



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

METODO ALTERNATIVO PARA DISEÑO DE
CAPTACIONES AL SISTEMA DE DRENAJE
PROFUNDO

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERIA
CIVIL (HIDRAULICA)
P R E S E N T A :
MIGUEL ANGEL RODRIGUEZ AVILES



DIR. DE TESIS: DR. GILBERTO SOTELO AVILA

MEXICO, D.F.

DICIEMBRE 2005



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.

*MARIA EUGENIA:
POR TU FORTALEZA Y APOYO QUE
SIEMPRE HE TENIDO DE TU PARTE.*

*ALEJANDRO HIJO QUE SIEMPRE
HAS SIDO Y SERAS MI FUENTE DE
INSPIRACIÓN EN MI VIDA*

*A LA MEMORIA DE MIS PADRES
FELIPE RODRIGUEZ Y
LUZ AVILES
DE MI TIO ENRIQUE SORIA
SABIENDO QUE SIEMPRE
ESTARAN CONMIGO*

A MIS HERMANOS GENOVEVA, ADALBERTO, DOLORES, FELIPE Y HORTENSIA, POR LO QUE HE RECIBIDO DE ELLOS COMO HERMANOS EN EL TRANSCURSO DE MI VIDA. ASI COMO A MIS SOBRINOS Y SOBRINAS.

GRACIAS A LA UNIVERSIDAD Y A MI FACULTAD DE INGENIERIA, ASI COMO A TODOS MIS MAESTROS Y COMPAÑEROS; QUE DE ALGUN MODO TUVE OPORTUNIDAD DE CONOCER Y TRATAR DURANTE ESTA ETAPA TAN IMPORTANTE.

MENCION APARTE AGRADEZCO AL DR. GILBERTO SOTELO AVILA, POR SUS CONOCIMIENTOS IMPARTIDOS. ASI COMO LAS AUTORIDADES DE LA DGCOH HOY SISTEMA DE AGUAS DE LA CIUDAD DE MÉXICO POR EL ACCESO A LA INFORMACIÓN Y EL LABORATORIO DE INGENIERIA EXPERIMENTAL CON EL QUE CUENTA LA DEPENDENCIA, EN FORMA PARTICULAR AL ING. JUAN CARLOS GUASCH Y SAUNDERS Y AL ING. JORGE CABALLERO AGUILAR.

“Estoy convencido de que en éste día somos dueños de nuestro destino, que la tarea que se nos ha impuesto no es superior a nuestras fuerzas; que sus acometidas no están por encima de lo que soy capaz de soportar. Mientras tengamos fe en nuestra causa y una indeclinable voluntad de vencer la victoria estará a nuestro alcance.

Winston Churchill

INDICE

I. INTRODUCCIÓN

II. OBJETIVOS

III. EL SISTEMA DE DRENAJE PROFUNDO

ANTECEDENTES
PROBLEMÁTICA
CRECIMIENTO URBANO
INUNDACIONES EN EL VALLE DE MÉXICO
EL SISTEMA DE DRENAJE PROFUNDO COMO SOLUCION

1. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

DESCRIPCION DE LAS ESTRUCTURAS EMPLEADAS
CAPTACIONES DEL SISTEMA DE DRENAJE PROFUNDO
REFERENCIAS

2. MODELO MATEMÁTICO

ANTECEDENTES
LUMBRERAS DE CAMARA ESPIRAL
METODO DE WILLI HAGER
METODO DE QUICK (ANÁLISIS DEL VORTICE ESPIRAL)
FLUJO EN LA LUMBRERA DE CAMARA ESPIRAL
DISIPACION DE ENERGIA AL PIE DE LA LUMBRERA
FORMULAS EMPÍRICAS PARA CALCULAR EL FLUJO DE AIRE EN LA LUMBRERA
LUMBRERAS DE RANURA VERTICAL
DESCRIPCION
CONDICIONES QUE SE PUEDEN PRESENTAR EN EL CANAL DE LLEGADA
ANALISIS DEL FLUJO EN LA LUMBRERA
CALCULO DEL GASTO TOTAL
VARIABLES DE DISEÑO
REVISION TEORICA DE LAS PRUEBAS REALIZADAS
DETERMINACION DEL REGIMEN DEL FLUJO EN EL CANAL DE LLEGADA A LA
CAPTACIÓN
FLUJO EN LA LUMBRERA
FLUJO DE AIRE EN LA LUMBRERA
ARREGLOS GEOMÉTRICOS DE LOS TUBOS DE DESCARGA EN EL FONDO DE LA LUMBRERA

3. MODELO EXPERIMENTAL

ANTECEDENTES
CONDICIONES HIDRÁULICAS POR SATISFACER ANTES DE UNA LUMBRERA DE CAIDA
GENERALIDADES
REGIMEN SUBCRÍTICO EN LE CANAL DE AGUAS ARRIBA
REGIMEN SUPERCRÍTICO EN EL CANAL DE AGUAS ARRIBA
REGIMEN CRITICO EN LA RANURA
SELECCIÓN DE LOS DISPOSITIVOS EXPERIMENTALES
DISEÑO Y SELECCIÓN DEL MODELO HIDRÁULICO
PROGRAMA EXPERIMENTAL
EXPERIMENTACION Y RESULTADOS OBTENIDOS
ESTUDIO DE DISTINTAS TRANSICIONES HORIZONTALES DEL CANAL DE APROXIMACIÓN
ESTUDIO DEL NÚCLEO DE AIRE
ESTUDIO DE ARREGLOS GEOMÉTRICOS EN OS TUBOS DE DESCARGA

