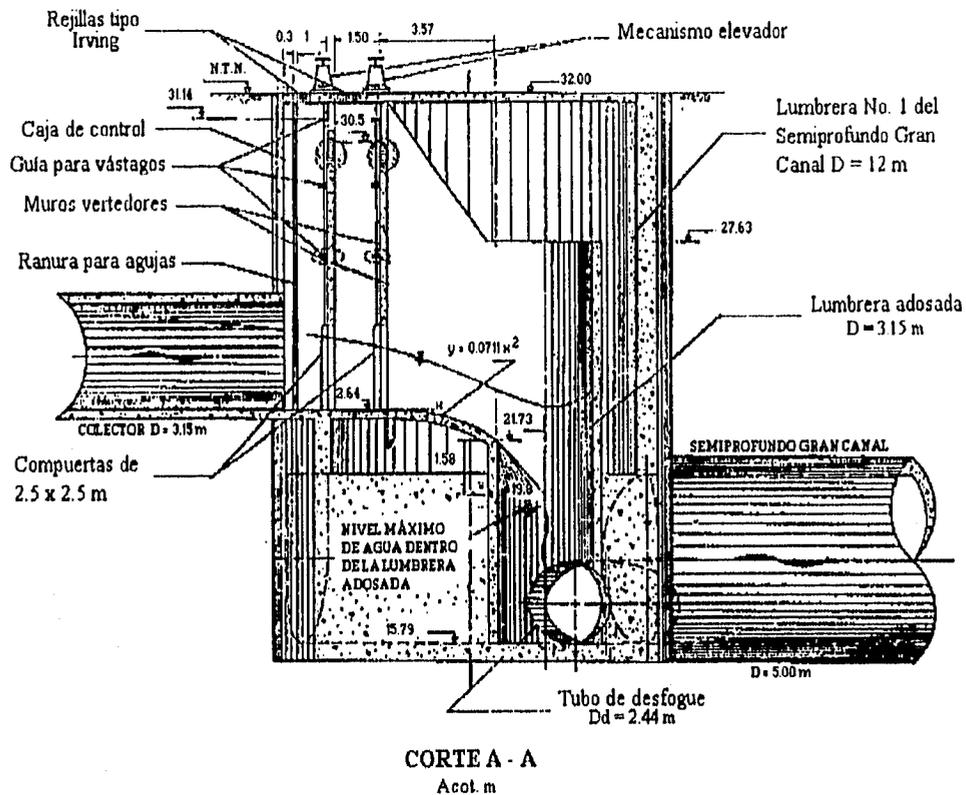


Figura 4.1.- Dimensiones de la Lumbrera 1 del semiprofundo Gran Canal

Algunos de los datos necesarios para efectuar la revisión son los siguientes:

Descripción	Símbología	Dimensión
Gasto de diseño	Q	29 m ³ /s
Coefficiente de Manning	n	0.016
Desnivel del escalón descendente	Δz	0.91 m
Diámetro de la lumbrera adosada	D	3.15 m
Ancho de la caja de control (sección 0)	b_0	3.15 m
Ancho del canal de llamada (sección 1)	b_1	2.5 m
Ancho de la ranura (sección 3)	b_3	1.5 m
Diámetro del conducto de descarga	Dd	2.44 m
Longitud de la lumbrera adosada	L	11.84 m

La revisión del diseño se hará con las compuertas de la caja de control totalmente abiertas y sin compuertas en la ranura. Por lo tanto, se tendrá régimen subcrítico aguas arriba de la ranura.

De los datos anteriores podemos hacer las siguientes observaciones:

- Dado que se desconocía el gasto original de diseño de la lumbrera adosada, se tomó el de la curva experimental de la figura 3.13 del anexo A. En esta curva se observa un cambio brusco a partir de los $29 \text{ m}^3/\text{s}$, lo que indica que para este gasto la capacidad de la lumbrera comienza a ser insuficiente y para ello, este el gasto máximo que acepta.
- El coeficiente de Manning utilizado en la revisión tampoco se conocía. Para este caso, la lumbrera se coló in situ, por lo que las paredes no resultan tan lisas como las de una tubería prefabricada. Por otro lado, se pretende revisar el adecuado funcionamiento de la lumbrera en toda su vida útil y no sólo recién construida. De acuerdo con estos dos factores, se decidió considerar un coeficiente de Manning un poco alto y no el convencional de 0.013 o 0.014 que suele adoptarse.
- El diámetro de la lumbrera adosada no es comercial, lo cual se contrapone con las recomendaciones señaladas en este trabajo. Sin embargo, en este caso la magnitud del flujo de agua descargado llevó a utilizar una lumbrera de diámetro mayor al máximo comercial (2.54 m).
- El ancho de la ranura es aproximadamente de la mitad del diámetro de la lumbrera, por lo que se cumple con lo especificado en inciso 3.2.1 de este trabajo.
- La lumbrera adosada es muy corta, por lo que probablemente se tengan problemas con la disipación y la descarga.

En el sistema de drenaje profundo del D.F. es muy común que se desconozca la capacidad que deben tener las lumbreras adosadas, principalmente porque existe gran incertidumbre en los métodos de predicción del gasto que entra al sistema. Entre el colector y el canal de llamada se tienen cajas de control con compuertas y mamparas que regulan la entrada del gasto. En general, en épocas de estiaje las compuertas permanecen cerradas y el colector superior almacena el agua, es decir, el sistema de drenaje profundo no se utiliza. Arriba de las compuertas existen mamparas con muretes en su parte superior. Estos últimos se ponen o se quitan dependiendo del flujo proveniente del colector. Así, si se llega a presentar alguna tormenta que exceda la capacidad del colector, el agua vierte por encima de las mamparas en el espacio localizado entre éstas y la losa de techo de la captación. En casos extremos se abren las compuertas y se utiliza el drenaje profundo. El hecho de que los colectores sirvan como almacenadores de agua y que se mantengan prácticamente a su máxima capacidad provoca también, cuando se presentan las tormentas, la salida del agua por las alcantarillas. En época de lluvias las compuertas se mantienen abiertas y es entonces cuando se hace uso de la máxima capacidad de la lumbrera adosada. En sí, el comportamiento del flujo en la captación es bastante incierto, por lo que en ocasiones se construyen modelos hidráulico que simulan el funcionamiento del prototipo.

La figura 4.2 muestra las secciones utilizadas en los cálculos.

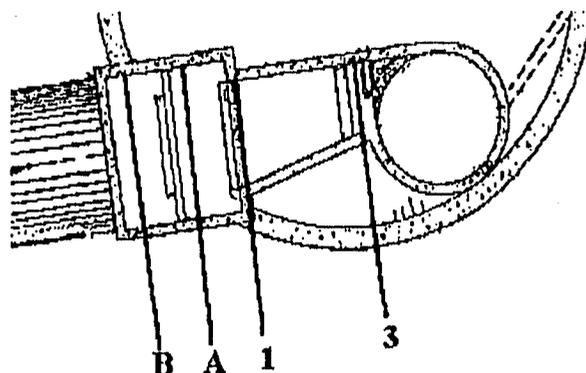


Figura 4.2. Secciones utilizadas para los cálculos

4.1. Diseño de la ranura

Considerando régimen crítico en la sección de la ranura y calculando el gasto unitario, el tirante y la energía específica en la sección tres resultan

$$q_3 = \frac{Q}{b_3} = 19.33 \text{ m}^3 / \text{s} / \text{m}$$

$$y_3 = y_c = \sqrt[3]{\frac{q_3^2}{g}} = 3.36 \text{ m}$$

$$H_3 = H_c = \frac{3}{2} y_3 = 5.05 \text{ m}$$

- Tramo entre las secciones 1 y 3
En la transición de ancho debe cumplirse

$$H_1 = H_3 - \Delta z + h_{1,3} \quad (4.1)$$

$$\text{siendo } h_{1,3} = hf_{1,3} + hc_{1,3} \quad (4.2)$$

donde $hf_{1,3}$ representa las pérdidas por fricción y $hc_{1,3}$ las pérdidas por conversión.

Sustituyendo valores en la ecuación 4.1 resulta

$$H_1 = 4.14 + h_{1-3} \quad (4.3)$$

De la ecuación de Manning

$$hf_{1-3} = \left(\frac{Sf_1 + Sf_3}{2} \right) L_{1-3} \quad (4.4)$$

donde Sf_1 es la pendiente hidráulica en la sección 1, Sf_3 la pendiente hidráulica en la sección 3 y L_{1-3} la distancia entre las dos secciones.

Además

$$Sf_i = \left(\frac{Qn}{A_i Rh_i^{2/3}} \right)^2 \quad (4.5)$$

donde i representa la sección considerada

Al sustituir los valores de n y Q en la ecuación 4.4 se tiene

$$Sf_i = \frac{0.215}{A_i^2 Rh_i^{4/3}} \quad (4.6)$$

Aplicando la expresión 4.6 en la sección 3, con un área hidráulica de 5.04 m^2 y un radio hidráulico de 0.613 m , se obtiene una pendiente hidráulica de 0.0163 .

Al sustituir los valores de la pendiente hidráulica en la sección 3 y la distancia entre las secciones 1 y 3 (3.57 m) en la ecuación 4.4, se tiene

$$hf_{1-3} = 1.785Sf_1 + 0.029 \quad (4.7)$$

Para la sección 1 se llega al siguiente grupo de ecuaciones

$$A_1 = 2.5y_1$$

$$Rh_1 = \frac{2.5y_1}{2.5 + 2y_1} \quad (4.8)$$

$$Sf_1 = \frac{0.215}{A_1^2 Rh_1^{4/3}}$$

Las pérdidas por conversión se calculan como sigue

$$hc_{1,3} = k_e \left| \frac{V_1^2 - V_3^2}{2g} \right| \quad (4.9)$$

donde k_e toma el valor de 0.2 para una contracción gradual del área hidráulica. V_1 y V_3 son las velocidades medias en las secciones 1 y 3 respectivamente.

Aplicando el principio de continuidad y sustituyendo valores en la expresión 4.7 se obtiene

$$hc_{1,3} = \left| \frac{1.373}{y_1^2} - 0.338 \right| \quad (4.10)$$

Por otro lado, de la ecuación de la energía específica, para la sección 1 se tiene

$$y_1^3 - H_1 y_1^2 + 6.865 = 0 \quad (4.11)$$

Proponiendo diferentes valores para y_1 y utilizando en el orden mostrado las expresiones 4.8, 4.7, 4.10, 4.2, 4.3 y 4.11, se obtiene la siguiente tabla

y_1 (m)	A_1 (m ²)	Rh_1 (m)	Sf_1	$hf_{1,3}$ (m)	$hc_{1,3}$ (m)	$h_{1,3}$ (m)	H_1 (m)	H_1 revisión (m)
4.60	11.5	0.983	0.0017	0.0320	0.2731	0.3051	4.445	4.924
4.40	11	0.973	0.0018	0.0323	0.2671	0.2994	4.439	4.755
4.00	10	0.952	0.0023	0.0331	0.2522	0.2853	4.425	4.429
3.90	9.75	0.947	0.0024	0.0333	0.2477	0.2811	4.421	4.351
4.10	10.25	0.958	0.0022	0.0329	0.2563	0.2892	4.429	4.508
3.99	9.98	0.952	0.0023	0.0331	0.2518	0.2849	4.425	4.421
4.01	10.03	0.953	0.0023	0.0331	0.2526	0.2857	4.426	4.437

En la tabla se puede ver que los valores más parecidos de H_1 se dan para un tirante de 4 m, por lo que se adoptará $y_1 = 4$ m y $H_1 = 4.43$ m.