4. TRABAJOS DE CAMPO

5. MANUAL DE DISEÑO

**INTRODUCCION
ANTECEDENTES
CONCLUSIONES
CANAL DE LLEGADA
FUJO EN LA LUMBRERA
FULUJO DE AIRE EN LA LUMBRERA
TUBOS DE DESCARGA
MANUAL DE DISEÑO**

ANEXOS

**A TABLAS Y GRAFICOS
B FIGURAS
C REPORTE FOTOGRAFICO DE LABORATORIO
D FOTOGRAFIAS DE RECORRIDOS EN CAMPO**

I.- INTRODUCCIÓN

La conexión entre el drenaje superficial y el drenaje profundo de la Ciudad de México se ha realizado mediante lumbreras de pequeño diámetro, alojadas en las lumbreras constructivas del Sistema de Drenaje Profundo. Estas obras han evolucionado tanto en la estructura alta que sirve de captación, como en la misma lumbrera y su descarga en el extremo inferior.

Los diseños actuales utilizan una ranura vertical sobre las paredes, también verticales, de una lumbrera cilíndrica, para introducir el flujo proveniente de un colector superficial al interior de la lumbrera adosada. Se produce la disipación parcial de la energía por fricción durante la caída y por impacto en el fondo, para después descargar en la dirección del túnel profundo. Esta solución ha sido la de mejores resultados, ya que elimina la cámara espiral antiguamente utilizada y la losa intermedia sobre la caída. Además dirige mejor la descarga hacia el túnel, con la ventaja de reducir de manera notable el costo de la obra y disminuir los espacios ocupados.

El diseño de la captación con ranura se ha buscado en resultados experimentales pero a la fecha no existe todavía un modelo matemático del flujo que reproduzca el funcionamiento de estas obras. Para ello a idea expresa del Dr. Gilberto Sotelo Avila se propone la elaboración de dicho modelo matemático con el cual obtener resultados que permitan predecir el funcionamiento y a la vez un modelo físico en el laboratorio que permita verificar dichos resultados.

El modelo matemático así elaborado debe tener la simplicidad necesaria para servir como instrumento de diseño de los proyectistas de manera que puedan preverse las variables más importantes que serían: capacidad de la lumbrera, dimensiones del núcleo central de ventilación, disipación de la energía a lo largo de la lumbrera y en su extremo final, así como los dispositivos, más adecuados para dirigir el flujo hacia el túnel y crear el colchón vertical para disipar mayor energía al pie de la lumbrera.

..

II.- OBJETIVOS

Efectuar mediciones en un modelo físico de estructuras de conexión al Sistema de Drenaje Profundo en el que puedan reproducirse condiciones extremas de funcionamiento y que además permita cambiar las variables adimensionales, principalmente aquéllas susceptibles de mayor variación en la práctica, con el fin de poder observar y verificar las condiciones de operación, para comparar distintas formas de solución y llegar a determinar la óptima.

En el presente estudio se propone también un modelo matemático con el fin de respaldar y comparar los resultados que se obtengan en el modelo experimental para tener acceso a los resultados obtenidos en una forma más sencilla y confiable. Dicho modelo está fundamentado en la teoría del flujo de vórtice en cámara espiral.

Elaborar un manual de diseño donde se concentren las experiencias anteriores donde se exponga el procedimiento general de diseño de las captaciones atendiendo a las múltiples condiciones de la práctica.

Difundir los resultados obtenidos en una o más revistas internacionales de prestigio para que se transmita la experiencia y se divulguen los resultados a nivel nacional e internacional.

III.- SISTEMA DE DRENAJE PROFUNDO

Ante la necesidad y problemática para el desalojo de las aguas residuales y pluviales generadas en el Valle de México, se requirió de un sistema de drenaje que no fuera afectado por los asentamientos del terreno, que no necesitara bombeo y que condujera las aguas fuera de la cuenca. Fue por ello necesario la construcción del Sistema de Drenaje Profundo de la Ciudad de México.

III.1. Antecedentes

El drenaje en la Ciudad de México funciona mediante un sistema combinado, es decir, en los mismos ductos se transportan las aguas residuales y las pluviales. Su estructura comienza en las redes secundarias y primarias, continúa en el sistema general del desagüe y el drenaje profundo, hasta desembocar en el río el Salto a través del Portal de Salida del Emisor Central. Posteriormente, el agua es conducida a la Presa Requena donde sigue su trayecto hasta el río Tula y la Presa Endó en le Estado de Hidalgo.

El Sistema General del Desagüe está formado por lagos, lagunas y presas de regulación, con una gran capacidad conjunta y canales a cielo abierto que incluyen el gran Canal del Desagüe y el Canal de Chalco, los Ríos San Javier, de los Remedios, Tlalnepantla, Cuauhtepac y Canal Nacional, así como los Ríos entubados de San Buenaventura, Churubusco, la Piedad, Consulado y Gran Canal. Además se debe considerar como río entubado el Gran Canal del Desagüe que corresponde al Distrito Federal

La infraestructura básica está formada por el Sistema de Drenaje Profundo, el cual abarca los Interceptores Centro-Poniente, Oriente, Oriente-Sur, Oriente-Oriente, Poniente, Centro-Centro, Canal Nacional, Canal de Chalco, Iztapalapa, Obrero Mundial y los Emisores Central y Poniente, referencias 9 y 10.

El Drenaje Profundo es la cuarta salida artificial y la de mayor capacidad. Trabaja por gravedad y surgió debido a la necesidad de incrementar sustancialmente la captación, conducción, desalojo oportuno y eficiente de las aguas pluviales y residuales, con gastos de operación que oscilan desde $20\text{m}^3/\text{s}$ hasta $220\text{m}^3/\text{s}$; a través de un conjunto de grandes conductos y túneles en operación, a profundidades que varían entre 15 y 220 m. Su operación a estas profundidades no se ve afectada por los hundimientos ocurridos en las capas superficiales, su estructura es resistente a los efectos de sismos y es económica a largo plazo, puesto que evita la instalación de plantas de bombeo en su trayecto.

En resumen toda el agua recolectada sale del valle por alguna de las cuatro salidas que se han construido figuras (III.1 y III.1.a):

- Tajo de Nochistongo.
- Primer túnel de Tequixquiac.
- Segundo túnel de Tequixquiac.
- Emisor Central.

III.2. Problemática

Los problemas se han incrementado en el transcurso del tiempo y han afectado directamente el funcionamiento de la Red General de Drenaje. Entre ellos se pueden mencionar los siguientes.

III.2.1 Crecimiento Urbano

Como se observa en la figura III.2, el crecimiento de la población a partir de 1940, fue explosivo y la tasa de incremento ha disminuido desde 1970, sin embargo, no sucedió lo mismo con el área urbanizada, que ha seguido aumentando con tasas altas debido a la disminución del índice de ocupación (habitantes por vivienda) que pasó de 5 a 4.

La red de drenaje fue rebasada en su extensión y capacidad con el crecimiento de la población y por el incremento de los escurrimientos pluviales, al disminuir las áreas de infiltración. Otro problema fue la necesidad de sobreexplotar el acuífero, debido a la necesidad de satisfacer la demanda de agua; ocasionando con esto hundimientos diferenciales en la Ciudad, los cuales repercutieron en el drenaje que estaba proyectado para trabajar por gravedad, y que después requirió de bombeo para elevar las aguas hasta el nivel del Gran Canal, con un gran incremento en los costos de operación y mantenimiento figuras III.3 y III.4 (referencias 8, 9 y 10).

III.2.2. Inundaciones en el valle de México

a) La precipitación media anual en el valle de México es de 700 mm, pues cada año (de mayo a octubre) se presentan lluvias que se caracterizan por su gran intensidad y corta duración, que producen flujos violentos acompañados de lodo, piedras y escombros de las barrancas del poniente de la ciudad. Esto ocasiona la acumulación de grandes cantidades de azolve en los componentes del sistema de drenaje por lo que, durante la época de estiaje, es necesario llevar a cabo su limpieza para recuperar la capacidad de conducción y regulación y dejar el sistema en condiciones óptimas de operación para la siguiente temporada de lluvias (referencia 8).

b) Los encharcamientos. Este tipo de problemas son probablemente los más sensibles para la población, ya que ocurren con frecuencia y afectan de manera directa la vida productiva cotidiana.

c) Las inundaciones. Generalmente son provocadas por tormentas de larga duración que cubren áreas extensas de la ciudad. Están asociadas a insuficiencias en el Sistema General de Drenaje y Control de Avenidas.

III.3 El Sistema de Drenaje Profundo como solución

Ante la problemática que se presentó para el desalojo de las aguas residuales y pluviales generadas en el Valle de México, se requirió de un sistema de drenaje que no fuera afectado por los asentamientos del terreno, que no necesitara bombeo y que condujera las aguas fuera de la cuenca; fue necesario construir el Sistema de Drenaje Profundo de la Ciudad de México.

Desde el punto de vista Geohidrológico, la cuenca del Valle de México es una gran olla cuyas paredes y fondo impermeables están constituidos por rocas volcánicas. Esa olla está rellena de sedimentos fluviales, lacustres y volcánicos que van desde arenas gruesas hasta arcillas con altos contenidos de agua. Dentro de este marco funciona el Sistema de Drenaje del Distrito Federal.

Sin el conjunto de obras del sistema de drenaje no sería posible dar una mejor solución al desalojo de las aguas de la ciudad.

A partir de 1975, año en que se concluyó la primera etapa del drenaje profundo, éste se convirtió en uno de los componentes más importantes del sistema de desagüe. Consta de varios interceptores para desalojar las aguas, que fluyen hacia un mismo conducto, denominado emisor. Por sus características de construcción y por la profundidad a que se encuentra, no se ve afectado por los hundimientos y opera por gravedad.

El drenaje profundo está compuesto actualmente por la red que se muestra en la figura III.1.

1. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

En este punto se procedió a obtener la información de estudios matemáticos y experimentales anteriores tanto en la DGCOH como en la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

1.1. Descripción de las estructuras empleadas

Se obtuvo información de la geometría de los proyectos de captaciones con ranura y de geometría similar, con el fin de identificar las partes que conforman este tipo de estructuras figuras 1.1 y 1.2, (referencias 4 y 5).

1.1.1 Captaciones del Sistema de Drenaje Profundo

Desde que se inició la construcción del sistema de drenaje profundo, la DGCOH se ha visto en la necesidad de utilizar distintos tipos de estructuras para controlar y conducir hasta dicho sistema, los caudales provenientes de los distintos subsistemas de drenaje superficial de la ciudad.

Una de las estructuras más comunes se conoce como captación y se localiza dentro de las lumbreras constructivas del drenaje profundo. Dichas estructuras tienen de 9 a 12 m de diámetro y son necesarias por motivos de construcción: cambios de dirección del túnel; apertura de frentes de trabajo; introducción y extracción de equipos de perforación, eliminación de los productos de excavación así como posteriormente por razones de operación y mantenimiento.