Calculando el tirante crítico para la sección 1 se tiene que $y_{1c} = 2.39$ m, que es menor al tirante de 4 m que se presenta en la sección. Esto confirma que existe régimen subcrítico aguas arriba de la ranura.

- Verificación del diseño

Para verificar el diseño se utilizó la figura 3.1 del anexo A. Se partió de las relaciones

$$H/D = H_1/D = 1.41$$

y

$$b / D = b_1 / D = 0.79$$

En dicha figura se ve que para $H / D = 1.41$ las curvas $b / D = 0.5$ y $b / D = 1$ dan un valor de gasto muy parecido. De acuerdo con esto

$$\frac{Q}{\sqrt{gD^{2.5}}} = 0.5 \text{ y entonces } Q = 27.58 \text{ m}^3 / \text{s} \approx 29 \text{ m}^3 / \text{s}$$

De aquí se concluye que las dimensiones y el gasto de diseño considerado son correctos.

- Tramo entre las secciones 1 y A

Como el tirante aguas abajo de la compuerta es mayor que la altura de las mismas ($y_1 > 2.5 \text{ m}$), se produce una descarga ahogada (ver figura 4.3). Con base en lo anterior se tiene la siguiente ley de descarga

$$Q = C_d A \sqrt{2g y_A} \quad (4.12)$$

donde Q es el gasto de diseño (en m^3 / s), C_d el coeficiente de descarga obtenido en las gráficas de Cofré y Buchheister (Ref.8) (fig 4.4), A el área de la abertura (en m^2), g la aceleración de la gravedad (en m / s^2) y y_A el tirante aguas arriba de la compuerta (en m).

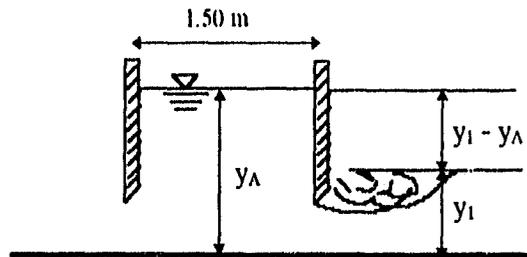


Figura 4.3. Posición de las compuertas y tirantes utilizados en el cálculo

Al sustituir valores en la expresión 4.12 se obtiene

$$C_d = \frac{1.048}{\sqrt{y_A}} \quad (4.13)$$

En la obtención del coeficiente de descarga por medio de las gráficas de Cofré y Buchheister, también intervienen las relaciones y_1 / a y y_A / a , donde a es la abertura de la compuerta y vale 2.5 m. Para este caso $y_1 / a = 1.6$.

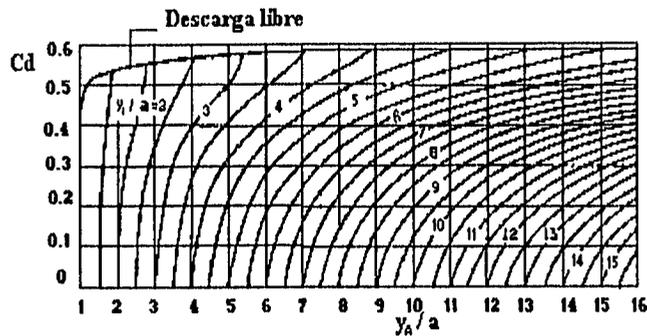


Figura 4.4 Gráficas de Cofré y Buchheister para el coeficiente de descarga en una compuerta

Al proponer diversos valores de y_A y utilizando la ecuación 4.13 y las gráficas de la figura 4.4 para obtener el coeficiente de descarga, se elabora la tabla siguiente

y_A (m)	y_A / a	C_d (gráficas)	C_d (ecuación 4.13)
5.0	2.0	0.50	0.47
4.8	1.92	0.48	0.48

De la tabla se observa que $C_d = 0.48$ y por lo tanto, $y_A = 4.8$ m. Además, de acuerdo con la ecuación de la energía específica $H_A = 4.99$ m.

El ancho del canal cambia bruscamente de la sección en la que termina la compuerta ($b = 2.5$ m) a aquella en la que empieza la caja de control. Esta transición produce una pérdida no considerada en la ley de descarga de la compuerta (ecuaciones 4.12 y 4.13). Lo anterior se debe a que en los experimentos realizados para la obtención de dicha ley el ancho de las compuertas utilizadas coincidía con el del canal.

La referencia 23 muestra coeficientes de descarga obtenidos para cajas de control de planta circular, en los que sí se toma en cuenta la contracción que existe del ancho de la caja al de la compuerta. Para este caso, la ley de descarga es muy parecida a la anterior, sólo que está en función de la diferencia de tirantes aguas arriba y aguas abajo de la compuerta. La expresión es la siguiente

$$y_A - y_1 = \frac{1}{2g} \left[\frac{Q}{C_d A} \right]^2 \quad (4.14)$$

donde $y_A - y_1$ es la diferencia de tirantes aguas arriba y aguas abajo de la compuerta (en m) y las demás literales son las mismas que se definieron para la ecuación 4.12.

Al despejar el coeficiente de gasto para la expresión 4.14 y sustituyendo los valores de área y gasto correspondientes se tiene

$$C_d = \frac{1.048}{\sqrt{y_A - y_1}} \quad (4.15)$$

La figura 4.5 muestra los coeficientes de descarga ahogada que se presentan en la referencia 23. Dichos coeficientes dependen del parámetro $(y_A - y_1) / a$.

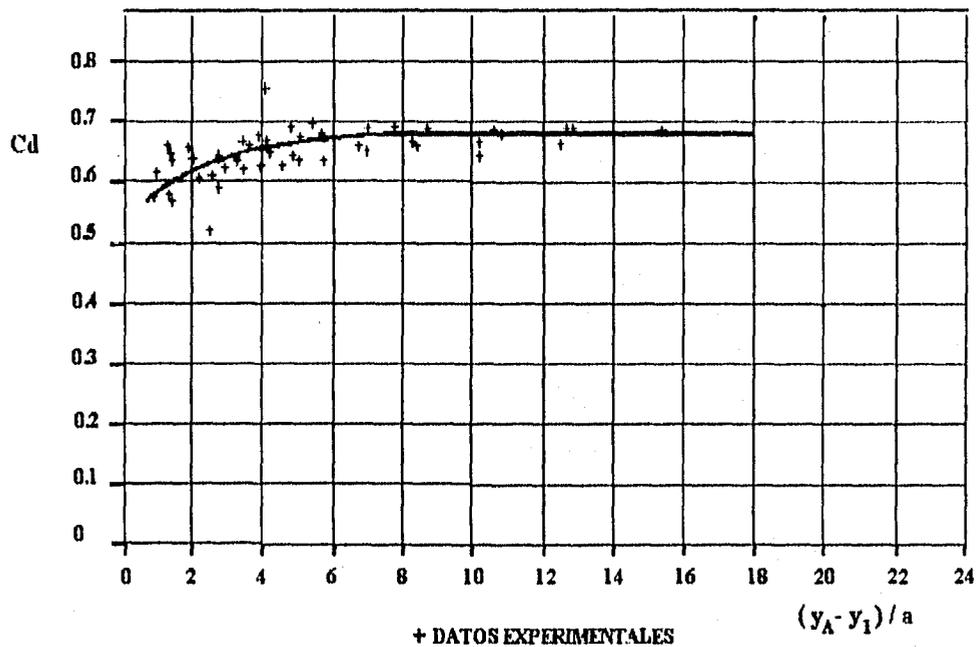


Figura 4.5 Coeficientes de descarga ahogada para una compuerta al centro de la caja de control

Proponiendo valores de $y_A - y_1$ para conocer el coeficiente de descarga y el tirante existente aguas arriba de la compuerta, se obtiene la siguiente tabla

$y_A - y_1$ (m)	$(y_A - y_1) / a$	Cd (fig. 4.5)	Cd (ecuación 4.15)
1.0	0.4	0.56	1.05
1.5	0.6	0.57	0.86
2.5	1.0	0.59	0.66
3.0	1.2	0.60	0.60

De acuerdo con la tabla anterior el coeficiente de descarga correcto es 0.60 y por lo tanto, el valor de $y_A - y_1$ es 3 m. Lo anterior significa que aguas arriba de la compuerta se tiene un tirante y_A de 7 m.

Debido a que los coeficientes de descarga proporcionados para las cajas de control de planta circular no arrojan resultados satisfactorios y a que realmente no existen coeficientes de descarga para este problema específico (cajas de control de planta rectangular y con transiciones de ancho entre la compuerta y la caja), se utilizará el método tradicional, es decir, la ley de descarga de la expresión 4.12 y los coeficientes de descarga que proporciona la figura 4.4. Así pues, el cálculo se continuará con el tirante $y_A = 4.8$ m y la energía específica $H_A = 4.99$ m.

- Tramo entre las secciones A y B

Nuevamente se tiene una descarga sumergida (figura 4.6)

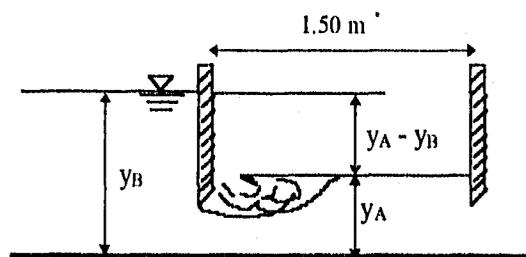


Figura 4.6. Posición de las compuertas y los tirantes que intervienen en estos cálculos.

Utilizando la expresión 4.13 en la que $y_A = y_B$, la relación $y_A / a = 1.92$ y las gráficas de Cofré y Buchheister (fig. 4.4) se obtiene la siguiente tabla

y_B (m)	y_B / a	Cd (gráficas)	Cd (ecuación 4.13)
5.0	2.0	0.20	0.47
5.5	2.2	0.36	0.44
6.0	2.4	0.42	0.42

De lo anterior se puede deducir que $y_B = 6$ m y de acuerdo con la ecuación de la energía específica, $H_B = 6.12$ m.

Como se puede ver, este tirante de 6 m ahoga la descarga del colector superficial, que tiene sólo 3 m de diámetro, por lo que se recomienda poner un escalón descendente mayor (Δz) entre las secciones 1 y 3, o quizá una lumbrera de mayor diámetro.

4.2. Flujo en la lumbrera

- Revisión del núcleo de aire

Para las relaciones $\frac{H}{D} = \frac{H_1}{D} = 1.41$ y $\frac{Q}{\sqrt{g} D^{5/2}} = 0.53$ se puede ver en la figura

3.4 del anexo A que $A_c > 0.2 A_L$, donde A_c es el área transversal del núcleo de aire en el interior de la lumbrera adosada y A_L el área transversal de la misma. De lo anterior se concluye que el flujo de aire en la lumbrera es aceptable. De hecho, como representa bastante más del 20% del área de la lumbrera adosada, convendría proponer un diámetro menor para la lumbrera y revisarla para condiciones de capacidad y de flujo de aire.

- Cálculo de la velocidad media

Suponiendo que las condiciones hidráulicas en la lumbrera adosada serán parecidas a las que se presentan en una lumbrera con cámara espiral, se utilizará la ecuación de Steffan para estimar la velocidad media del flujo en la lumbrera.