La captación consiste en una lumbrera vertical, con diámetro interior hasta de 3.0 m, adosada a la pared de la lumbrera constructiva para tener un mayor espacio en la operación y mantenimiento y permitir la circulación de aire u otros gases que se acumulan en los túneles como consecuencia de su operación. En el extremo superior de la lumbrera se conecta a un gran colector superficial; en el inferior descarga al túnel a través de un tanque intermedio y un vertedor o de modo directo mediante una curva vertical y un conducto horizontal dirigido hacia el túnel.

La DGCOH ha ideado y construido distintos tipos de captaciones que en esencia difieren en la forma de la entrada a la lumbrera vertical en su extremo superior o en la manera de descargar al túnel. En lo que se refiere a la forma de la entrada a la lumbrera se han probado principalmente tres tipos:

- 1.- Cámara guiadora de forma espiral.
- 2.- Descarga directa en caída libre de colector a lumbrera adosada.
- 3.- Canal de transición para cambiar gradualmente el ancho, desde el que tiene el colector madrina hasta el diámetro de la lumbrera, así como la pendiente desde la que tiene el colector madrina hasta la vertical que tiene la lumbrera.
- 4.- Lumbrera con ranura vertical.

En relación con la forma de descargar al túnel se han probado dos tipos:

- 1.- Descarga horizontal a través de orificios practicados en las paredes del extremo inferior de la lumbrera a un tanque construido por encima de la clave del túnel y en caída libre hasta el fondo de la lumbrera constructiva desde un muro vertedor.
- 2.- Descarga directa de la lumbrera al túnel a través de conductos cortos que dirigen el flujo.

En las figuras 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5 y 1.6 se muestran distintas combinaciones de estructuras de entrada y descarga de las captaciones (referencias 4, 5 y 11).

No obstante el funcionamiento adecuado de las estructuras antes indicadas en sus partes altas y bajas, la forma de la descarga del vertedor hacia el túnel del drenaje profundo constituye, en muchas de las captaciones diseñadas, una barrera que obstaculiza el flujo del agua proveniente del túnel y forma un remanso hacia aguas arriba que afecta su capacidad de conducción.

Lo anterior es ocasionado por la energía con que llega el flujo en el fondo de la lumbrera, con los consiguientes daños que genera esta condición en el recorrido del flujo por la estructura

Las actividades mencionadas fueron apoyadas con la observación en campo de aquellas obras ya construidas que estuvieran en operación, observando el buen o mal funcionamiento, la tendencia a la formación de daños en la obra en su posible origen y solución, las dificultades en la incorporación del caudal en el túnel profundo, la necesidad de procedimientos efectivos de disipación de la energía y la búsqueda de aquellos compatibles con las aguas residuales que conduce.

2. MODELO MATEMÁTICO

Dentro del presente estudio se propone la elaboración de un modelo matemático con el cual se pueda realizar la comparación y/o comprobación de los resultados que se obtengan en el estudio experimental

2.1. Antecedentes

La DGCOH ha utilizado ampliamente la combinación de cámara espiral y tanque intermedio con caída libre sobre un muro vertedor. Si bien éstas estructuras han probado ser confiables y seguras desde el punto de vista de disipación de energía, tienen el gran inconveniente de su alto costo de construcción debido a su gran tamaño y a que restan espacio en la lumbrera constructiva para las maniobras de mantenimiento del Sistema de Drenaje Profundo. El planteamiento teórico en éste tipo de estructuras está fundamentado en el estudio de Willi H. Hager, Relaciones Carga- Gasto, para Lumbreras Vórtice y en los realizados por los Doctores G. Sotelo y G Echávez en el Instituto de Ingeniería, referencias 1 y 3 respectivamente.

La cámara espiral obliga a que el flujo adquiera la forma de vórtice y lo introduce a la lumbrera en su extremo superior, formando una sección crítica que controla el gasto que ingresa para cada nivel de energía en la cámara. El movimiento del flujo genera éste vórtice que se transmite a lo largo del eje de la lumbrera forzando a que el agua se adhiera a las paredes y caiga siguiendo una forma helicoidal. Este movimiento permite que en la región próxima al eje de la lumbrera y en el sentido longitudinal, se forme un núcleo de aire estable y de buen tamaño que aleja la posibilidad

de que se presente una transición a tubo lleno, que puede llegar a producir, de manera brusca, ondas dañinas de oscilación en masa, presiones peligrosas en la estructura y reducción de su capacidad.

Este tipo de cámara espiral ha sido bastante utilizado en todo el mundo, incluso como obra de excedencia y se le considera un diseño muy eficaz para introducir el agua a la lumbrera en su extremo superior y lograr su descenso gradual vertical sin interferencias.

La descarga al túnel en caída libre, desde el muro vertedor del tanque intermedio hasta el piso, genera condiciones de gran turbulencia y una reducción en su capacidad por efecto de remansos que se generan en el flujo principal a lo largo del túnel que de ningún modo son recomendables en una obra de la magnitud y costo que tiene el Sistema de Drenaje Profundo.

Ante las desventajas de las cámaras espirales la, DGCOH se dio a la tarea de buscar otro tipo de estructura con un funcionamiento más eficiente, con un proceso constructivo más sencillo y por consiguiente más económico. Así se pensó en las caídas con cimacio el cual cambia gradualmente la dirección del flujo de horizontal a vertical. La lumbrera adosada descarga a su vez a uno o dos conductos cortos y horizontales en su extremo inferior, con la capacidad necesaria para descargar gastos intermedios en la dirección del túnel profundo pero que, con gastos mayores, necesitan de una carga de agua en la lumbrera que se incrementa con el gasto. La formación de la carga de agua en la lumbrera tiene la función de servir de colchón de amortiguamiento para la disipación de energía en la caída. También como resultado de la experiencia, la DGCOH ha decidido incorporar al sistema el canal de llegada antes de la estructura de caída, a fin de que gravite sobre la lumbrera constructiva y tengan que compensarse únicamente los asentamientos diferenciales con respecto a las demás obras, como el colector superficial y la caja de control o derivación de donde normalmente parte.

La obra propuesta elimina la cámara espiral y la sustituye por un canal de transición gradual, que busca introducir el agua de modo eficaz a la lumbrera. También elimina el tanque intermedio de disipación y la caída libre desde el muro vertedor, y los sustituye por conductos horizontales en el extremo inferior.

Hasta este punto la DGCOH obtuvo un avance notable en lo relativo a la descarga pero no tanto en la estructura superior, la cual produce todavía diseños complicados que ocupan mucho espacio y que son tan costosos como las cámaras espirales. En estas condiciones era importante idear una estructura más sencilla, más compacta y más económica que la cámara espiral, pero con la misma o mayor eficiencia.

En la búsqueda de otras alternativas se consultó la bibliografía existente, pero en todos los casos se encontró que a la cámara espiral se le considera como la estructura convencional más eficaz para este propósito. Sin embargo, M. Quick presentó en su artículo Análisis del vórtice espiral y del vórtice de ranura vertical en lumbreras de caída una solución que podía resolver el problema. La solución consiste en crear el vórtice producido por una captación en espiral, con una captación a base de ranura vertical, como la designa Quick, que crea el mismo efecto de flujo helicoidal en la lumbrera de caída, (referencia 2).

Con ello se planteó una solución simplificada para introducir el agua en el extremo superior de una lumbrera vertical, mediante un muro guía del flujo de aproximación tangencial a su pared y una ranura vertical cortada sobre la curva de dicha pared, equivalente al arco circular de un cuadrante del perímetro; esto es, un ángulo central de 90° (figura 2.1). Dicho arreglo fue originalmente ideado para captar el agua desde un embalse, no desde un colector, pero realmente es muy simplificado, requiere menos espacio y es por lo tanto más económico.

De acuerdo con las primeras pruebas de realizadas, el diseño de ranura vertical propuesto produce al inicio de la caída en la lumbrera un efecto de vórtice, similar al de la cámara espiral y genera el mismo flujo helicoidal con todas sus ventajas. Esto es, el flujo produce un núcleo de aire estable, que permite la auto ventilación de la caída y propicia un flujo libre del riesgo de oscilaciones y de la condición de llenado total.

Para estas condiciones de operación, el flujo que entra por la ranura viaja en derredor de la lumbrera, regresa a la ranura pero en dirección perpendicular e interfiere con el entrante, situación que afecta la capacidad de la ranura para admitir un gasto siempre creciente y que, con cargas grandes (gastos mayores), disminuye esa capacidad de admisión. Sin embargo, se advierte que aunque las condiciones del flujo y su análisis son bastantes diferentes al de la cámara espiral la relación gasto-carga, con límites razonables en ambos casos, es bastante similar, de forma casi lineal y los gastos teóricos y medidos son muy similares.

La idea de utilizar lumbreras de vórtice a base de ranura vertical, como una alternativa de captación para el Sistema de Drenaje Profundo de la Ciudad de México, tuvo como antecedente el arreglo de Quick, con la variante de que se agregó un segundo muro guía paralelo al primero a una distancia especificada. Ambos muros forman un canal rectangular de ancho " b ", adecuado a las necesidades de un flujo de aproximación en un colector superficial, como se muestra en las figuras 2.2 y 2.3, donde se repiten las condiciones de operación previamente identificadas.

Las condiciones del flujo de aproximación en el nuevo arreglo cambiaron respecto de las propuestas originales de Quick, por lo que fue necesario revisar la teoría y sobre todo realizar los experimentos necesarios para conocer bien los distintos aspectos del comportamiento, de modo que pudiera ser considerada como una nueva alternativa de captación.

Es obvio que la solución tiene muchos atractivos como los que ya se han señalado en la sustitución de la cámara espiral; pero también es cierto que se pensó que la solución es demasiado sencilla para ser adecuada y que era muy probable que no tuviera la misma capacidad de respuesta que la cámara espiral.

Con los estudios realizados en modelos físicos de captaciones de ranura vertical a escala en el Laboratorio de Ingeniería Experimental de Xotepingo de la DGCOH, se ha podido observar su funcionamiento hidráulico, tanto en forma cualitativa como cuantitativa, de donde se han ido tomando los criterios de diseño para estas captaciones.

2.2. Lumbrreras de Cámara Espiral

Estas lumbrreras son las que tienen una mayor eficiencia desde el punto de vista hidráulico, no siendo lo mismo desde el punto de vista constructivo y de operación. No obstante, es de gran utilidad conocer el análisis teórico de las condiciones del flujo, ya que de ahí se han obtenido las variantes posteriores de este tipo de estructuras

2.2.1. Método de Willi Hager

Una descripción hidráulica de lumbrreras de cámara espiral debe incluir los siguientes puntos de interés o de estudio: entrada a la lumbrrera, desarrollo del flujo a lo largo del eje de la misma, características de aireación y desfogue de la lumbrrera.

Las lumbrreras verticales de cámara espiral tienen una geometría típica como se muestra en la figura 2.4, (referencias 1 y 12). El canal de aguas arriba es rectangular, de ancho b y tirante h de flujo. La distancia entre su eje longitudinal y el eje de la lumbrrera se representa por a , y el radio de la lumbrrera es R . La pendiente del fondo en la cámara espiral es igual a la del canal de aproximación de manera que se pueda llegar a establecer un flujo uniforme, esto es, que la carga con respecto al fondo del canal permanezca constante .