El primer paso será la determinación del factor de Darcy mediante la expresión de Colebrook-White.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -\alpha_1 \log \left[\frac{a}{\text{Re}\sqrt{f}} + \frac{k_s}{\text{Rh} c} \right] \quad (4.16)$$

en la que para sección circular, $\alpha_1 = 2.035$, $a = 0.698$ y $c = 13.05$. Además, Re es el Número de Reynolds, k_s la rugosidad absoluta de la lumbrera de concreto y Rh el radio hidráulico de la lumbrera.

Proponiendo un valor de $\nu = 1 \times 10^{-6} \text{ m}^2 / \text{s}$, en donde ν es la viscosidad cinemática del agua a 20°C , se puede obtener el número de Reynolds de la siguiente manera

$$\text{Re} = \frac{4Q}{\nu \pi D} = 1.17 \times 10^7$$

Al sustituir valores en la expresión 4.16 y tomando un k_s de $2 \times 10^{-3} \text{ m}$, se llega a un valor de f igual a 0.0175. Este valor corresponde a un n de Manning de 0.0144, que sería representativo para un concreto de buen acabado. Pese a que en los cálculos anteriores se utilizó una n de 0.016, aquí se dejará el valor de f calculado con la expresión 4.14. Esto se

debe a que al paso del tiempo la lumbrera será más rugosa y disipará más energía, quedando con éste valor de f del lado de la seguridad .

Por otro lado, de acuerdo con el inciso 2.3.2, se tiene que

$$\psi = \left(\frac{f\pi D\sqrt{2g}}{4Q} \right)^{2/3} = 0.0353$$

Así mismo, para la expresión de Steffan y el caso particular en el que $\phi_0 = 0$ y $0 < \phi < 1$ se tiene

$$I = (z_0 - z)\psi = \int_0^\phi \frac{d\phi}{1 - \phi^{3/2}} = \frac{1}{3} \ln \frac{1 + \sqrt{\phi} + \phi}{1 - 2\sqrt{\phi} + \phi} - \frac{2}{\sqrt{3}} \arctan \left(\frac{2\sqrt{\phi} + 1}{\sqrt{3}} \right) + 0.605 \quad (4.17)$$

La siguiente tabla muestra los valores de la velocidad media en la lumbrera adosada para diferentes profundidades (medidas a partir de la sección 0-0). Estas velocidades se calcularon con la siguiente ecuación

$$V = \sqrt{\frac{\phi}{\psi}} \sqrt{2g} \quad (4.18)$$

La tabla exhibe tanto los valores de ϕ calculados con la expresión de Steffan (4.17) como los obtenidos en la figura 2.7. Para la determinación de las velocidades se usaron los primeros.

$z_0 - z$ (m)	$I = (z_0 - z)\psi$ (m)	ϕ (ecuación 4.17)	ϕ (fig. 2.7)	V (ec. 4.18) (m / s)
0	0	0	0	0
2	0.0706	0.0695	0.07	6.21
3	0.1059	0.1039	0.10	7.59
4	0.1412	0.1379	0.12	8.75
5.94	0.2097	0.2011	0.18	10.57

Es necesario observar que aunque la longitud de la lumbrera es de 11.84 m, a partir de la sección 0-0 (sección donde termina el escalón descendente) sólo se tienen 5.94 m.

4.2. Disipación y descarga

- Cálculo de la energía excedente y de la energía disipada a diferentes alturas de la lumbrera

En este cálculo se utilizó la ecuación expuesta en el inciso 2.4.1, es decir

$$\eta = \frac{\frac{\phi_0}{\psi} + z_0 - z - \frac{\phi}{\psi}}{\frac{\phi_0}{\psi} + z_0 - z} \quad (4.19)$$

tomando el caso en el que $\phi_0 = 0$ y $0 < \phi < 1$.

Al igual que en el caso de las velocidades, las energías se obtuvieron para diferentes profundidades (medidas a partir de la sección 0-0). Se utilizaron los mismos valores de ϕ y se mantuvo también el de ψ .

La siguiente tabla resume los cálculos

$z_0 - z$ (m)	ϕ (ecuación 4.17)	η (%)	$1 - \eta$ (%)
0	0	0	100
2	0.0695	1.56	98.44
3	0.1039	1.89	98.11
4	0.1379	2.34	97.66
5.94	0.2011	4.09	95.91

Los resultados de la tabla anterior confirman la hipótesis hecha al principio del capítulo, en la que se dijo que la lumbrera adosada era muy corta. Se ve que la disipación es muy pequeña y que el flujo llega al fondo con una energía de casi el 96 % de la original. Esto podría provocar daños a la estructura y problemas en el conducto de descarga.

- Revisión del conducto de descarga

En esta revisión se utilizará el método propuesto en el inciso 3.2.2 para la determinación del tirante en la lumbrera.

Lo primero que se debe conocer es la relación entre el diámetro del conducto de descarga y el de la lumbrera. Para este caso, $Dd / D = 0.77$.

Proponiendo un coeficiente de descarga inicial de 0.6 se tiene que $\frac{C_d D}{Dd} = 0.775$.

Entrando con este valor a las figuras 3.7 y 3.8 del anexo A se leen los siguientes valores

Dd / D	h _L / D
0.75	3.4
0.85	4.5

donde h_L es el tirante en la lumbrera.

Como no se tiene una gráfica para la relación Dd / D existente, se hizo una interpolación con los dos valores de la tabla, obteniéndose así que para Dd / D = 0.77, h_L / D = 3.62. Lo anterior implica que h_L = 11.40m.

El paso siguiente consistió en revisar si el coeficiente de descarga de 0.6 que se supuso es correcto, para lo cual se utilizó la siguiente expresión

$$C_d = \frac{4Q}{\pi Dd^2 \sqrt{2g h_L}} \quad (4.20)$$

y sustituyendo valores

$$C_d = \frac{1.40}{\sqrt{h_L}} \quad (4.21)$$

Al introducir en la ecuación 4.21 el valor de h_L = 11.40 m, resulta un coeficiente de descarga de 0.41. Como éste es diferente al que se había supuesto, se tiene que repetir el procedimiento anterior hasta que el coeficiente de descarga supuesto coincida con el obtenido con la expresión 4.21. La siguiente tabla muestra las iteraciones efectuadas para llegar al coeficiente de descarga correcto.

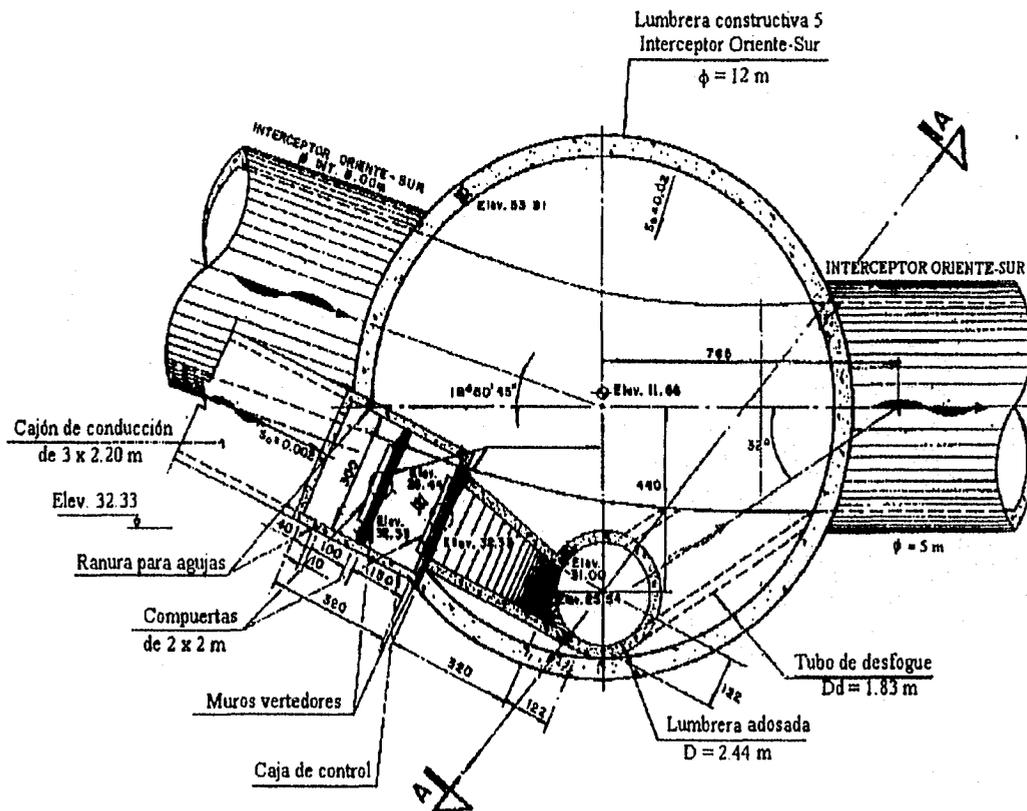
Cd	$\frac{C_d D}{Dd}$	$\frac{h_L}{D}$ para $\frac{Dd}{D} = 0.75$	$\frac{h_L}{D}$ para $\frac{Dd}{D} = 0.85$	$\frac{h_L}{D}$ para $\frac{Dd}{D} = 0.77$	$\frac{h_L}{D}$ para $\frac{Dd}{D} = 0.77$ (m)	Cd (cc. 4.21)
0.60	0.77	3.4	4.5	3.62	11.40	0.41
0.50	0.65	2.8	4.0	3.04	9.58	0.45
0.40	0.52	2.1	3.1	2.30	7.25	0.52
0.45	0.58	2.3	3.7	2.58	8.13	0.49
0.47	0.61	2.5	3.8	2.76	8.69	0.47

En la tabla anterior se ve que el coeficiente de gasto correcto vale 0.47, que corresponde a un tirante en el fondo de la lumbrera adosada de 8.69 m. Por otro lado, en la figura 4.1 se tiene que para el modelo experimental el nivel máximo medido en la lumbrera fue de 19.84 m, lo que equivale a un tirante de 4.05 m desde el fondo de la misma. De acuerdo con lo anterior se concluye que el método utilizado para la determinación de tirantes en la lumbrera y diseño de conductos cortos no conduce a

resultados satisfactorios para esta lumbrera en particular. Probablemente, esto se deba a que la lumbrera 1 es bastante más corta que las utilizadas en la determinación de dicho método.

Para tener una mejor claridad de los métodos de disipación y descarga utilizados, se propone la revisión de la Lumbrera 5 del Interceptor Oriente-Sur (Ref. 7). Esta lumbrera tiene una mayor longitud, por lo que se piensa que se puede lograr una mejor apreciación de la disipación a lo largo de la lumbrera y del funcionamiento del método para la determinación de tirantes en la lumbrera y diseño de conductos cortos.

Las características geométricas de la lumbrera se muestran en la figura 4.6



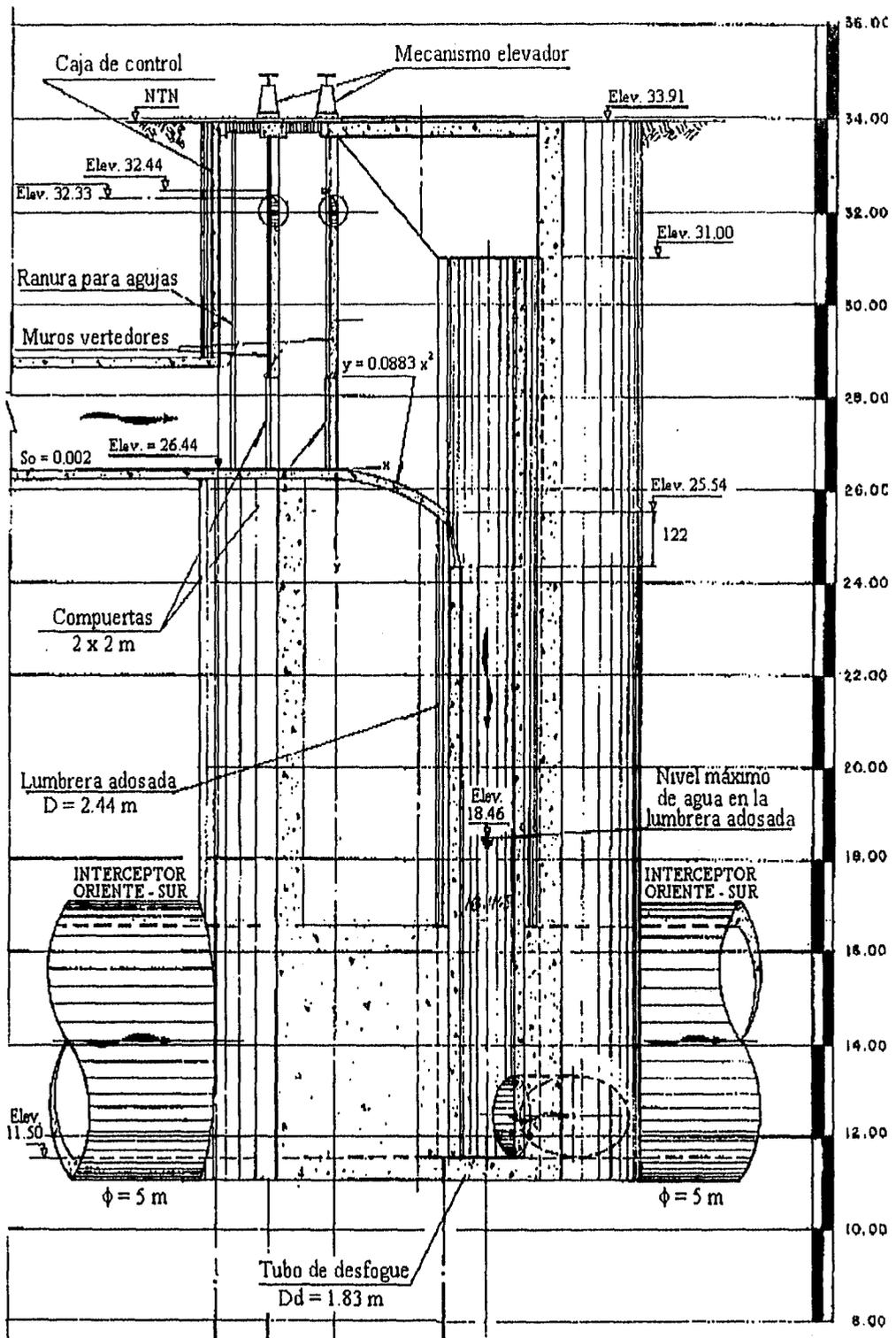


Figura 4.6. Características geométricas de la Lumbrera 5 del Interceptor Oriente-Sur

Algunos de los datos necesarios para efectuar la revisión son los siguientes:

Descripción	Símbología	Dimensión
Qasto de diseño	Q	15 m ³ /s
Diámetro de la lumbrera adosada	D	2.44 m
Diámetro del conducto de descarga	Dd	1.83 m
Longitud total de la lumbrera adosada	L	19.44 m
Nivel de agua máximo medido en la lumbrera	N _{máx}	6.90 m

- Cálculo de la energía excedente y de la energía disipada a diferentes alturas de la lumbrera

De acuerdo con las expresiones vistas en el ejemplo anterior, se sabe que el radio hidráulico de la lumbrera vale 0.61 m y que para una viscosidad cinemática del agua de $1 \times 10^{-6} \text{ m}^2 / \text{s}$ se tiene un número de Reynolds de 7.83×10^6 .

Además, a partir de la ecuación 4.16, para sección circular y considerando una rugosidad absoluta en la lumbrera de concreto de $2 \times 10^{-3} \text{ m}$, se llega a un valor de f igual a 0.019. Este valor corresponde a una n de Manning de 0.0144, que como ya se explicó, nos permite estar del lado de la seguridad.

Para el factor de fricción de Darcy obtenido se tiene que el parámetro ψ de la ecuación de Steffan adquiere un valor de 0.048.

La siguiente tabla muestra, para diferentes alturas de la lumbrera, el cálculo del parámetro I , la determinación de ϕ por medio de la figura 2.7, el cálculo de la velocidad media de acuerdo con la expresión 4.18, la energía disipada por medio de la ecuación 4.19 y la energía excedente.

$z_0 - z$ (m)	$I = (z_0 - z) \psi$ (m)	ϕ (fig. 2.7)	V (ec. 4.18) (m / s)	η (%)	$1 - \eta$ (%)
0	0	0	0	0	100
3	0.144	0.13	7.28	9.89	90.11
6	0.288	0.25	10.09	13.36	86.64
9	0.433	0.36	12.11	16.82	83.18
12	0.577	0.45	13.54	22.02	77.98
13.98	0.672	0.48	13.99	28.60	71.40

De la tabla anterior se pueden obtener las siguientes conclusiones:

La variación de la velocidad media en la lumbrera empieza siendo muy brusca y disminuye conforme se acerca al fondo de la lumbrera. Esto sucede hasta llegar a la velocidad límite, en la que ϕ vale 1 y la velocidad se mantiene constante.

Al comparar esta lumbrera con la del ejemplo anterior podemos ver que la disipación es mucho mejor en ésta, ya que a los mismos 3 m de profundidad

en la lumbrera 1 sólo se ha disipado el 1.89 % de la energía total, mientras que para la lumbrera 5 se ha tenido una disipación del 9.89 % de la energía inicial.

A pesar de la mejor disipación que se tiene en la lumbrera 5, se puede ver que al final de la misma el agua todavía almacena el 71.40 % de la energía inicial. Esto sería grave si se tuviera otra estructura de descarga, pero con los conductos cortos el flujo puede dirigirse hacia el túnel profundo, por lo que la energía excedente se utiliza para proporcionar mayor energía al flujo en el mismo.

- Revisión del conducto de descarga

Para la relación $Dd / D = 0.75$ (figura 3.7 del anexo A) y utilizando la expresión 4.20 se llega a la siguiente tabla

Cd	$\frac{Cd D}{Dd}$	$\frac{h_i}{D}$ para $\frac{Dd}{D} = 0.75$	h_i para $\frac{Dd}{D} = 0.75$ (m)	Cd (ec. 4.20)
0.60	0.80	3.50	8.54	0.44
0.50	0.67	2.90	7.08	0.48
0.49	0.65	2.80	6.83	0.49

En la tabla anterior se ve que el coeficiente de gasto correcto es 0.49, que corresponde a un tirante en el fondo de la lumbrera adosada de 6.83 m. Este tirante concuerda perfectamente con el nivel de agua máximo en la lumbrera, es decir, 6.90 m. De lo anterior se concluye que el método utilizado para la determinación de tirantes en la lumbrera y diseño de conductos cortos resulta satisfactorio para esta lumbrera.

5. CONCLUSIONES

La cantidad de energía que acumula el agua en la caída hace que la conducción de agua para salvaguardar un gran desnivel sea una labor difícil, independiente del tipo de estructura que se utilice.

La conducción en caída libre es la más sencilla pero no permite la disipación de energía, por lo que trae consigo consecuencias desfavorables para la estabilidad y durabilidad de las estructuras. Las caídas con cimacio son estructuras costosas (por la gran cantidad de material que requieren para la construcción del cimacio) y conducen el agua por medio de una caída libre. Debido a esto, ninguna de las dos opciones anteriores representa una buena solución al problema planteado.

El estudio de cámaras espirales que aquí se presenta no es más que un breve resumen de los diseños propuestos por diferentes investigadores. La principal ventaja de este tipo de estructuras es la de inducir la formación del vórtice en la lumbrera y permitir la disipación de energía mediante el roce del agua con las paredes. Para los sistemas de drenaje profundo, en los que el espacio es limitado, la construcción de estructuras de gran tamaño como ésta resulta costoso y constituye un problema para el mantenimiento del sistema. Sin embargo, el funcionamiento hidráulico de las mismas es muy bueno e incluso son más eficientes que las de ranura vertical. Por este motivo convendría utilizarlas como vertedores en las grandes presas o para hacer estas conducciones en lugares donde no se tengan limitaciones de espacio. En el caso de utilizar las cámaras espirales como vertedores quizá convendría el estudio de una estructura que combinara las bondades de aquella ideada por el Instituto de Ingeniería, que sin sacrificar su capacidad hidráulica presenta las menores dimensiones; pero con un radio de curvatura variable, como la propuesta por Knapp o Adami, para facilitar su construcción.

Los métodos para la determinación del gasto en las estructuras de cámara espiral se derivan principalmente de los fundamentos matemáticos establecidos por Binnie y Hookins o de las relaciones propuestas por Viparelli. La mayoría de ellos establecen suposiciones diversas, por lo que la mejor forma de comprobar su eficacia sería por medio de modelos experimentales. Hasta la fecha, el método de Hager es el más sencillo y confiable, ya que establece una relación lineal de carga contra gasto cuya precisión ha sido verificada mediante estudios experimentales. El método de Quick para captaciones en espiral es un poco más reciente que el de Hager, sin embargo, su aplicación es más laboriosa y la estructura propuesta presenta menor capacidad.

El mayor éxito de Quick está en el diseño de la estructura de ranura vertical, ya que ésta, además de ofrecer todos los beneficios de las cámaras espirales, es fácil de construir y logra resolver el problema de la disipación en un espacio bastante pequeño. Esto resulta especialmente benéfico en el sistema de drenaje profundo del D.F., que se encuentra entre 13 y 40 m bajo tierra y cuenta con espacios reducidos para el acomodo de las captaciones.

Los experimentos realizados por la D.G.C.O.H. son de gran importancia, ya que logran adaptar la estructura propuesta por Quick a las distintas captaciones del sistema de drenaje profundo del D.F. Además, los resultados derivados de estos experimentos constituyen un método simplificado para el diseño de estructuras de ranura vertical.

Para el diseño de una de estas estructuras por medio de las gráficas obtenidas por la D.G.C.O.H, es importante tener en cuenta los modelos experimentales que se utilizaron en la obtención de las mismas y las condiciones particulares que cada una de estas representa, ya que tal vez exista una captación cuyo diseño no se adapte a los casos contemplados en ellas. Cuando esto ocurra, se podría recurrir al método propuesto por Quick para hacer un diseño preliminar y verificar el funcionamiento de la estructura con un modelo experimental.

Pese a que en el capítulo 4 se discutieron una a una las gráficas obtenidas por la D.G.C.O.H. hay que resaltar que de acuerdo con la figura 3.1 del anexo A, la relación adimensional de carga contra gasto para las estructuras de ranura vertical sin compuertas es prácticamente lineal, lo que coincide con el planteamiento hecho por Hager para las cámaras espirales. De esto se comprueba que a pesar de las diferencias estructurales entre ambas, su funcionamiento hidráulico es muy parecido. Otro aspecto interesante se presenta con la introducción de compuertas (régimen supercrítico aguas arriba de la ranura), pues la relación lineal de carga contra gasto desaparece.