Las lumbrreras de cámara espiral son dispositivos de descarga libre; de esta forma se tiene que tomar en cuenta que haya un núcleo central de aire lo suficientemente grande en el centro de la lumbrrera, de modo que la sumergencia aguas abajo no se presente. En analogía con flujos en canales abiertos, donde las líneas de corriente son aproximadamente paralelas, las condiciones de flujo crítico corresponden a un gasto máximo para tirantes fijos aguas arriba. El gasto es entonces una relación única de la carga aguas arriba $H = h + V^2/2g$, donde V es la velocidad media de aproximación. Estas condiciones de flujo han sido investigadas por Pica, (referencia 13) obteniendo la siguiente ecuación para el gasto:

$$Q = \frac{\pi R^2 \sqrt{2g(h+f)}}{\sqrt{\left(\frac{1}{\mu^2}\right) - \left(\frac{\pi R^2}{bh}\right)^2}} \quad (1)$$

donde las variables son

$$\mu = 0.95 - X \quad (2)$$

$$h = \frac{\pi a R}{b} \mu_0 \quad (3)$$

$$\mu_0 = \frac{3}{2} \frac{1 - X^2}{1 - X^3} \frac{\mu}{\sqrt{1 - \frac{\mu^2}{(1 - X^2)^2}}} \quad (4)$$

donde

b ancho del canal de aproximación

f desnivel en el canto a la entrada de la lumbrera

g aceleración de la gravedad

h tirante del flujo de aproximación

Q gasto

R radio de la lumbrera

μ coeficiente de gasto

μ_0 parámetro auxiliar

X relación de radios del núcleo central de aire y del radio interior de la lumbrera R_i / R

R_i radio del núcleo de aire.

Sustituyendo la ec. (2) en la (4), μ_0 queda únicamente en función de X , como se presenta en la figura 2.5 También, dibujada como una curva discontinua se muestra la representación gráfica de la expresión

$$\mu_0 = \frac{9}{2} (1 - \sqrt{X})^{3/2} \quad (5)$$

que se puede considerar como una aproximación de la relación original para todos los valores posibles de X , $0 \leq X \leq 0.95$. Utilizando las ecuaciones (3) y (5), el tirante h de aguas arriba se puede expresar de la siguiente forma:

$$h = \frac{9\pi a R}{2b} (1 - X)^{3/2} \quad (6)$$

donde

$$X = \left[1 - \left(\frac{2bh}{9\pi a R} \right)^{2/3} \right]^2 \quad (7)$$

La ecuación (2) queda de la siguiente manera:

$$\mu = 0.95 - \left[1 - \left(\frac{2bh}{9\pi a R} \right)^{2/3} \right]^2 \quad (8)$$

La altura de caída f a la entrada es comúnmente más pequeña que el tirante h del flujo aguas arriba (figura 2.4). Por lo tanto, considerando $f = 0$, y además con:

$$y = \frac{bh}{aR} \quad (9a)$$

$$q = \frac{Q\sqrt{b}}{\sqrt{g a R^5}} \quad (9b)$$

como el tirante y gasto adimensionales del flujo de aproximación, respectivamente, la ecuación se puede escribir como:

$$q = \frac{\pi \sqrt{2y}}{\sqrt{\frac{1}{\mu^2} - \left(\frac{\pi R}{y a}\right)^2}} \quad (10)$$

donde μ se obtiene de la ecuación (8), como sigue

$$\mu = 0.95 - \left[1 - \left(\frac{2y}{9\pi} \right)^{2/3} \right]^2 \quad (11)$$

De lo anterior, el gasto q adimensional es función sólo del tirante y del flujo aguas arriba y del parámetro (R/a) . Es conveniente introducir las magnitudes siguientes:

$$h_0 = \frac{aR}{b} \quad (12 a)$$

$$Q_0 = \sqrt{\frac{g a R^5}{b}} \quad (12 b)$$

de forma que $y = h/h_0$ y $q = Q/Q_0$

donde

- a distancia entre el canal de aguas arriba y el eje de la lumbrera
- h_0 tirante típico del flujo de acuerdo con la ecuación 12
- H carga de energía a la entrada
- q gasto adimensional

- Q_o gasto típico de acuerdo con la ecuación 12
- v velocidad media aguas arriba
- y tirante relativo del flujo aguas arriba.

Se puede observar que h_o y Q_o dependen únicamente de las características geométricas de la entrada a la lumbrera de vórtice. Las ecuaciones (10) y (11) se representan gráficamente en la figura 2.6, donde se puede observar que el efecto de R/a sobre $q(y)$ es insignificante para $0 < R/a < 0.5$. Por lo que el valor usual de R/a es entre 0.4 y 0.5; la relación carga – gasto se convierte entonces en una curva única para condiciones arbitrarias en la entrada de la lumbrera.