En el tramo que se encuentra al final del canal de llamada es de suma importancia el desnivel o escalón descendente que se tenga, ya que éste evita ahogamientos en las compuertas de la caja de control e impide la formación de un salto hidráulico para el caso en el que la energía específica en el canal es menor o igual a la energía específica crítica en la ranura. Esto es, permite la presencia de condiciones hidráulicas óptimas en la conducción del agua hacia la ranura.

Para el diseño de la lumbrera adosada conviene recordar que lo más económico y sencillo es que ésta se forme con la unión de conductos prefabricados de diámetro comercial.

La rugosidad de la lumbrera es un factor determinante para la disipación de energía. Si la rugosidad es pequeña, casi no habrá pérdida de energía; pero si se tiene una pared muy rugosa, es posible que el vórtice desaparezca y la disipación sea nula. En este sentido, lo óptimo sería encontrar la rugosidad máxima que permita adherencia del agua a las paredes.

Las relaciones que se presentan en el capítulo 2 para la obtención del flujo de aire en la lumbrera son un tanto vagas, pues su aplicación se indica para un flujo de aire "pequeño" o "considerable", pero no se especifica el significado cuantitativo de estas palabras. En este caso, lo más confiable es seguir la recomendación que se da en la figura 3.4 del anexo A, ya que si el área transversal del flujo de aire representa un 20% del área transversal total de la lumbrera adosada, se obtiene un flujo de aire adecuado que ayuda a la disipación, evita las presiones negativas y permite la adecuada ventilación de la lumbrera. No se recomienda un flujo de aire mucho mayor al 20% del flujo total, ya que esto implicaría la utilización de una lumbrera de gran diámetro que traería problemas de espacio y encarecería la economía.

En cuanto a las estructuras de desfogue, son evidentes las bondades que presentan los conductos cortos, ya que sin la necesidad de construir grandes estructuras, como los tanques intermedios, se logra encauzar la energía restante del agua. De esta manera no sólo se evita la turbulencia que reduce la capacidad del túnel profundo, sino que con la adecuada dirección del flujo de descarga hacia el colector inferior, se logra aumentar la capacidad del mismo. Lo anterior implica un gran ahorro en el costo de la elaboración e

introducción de los conductos que constituyen el túnel profundo. Además, para gastos grandes, su diseño implica la formación de un colchón de agua en el fondo de la lumbrera que permite la disipación de energía

Gracias a los experimentos efectuados por la D.G.C.O.H. se cuenta con un método para el diseño de conductos cortos y para la determinación del tirante de agua en la lumbrera adosada. La aplicación del método es bastante sencilla, sin embargo, nuevamente se deben tomar en cuenta los modelos experimentales que se utilizaron en la obtención de las gráficas de diseño y las condiciones particulares que cada una de éstas representa. Un ejemplo fehaciente de esto está en la diferencia entre los resultados experimentales y los obtenidos con el método en la revisión de la lumbrera 1. La conclusión que se puede desprender de este ejemplo en particular es que el método propuesto no es aplicable a lumbreras cortas, ya que fue diseñado con base en experimentos realizados en lumbreras de mayor longitud. Sin embargo, ésta es sólo una hipótesis que deberá de ser corroborada con un mayor número de casos. Como método alternativo para el diseño de conductos cortos se puede utilizar la ley de descarga de un orificio de pared gruesa.

Hay que resaltar la importancia de la correcta utilización de todas las gráficas de diseño obtenidas por la D.G.C.O.H. , así como la atención que se debe de dar a los resultados y especificaciones que se presentan en el capítulo 4 de este trabajo, ya que esto permitirá un diseño óptimo de las estructuras.

Hasta la fecha, la mayoría de los métodos de diseño existentes corresponden al caso en el que se tiene flujo subcrítico en el canal de aproximación, que es sin duda el caso más común. Se han hecho algunos estudios, como los efectuados por la D.G.C.O.H. para la existencia de compuertas en la ranura o en el canal de aproximación, sin embargo, si se quisiera ahondar más en el caso de régimen supercrítico se tendrían que realizar estudios más detallados.

Casi todos los estudios de lumbreras adosadas en México se han enfocado a la búsqueda de los mejores diseños para las estructuras que conforman el sistema de drenaje profundo del D.F. Sin embargo, a pesar del gran esfuerzo que se ha hecho, el funcionamiento del mismo sigue siendo un tanto impredecible y los métodos utilizados para la regulación de avenidas siguen siendo manuales. Así mismo, la sustitución de caídas con cimacio o cámaras espirales por las lumbreras de ranura vertical no es sencilla, no sólo por cuestiones económicas, sino porque muchas de las estructuras existentes carecen de un diseño predeterminado que permita conocer los datos de diseño de las mismas. Otro problema grave en el sistema de drenaje profundo son las cajas de control, que aunque han sido previamente estudiadas, existen muchas incógnitas acerca de su funcionamiento, tales como los coeficientes de descarga ahogada para las compuertas de las mismas.

Como se puede ver, los experimentos realizados por la D.G.C.O.H. constituyen un gran avance para el conocimiento, adaptación y mejora del funcionamiento de estas estructuras. Sin embargo, tomando en cuenta que la mayoría de ellas se utilizan en el sistema de drenaje profundo, es muy importante que el estudio se extienda a las demás estructuras que conforman este sistema, de tal manera que se logre el trabajo integral y correcto del mismo.

Por último, es conveniente señalar la necesidad de una búsqueda constante para obtener un diseño óptimo. En este sentido hay que recordar que el camino de la

investigación es inmenso, existiendo siempre mejoras para lo que en algún momento se piensa perfecto.

ANEXO A

FIGURA 3.1
LUMBRERA DE RANURA VERTICAL: GRÁFICA
ADIMENSIONAL, GASTO VS. ENERGÍA ESPECÍFICA

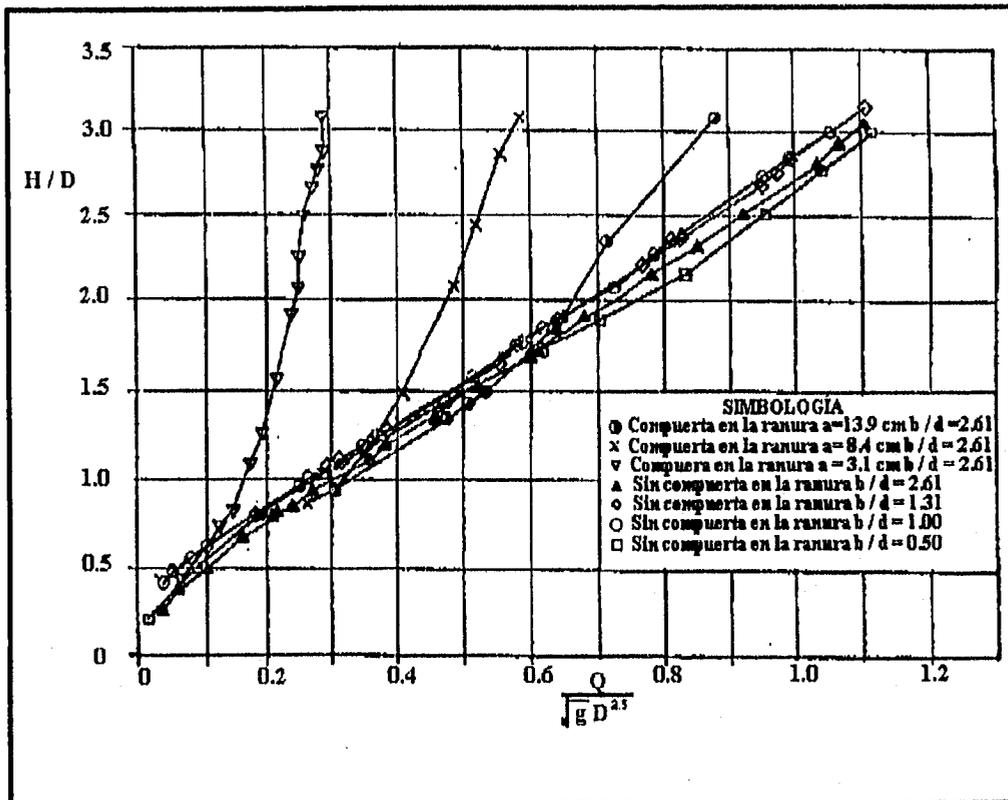


FIGURA 3.2
PERFILES HIDRÁULICOS

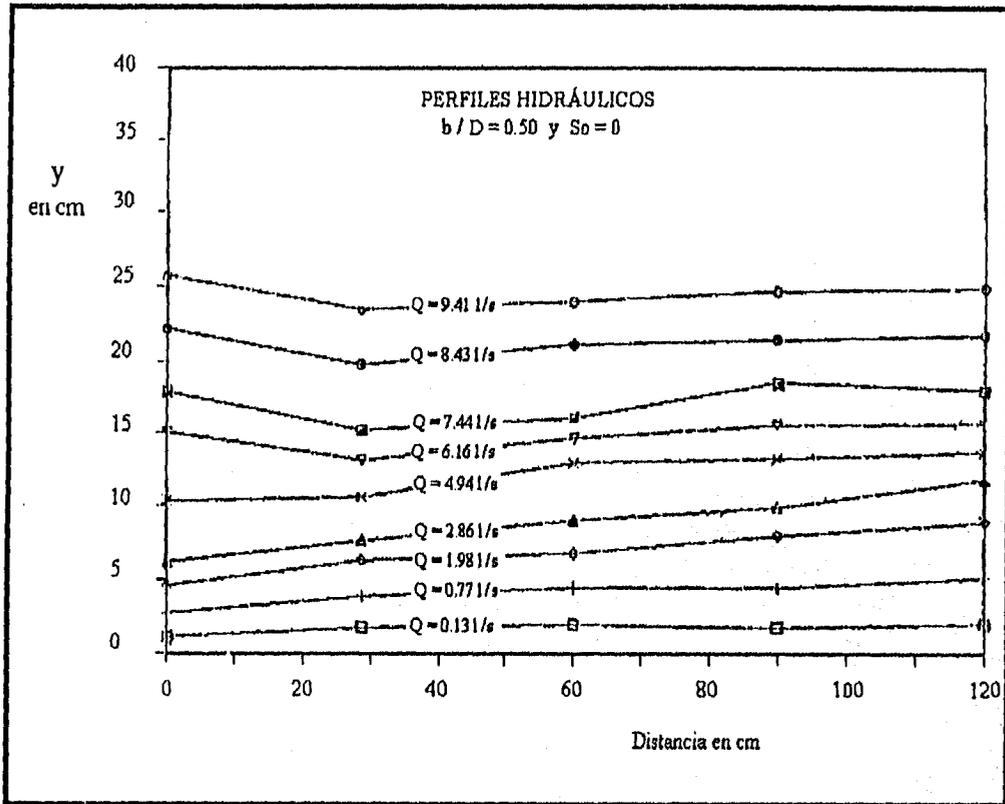


FIGURA 3.3
 GRÁFICA ADIMENSIONAL COMPARATIVA PARA
 DISTINTOS TIPOS DE CAPTACIÓN

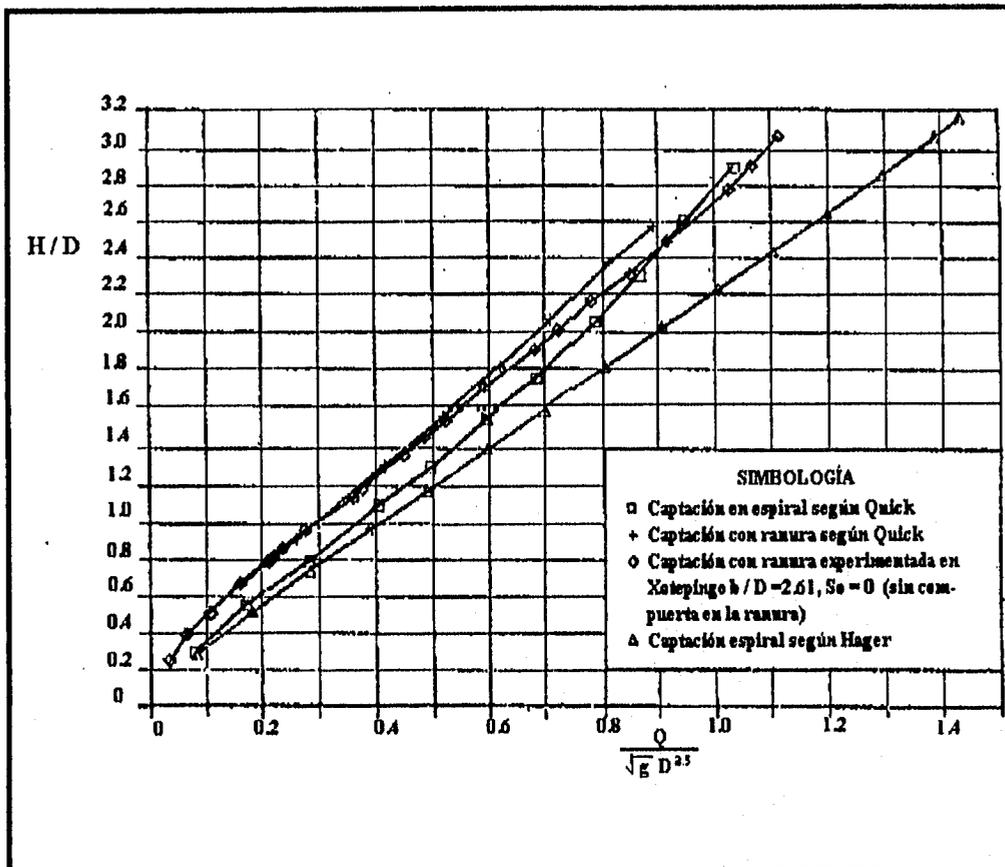


FIGURA 3.4
LUMBRERA DE RANURA VERTICAL: GRÁFICA
ADIMENSIONAL, TRANSICIÓN HORIZONTAL A 45° Y 30°

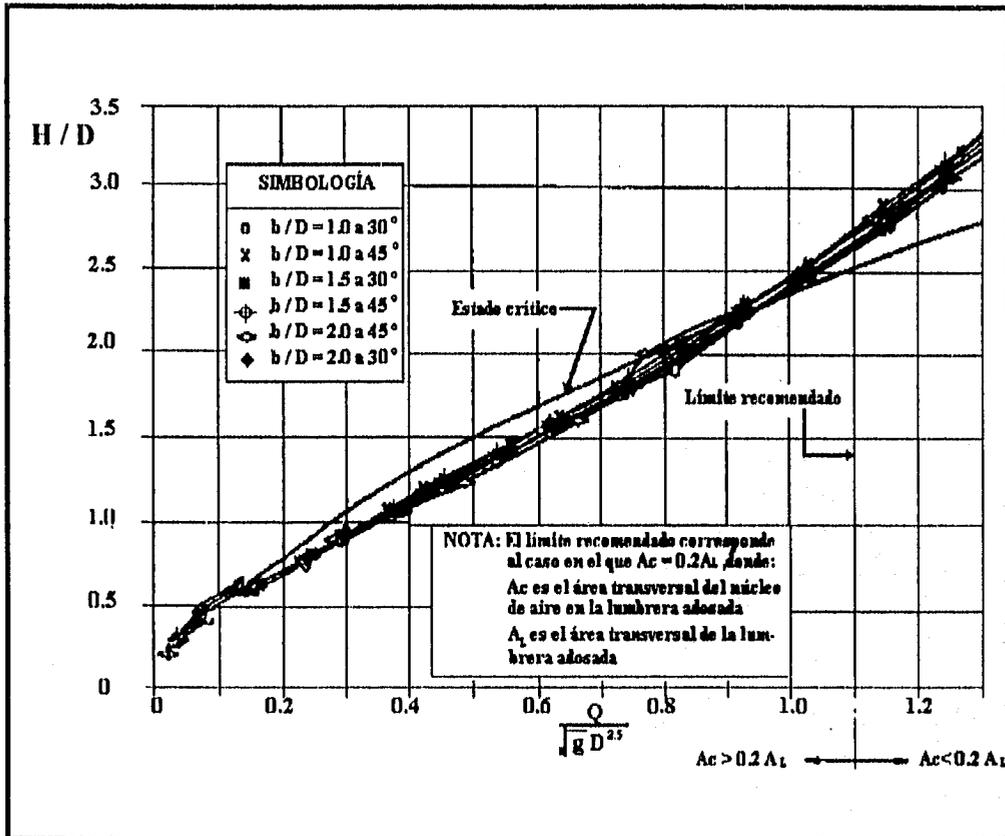


FIGURA 3.5
RESUMEN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS
PARA LA RELACIÓN $Q - h_L$