Con el fin de tener la aireación suficiente en la lumbrera, el área de la sección hidráulica máxima en ella debe ser menor del 90 por ciento del área transversal completa de la lumbrera, de modo que $X > 1/3$ aproximadamente. Sustituyendo en la ecuación (7) se obtiene que $y_{m\acute{a}x} = 4$ y $\mu_{m\acute{a}x} = 0.626$ de la ecuación (11). El gasto máximo posible se obtiene entonces: $q_{m\acute{a}x} = 5.7$ de acuerdo con la ecuación (10), correspondiendo a

$$Q_{m\acute{a}x} = R^2 \sqrt{8 g h_{m\acute{a}x}} \quad ; \quad h_{m\acute{a}x} = \frac{4 a R}{b} \quad (13)$$

Para $0.5 \leq y \leq 4$, la función $q(y)$ se puede remplazar por la línea recta

$$y = \frac{2}{3} q + \frac{1}{6} \quad (14)$$

Al observar que el segundo término del lado derecho es más pequeño que el primero, la ecuación anterior se puede aproximar como sigue

$$y \approx \frac{q}{\sqrt{2}} \quad (15)$$

en términos adimensionales es

$$Q \approx \sqrt{\frac{2 g b R^3}{a}} h \quad (16)$$

Con un valor medio de $R/a \approx 1/2$ se tiene

$$Q = R \sqrt{g b h} \quad (17)$$

En consecuencia, el gasto aumenta linealmente con el radio de la lumbrera (R) y el tirante (h) del flujo de aproximación.

El presente estudio realizado por Willi Hager conduce a la relación carga – gasto de lumbreras de cámara espiral verticales; con las conclusiones siguientes:

1. La relación carga – gasto se puede representar por una curva única $q(y)$ de acuerdo con las ecuaciones (10) y (11). Las propiedades típicas “ h_0 ” y “ Q_0 ” dependen únicamente de la geometría de la entrada a la lumbrera. Una vez que éstas se determinan, la figura 2.6 permite la obtención inmediata de las características en el flujo.
2. El tirante máximo posible del flujo y el correspondiente gasto máximo son: $h_{máx} = 4aR/b$ y $Q_{máx} = R^2 \sqrt{8g h_{máx}}$, respectivamente, con el fin de que el flujo en la lumbrera sea estable y suficientemente aireado.
3. Las ecuaciones (10) y (11) propuestas se pueden considerar como relaciones universales gasto – carga para lumbreras de cámara espiral con condiciones subcríticas en el flujo de aproximación.

2.2.2. Método de Quick. Análisis del Vórtice Espiral

En la estructura de cámara espiral estudiada por Quick, figura 2.7 (referencia 2), el diseño del muro guía espiral se mantiene con la misma geometría reportada por Hager (referencia 14), el cual queda definido por la expresión

$$R = C^* e^{kq}$$

que es el patrón de líneas de corriente de forma espiral definido por la combinación ideal del flujo de un sumidero y un vórtice irrotacional, demostrado por Vallentine (referencia 15),

donde

q ángulo del chorro en el muro

R radio definido con el ángulo q

C^* es constante que queda definido por radios especificados con dos valores de q

k es constante que se define como la anterior

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

De acuerdo con Binnie y Hookings (referencia 16), en las estructuras de cámara espiral estudiadas con anterioridad, el flujo es crítico en la sección contracta de estrangulamiento. En consecuencia, el gasto es máximo para la carga dada y condiciones de vórtice.

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. Por lo tanto, el control se comparte entre la sección de estrangulamiento y el torbellino producido en el flujo de aproximación.

Cálculo 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 próximos a los obtenidos experimentalmente.

El método parte de la energía específica en la sección crítica y supone una distribución de vórtice libre. La obtención del gasto se efectúa con el siguiente procedimiento:

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

$$c = k r \sqrt{2gh}$$

donde

- c constante de vórtice
- k constante menor que uno con el fin de iniciar el procedimiento de cálculo
- r radio de la lumbrera
- h energía total en el flujo de aproximación
- g aceleración de la gravedad.

1. Se calcula un valor inicial de r_0 (radio del flujo de aire en la sección crítica), introduciendo el valor inicial de c con la siguiente expresión:

$$r_0^2 = \frac{c^2 \pm \sqrt{c^4 + 16c^2 r^2 gh}}{8gh}$$

2. Con el mismo valor de c se hace una aproximación de la velocidad de entrada con la siguiente ecuación

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

donde

- u_m velocidad total a la entrada para el radio
- R_m radio máximo a la entrada.

3. Se estima la velocidad tangencial del vórtice en la sección crítica (u_b) mediante la expresión:

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

4. La primera estimación del gasto se obtiene con la siguiente ecuación:

$$Q_1 = \pi(r^2 - r_0^2) \sqrt{2gh - \frac{c^2}{r_0^2}}$$

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

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

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

7. 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 $\Delta V = V' - V$

8. 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.

2.2.3. Flujo en la Lumbrera de Cámara Espiral.

Antes de la cámara espiral se produce un flujo casi horizontal. En la lumbrera, la componente horizontal de la velocidad disminuye debido a la fricción con las paredes, en tanto que la vertical aumenta con la caída.

El flujo en la lumbrera es de tipo espiral o vórtice lo que permite su adherencia a las paredes. 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.

2.2.4. Disipación de Energía 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 de 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 operan en este tipo de captaciones.

La disipación de energía puede ocurrir después del cambio de dirección del flujo o directamente en el extremo inferior de la lumbrera. En el primer caso se puede lograr la disipación de la energía si se coloca en el fondo de la lumbrera una curva con un estrangulamiento de la sección transversal ya que se produce una reducción y un colchón de agua al pie de la lumbrera. La ampliación que sigue junto con la reducción de la velocidad, produce un ascenso del aire arrastrado a la superficie libre. En el segundo caso, un colchón de agua en el fondo de la lumbrera es una buena solución, así se puede reducir el impacto con el que llega el agua en dirección vertical.

2.2.5. Fórmulas Empíricas para calcular el Flujo de Aire en la Lumbrera

De acuerdo con mediciones realizadas por Viparelli en relación con el arrastre de aire ocasionado por el flujo a través de una lumbrera, se distinguen dos casos, el primero es una descarga libre del flujo hacia aguas abajo de la lumbrera, en tanto que el segundo es una descarga ahogada en el interior de la misma.