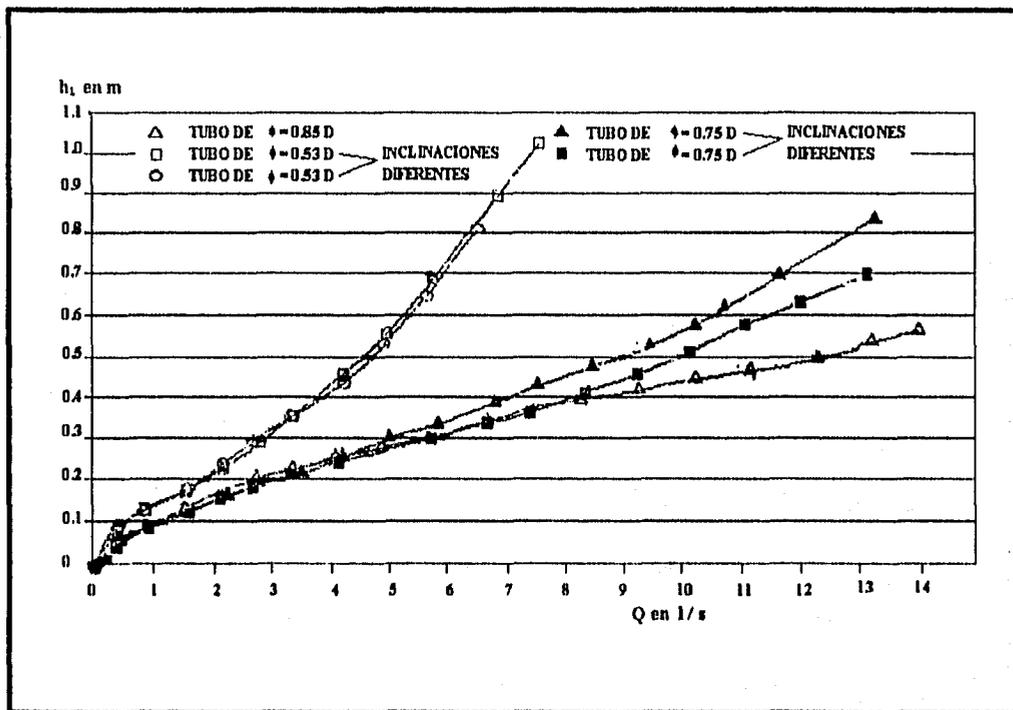


FIGURA 3.6
CURVAS ADIMENSIONALES PARA LOS ORIFICIOS
DE DESCARGA EN LA LUMBRERA DE RANURA VERTICAL

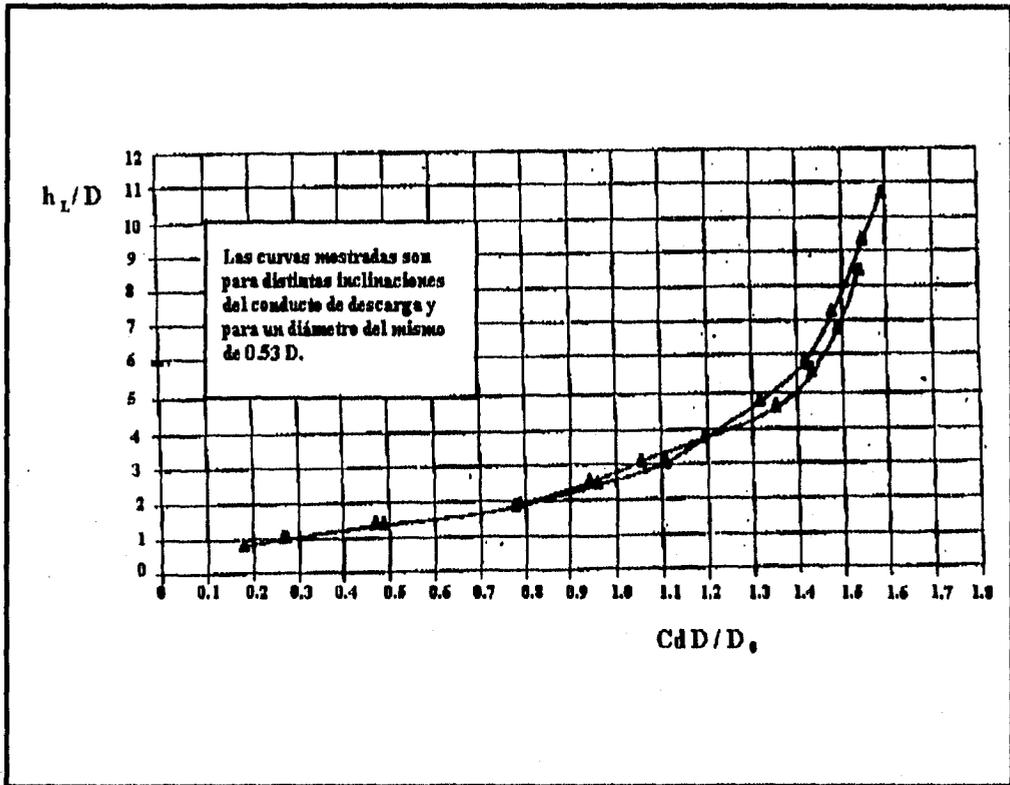


FIGURA 3.7
CURVAS ADIMENSIONALES PARA LOS ORIFICIOS DE
DESCARGA EN LA LUMBRERA DE RANURA VERTICAL

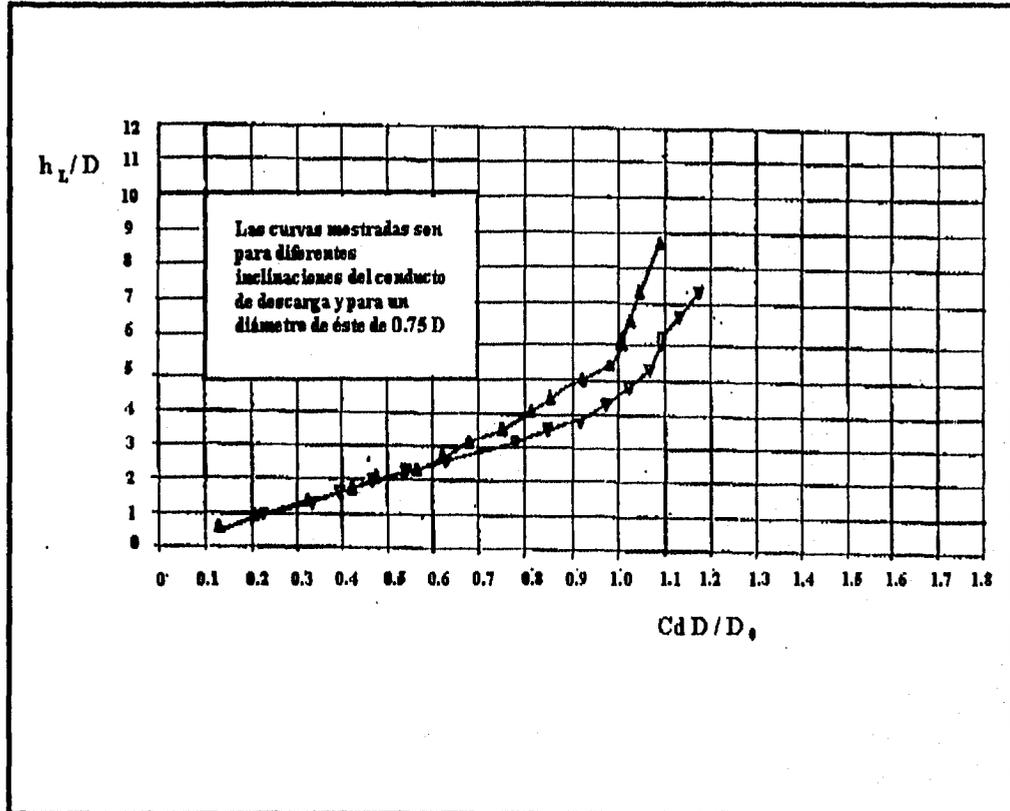


FIGURA 3.8
CURVAS ADIMENSIONALES PARA LOS ORIFICIOS DE
DESCARGA EN LA LUMBRERA DE RANURA VERTICAL

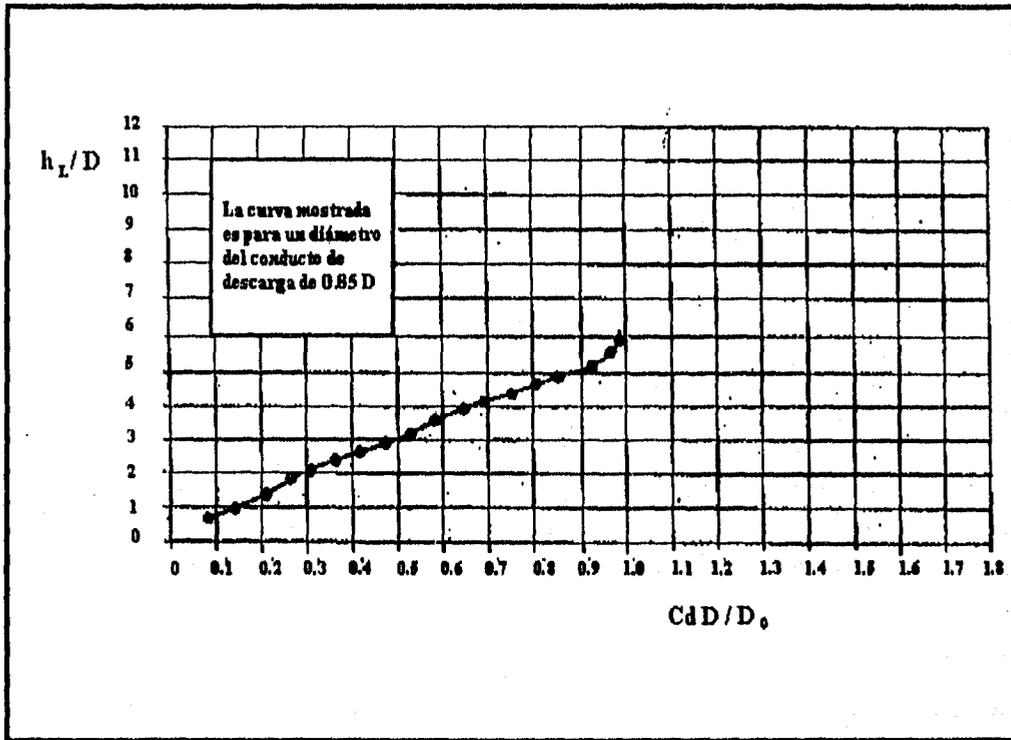


FIGURA 3.9
CURVAS ADIMENSIONALES PARA LOS ORIFICIOS DE
DESCARGA EN LA LUMBRERA DE RANURA VERTICAL

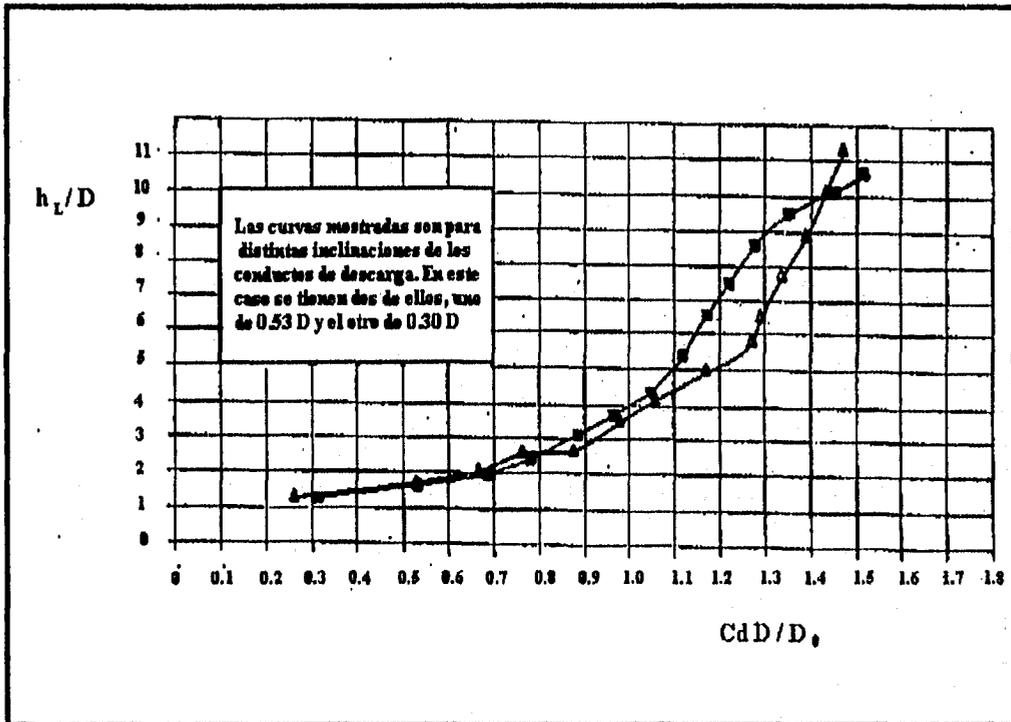


FIGURA 3.10
CURVAS ADIMENSIONALES PARA LOS ORIFICIOS DE
DESCARGA EN LA LUMBRERA DE RANURA VERTICAL

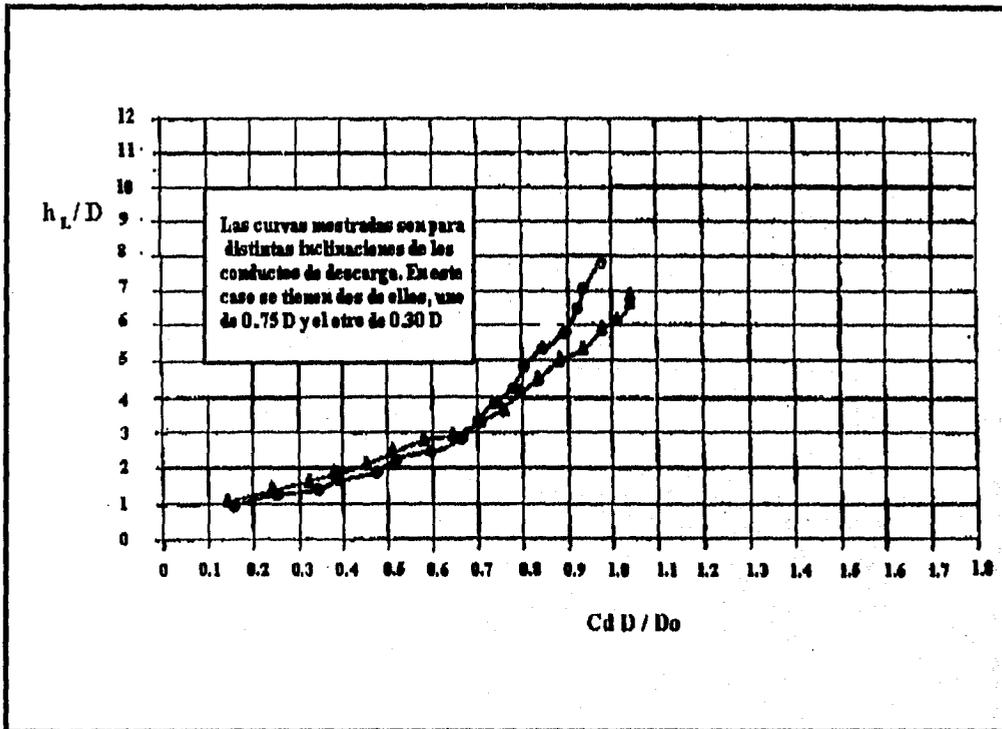


FIGURA 3.11
 RELACIÓN Q - y PARA DISTINTAS
 ABERTURAS DE COMPUERTA

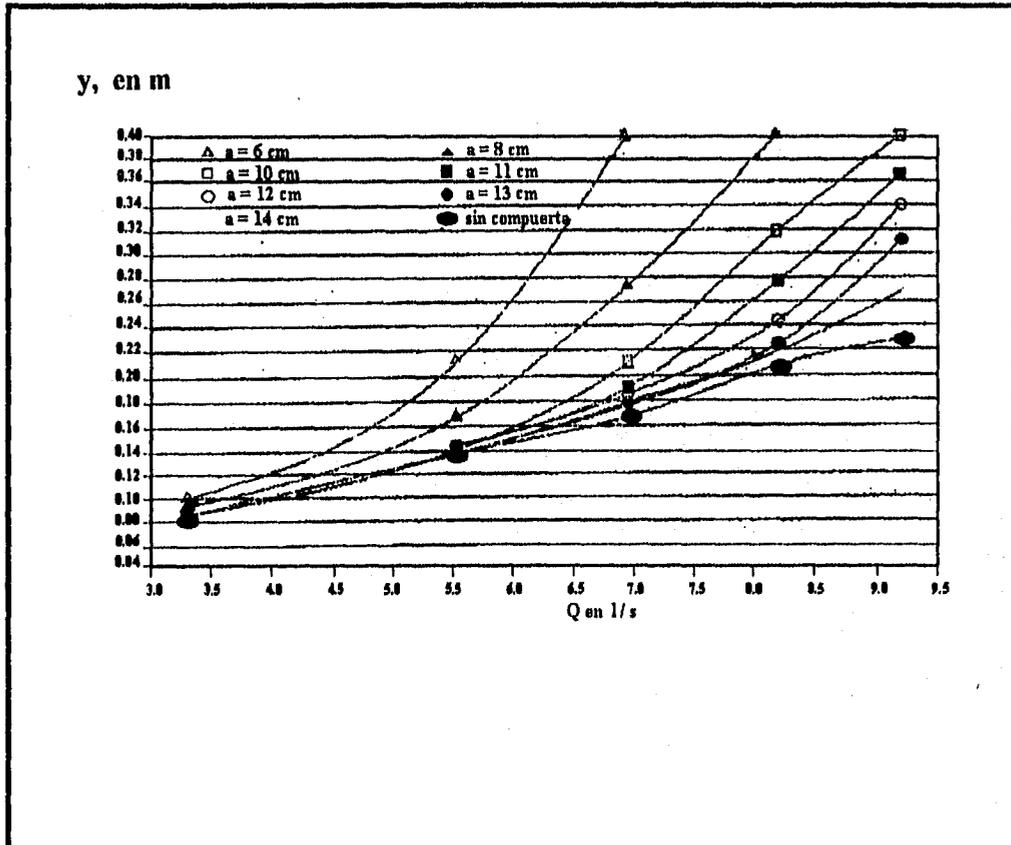


FIGURA 3.12
RELACIÓN y/a - C_d PARA LA COMPUERTA EN EL
CANAL.

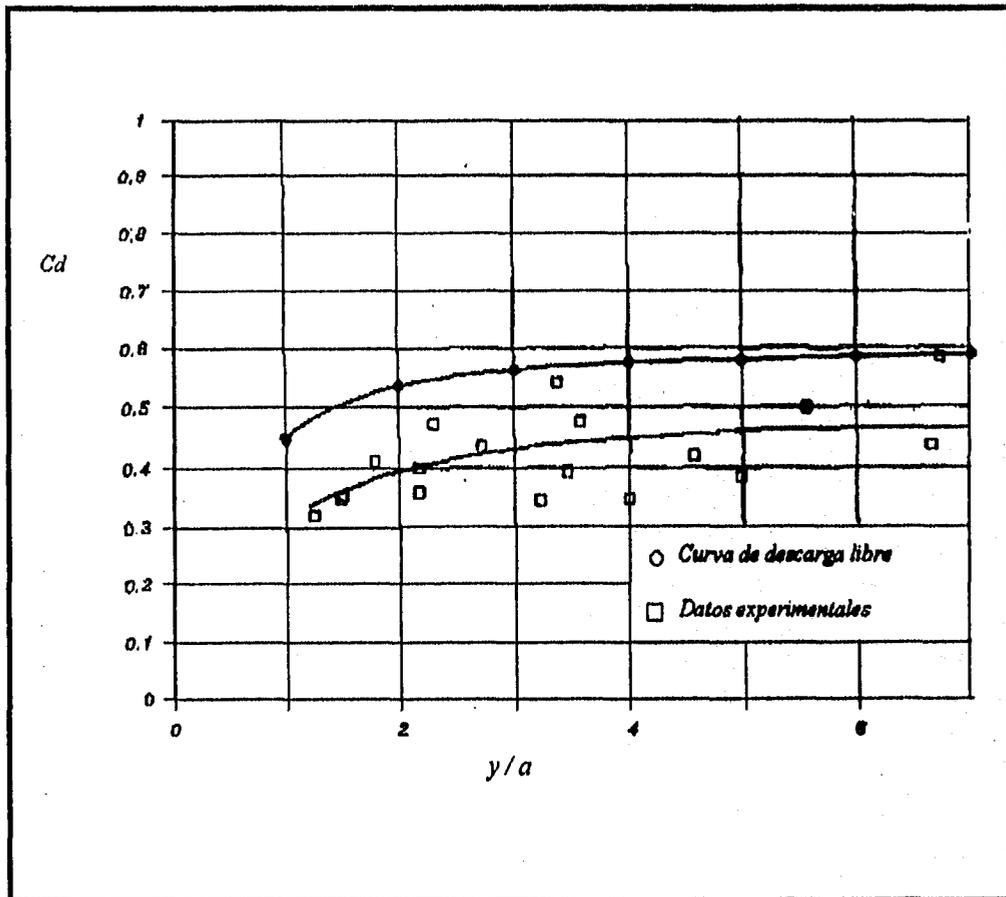
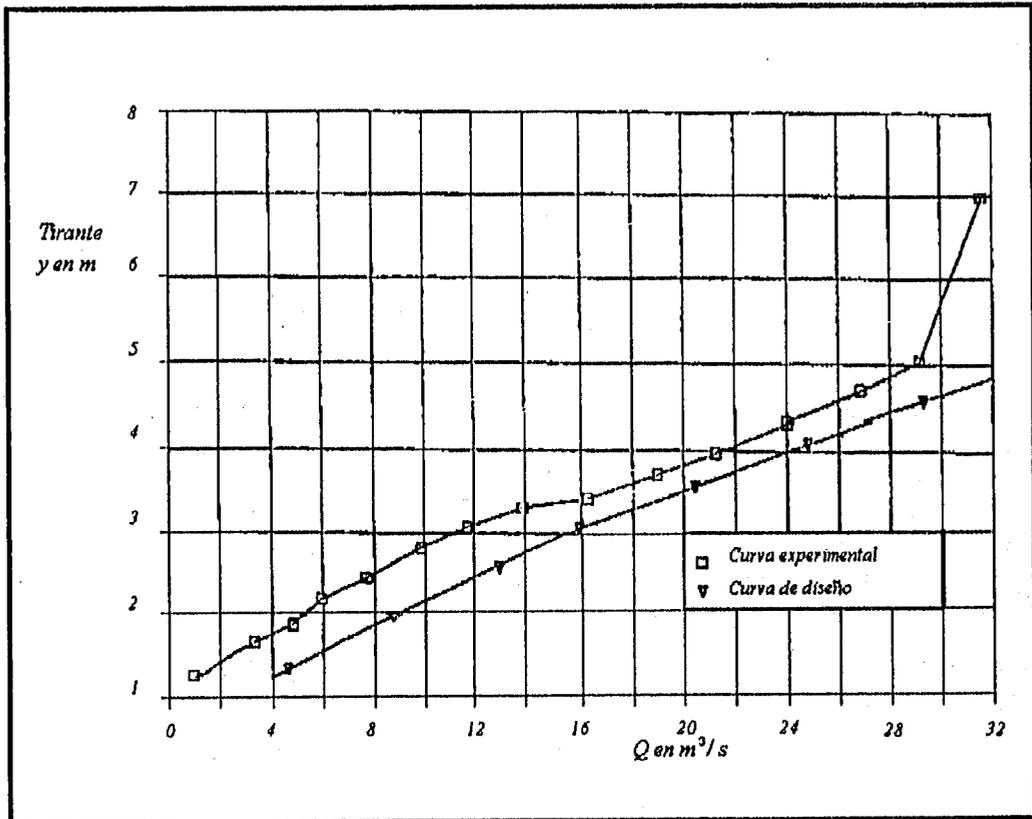


FIGURA 3.13
COMPARACIÓN ENTRE LAS CURVAS DE DISEÑO Y
EXPERIMENTAL PARA LA LUMBRERA 1. COMPUERTA DE
SERVICIO CON $a = 2.5$ m



REFERENCIAS

1. Franco, José R. Diseño hidráulico de una cámara espiral con lumbrera. Tesis de licenciatura, U.N.A.M. , 1975.
2. Hager, Willi. Relaciones carga-gasto para lumbreras vórtice. Ingeniería, Desarrollo y Sistemas S.A.
3. Quick, Michael. Análisis del vórtice espiral y del vórtice de ranura vertical en lumbreras de caída. Ingeniería, Desarrollo y Sistemas S.A.
4. Elaboración de un proyecto experimental en laboratorio de una alternativa de captación con cámara simplificada de entrada. Elaboración de un modelo hidráulico de la planta de bombeo Zaragoza, incluidas las lumbreras 7-A, 7-B y 7-C del interceptor oriente sur y ejecución de un programa de colaboración técnica relacionada con la operación y mantenimiento del laboratorio de Hidráulica de Xotepingo. Informe Final realizado por Ingeniería, Desarrollo y Sistemas S.A. para la D.G.C.O.H. del D.D.F. 1990.
5. Revisión del funcionamiento hidráulico y de proyecto geométrico de las plantas de bombeo de aguas residuales 25 de Julio, Colonia Metropolitana y un programa de colaboración técnica en otras plantas de bombeo. Informe Final realizado por Ingeniería, Desarrollo y Sistemas S.A. para la D.G.C.O.H. del D.D.F. 1991.
6. Revisión del funcionamiento hidráulico y del proyecto geométrico de distintas plantas de bombeo y construcción y experimentación en modelo hidráulico reducido de una alternativa geométrica para los cárcamos del laboratorio de pruebas de equipo de bombeo de la D.G.C.O.H. Informe Final realizado por Ingeniería, Desarrollo y Sistemas S.A. para la D.G.C.O.H. del D.D.F. 1992.
7. Proyecto de las captaciones del interceptor central para adecuar su funcionamiento hidráulico al nuevo tipo de cámara simplificada con ranura vertical. Informe Final realizado por Ingeniería, Desarrollo y Sistemas S.A. para la D.G.C.O.H. del D.D.F. 1991.
8. Sotelo, Gilberto. Hidráulica General. Ed. Limusa, México D.F. 1993.
9. Viparelli, M. Su un particolare tipo d'imboco e sull'effusso con vórtice. (On a particular inlet type and its discharge characteristics for vortex flow) L'Energía Elettrica Vol. 27 (1950) Nr. 10.
10. Stevens, J.C. y Kolf R.C. Vortex flow through horizontal orifices. Proc. ASCE 83 (1957) SA6.

11. A Kleinschroth. Strömungsvorgänge im Wirbelfallschacht. Institut für Hydraulik and Gewässerkunde. Technische Universität München. Mitteilungen Heft Nr. 8 Munich (1972).
12. Sotelo, Gilberto y Echavez, Gabriel. Un criterio para el diseño hidráulico de una cámara en espiral sobre una lumbrera. Informe del Instituto de Ingeniería. Febrero de 1971.
13. Knapp, F.M. Ausflub, Überfall und Durchfluß im Wasserbau. Verlag G. Braun, Karlsruhe.
14. Vischer, D. Wirbelfallschacht in Kanalisationen. Zwei hydraulische Modellversuche der VAW. Gas Wasswr Abwasser 51 (1971) Nr. 2.
15. Binnie, A. M. y Hookings, G. A. Laboratory experiments on whirlpools. Proc. Royal Society of London A 194 (1948)
16. Polet, M. Die graben Kanalisationsarbeiten im Pariser Ballungsraum. Der Tiefbau 50 (1969) Nr. 10.
17. Müller, R. Der Wasserbauliche Modellversuch. Suiza. Technische Zeitschrift Nr. 41/42, 20. Oktober 1955.
18. Jeanpierre, D. y Lachal, A. : Dissipation dénergie dans un puits à vortex. La Houille Blanche No. 7 - 1966.
19. Stefan, H. : Betrachtung zur Wirkungsweise von Wirbelfallschächten. Die Bautechnik 45 (1969) Nr. 7.
20. Szabó, I. : Einführung in die Technische Mechanik. 5. Aufl. Berlin Springer Verlag, 1961.
21. Drioli, C. Esperienze su installazioni con pozzo di scarico a Vortice. (Observations on vertical vortex shafts). L'Energia Electrica, Vol. 46, 1969, Nr. 6 p.p.399-409.
22. Pica, M. Scaricatori a vortice. (Vortex shafts). L'énergia Elettrica, Vol. 47, 1970, Nr. 4, pp 217-234.
23. Manual de diseño hidráulico de cajas de planta circular para el control de caudales descargados al drenaje profundo. D.G.C.O.H. y D.D.F. 1989.