Para el primer caso Viparelli determinó que la capacidad de la lumbrera era importante si la conducción del agua es tan brusca que el núcleo del vórtice prácticamente se cierra. Además concluyó que para obtener el flujo de aire arrastrado Q_a utilizar la siguiente ecuación.

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

donde

Q_m gasto de agua para un llenado total en la lumbrera

Q_a gasto de aire arrastrado

Q gasto descargado.

El valor de Q_m se obtiene de la expresión siguiente

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

donde

f factor de fricción de Darcy

r radio de la lumbrera

g aceleración de la gravedad.

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

$$\frac{Q_a}{Q_{alim}} = 0.043 \sqrt[3]{\frac{l^2}{D^2}}$$

donde

D diámetro de la lumbrera

l longitud de la lumbrera.

Q_{alim} gasto de aire una vez que el agua alcanza su velocidad límite y se obtiene de la siguiente expresión

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

donde

Q gasto de agua

n coeficiente de Manning.

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

Cuando se tiene una transición a tubo lleno en el tramo aguas abajo de la lumbrera, Viparelli determinó que la cantidad de aire arrastrada es de 1/4 a 1/5 del valor que se tendría si fuese descarga libre, la ecuación a aplicar sería:

$$\frac{Q_a}{Q} = 0.0225 \sqrt{\frac{h^3}{D^3}}$$

donde

h longitud de la lumbrera en la que se presenta caída libre.

En este caso también se puede utilizar la expresión propuesta por Dawson y Kalinske que es

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

donde

V velocidad media del flujo de agua

V_a velocidad media del flujo de aire

2.3. Lumbreras de Ranura Vertical

En el presente estudio se hace un mayor énfasis en el planteamiento teórico y matemático de este tipo de captaciones, ya que son las que han dado hasta el momento mejores resultados dentro del Sistema de Drenaje Profundo al Sistema de Aguas de la Ciudad de México (referencia 2). Además, las variantes que se obtengan para hacer más eficientes éstas estructuras estarán respaldadas en los principios matemáticos, así como en los fundamentos de la Hidráulica General que han sido considerados en los estudios e investigaciones relacionados con el tema.

2.3.1. Descripción

Las condiciones de flujo y análisis de esta estructura son bastante diferentes a las de caída con muro de guía espiral. Sin embargo las relaciones carga –gasto de ambas son muy similares, así como el núcleo de aire estable que se genera en las dos estructuras. Algunas de las ventajas de esta estructura sobre la de muro de guía espiral son la facilidad en el proceso constructivo y su menor tamaño, que la hace especialmente adecuada para instalaciones subterráneas.

La lumbrera consiste en un tubo vertical con una ranura rectangular a 90^0 en su parte superior, con un muro guía vertical que conduce el flujo de aproximación hacia la ranura, figura 2.1.

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 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, figura 2.3.

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.

2.3.2. Condiciones que se pueden presentar en el canal de llegada

A continuación se mencionan las diferentes condiciones de flujo que se pueden presentar en el canal de llegada. Cabe aclarar que el presente estudio, tanto desde el punto de vista teórico como experimental, se refiere únicamente a la condición de flujo crítico en la ranura y régimen subcrítico en el canal de llegada.

1. Régimen subcrítico en el canal de aguas arriba

La condición del flujo en la sección 1, figura 2.10, queda representada por el punto *B* de la figura 2.11; hacia atrás, el nivel de energía va en aumento por efecto de las pérdidas Δh_r que se presentan; lo cuál puede provocar remansos hacia aguas arriba que restan eficacia a las cajas de control o a las estructuras de llegada. Por ésta razón, se puede presentar la necesidad de un desnivel Δz descendente entre la sección 1 y la ranura

2. Régimen supercrítico en el canal de aguas arriba

Para el caso donde se conoce el tirante en la sección 1, figura 2.10, y el cálculo es hacia aguas abajo, donde se pueden presentar a su vez dos casos:

a) Las condiciones del flujo en la sección 1 quedan representadas por el punto *D* de la figura 2.11, donde $E_l \leq H$, el salto hidráulico debe de evitarse en el tramo de transición y para ello se tiene que cumplir que

$$\Delta z > \Delta z_c$$

donde

$$\Delta z_c = H - E_l$$

sirve para compensar la pérdida de fricción en la transición y evitar pérdidas de energía por la presencia del salto en la misma, posibles ahogamientos y un cambio de régimen hacia aguas arriba.

La condición anterior implica cambiar del punto *D* al punto *F*, figura 2.11, no existiendo régimen crítico en la ranura, pero sí próximo a ella.

Será entonces necesario analizar el caso de un desnivel Δz descendente en el tramo de transición, que garantice la permanencia de un régimen supercrítico en el mismo.

3. Régimen crítico en la ranura

Considerando que el ancho de ranura en éste caso es $b_3 = D/2$ y que en ella se establece régimen crítico de energía específica mínima $E_c = H$, se cumple que

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

$$A_c = \frac{D}{2} d_c$$

$$V_c = \frac{Q}{A_c} = \frac{2Q}{D d_c}$$

$$V^2 = \frac{4Q^2}{d_c^2 D^2}$$

Sustituyendo la última ecuación

$$H = d_c \cos \theta + \frac{4Q^2}{2g d_c^2 D^2} = d_c \cos \theta + \frac{2Q^2}{g d_c^2 D^2}$$

por lo tanto

$$\frac{Q}{\sqrt{g} D} = \sqrt{\frac{1}{2}} d_c \sqrt{H - d_c \cos \theta}$$

Si

$$d_c \cos \theta = \frac{2}{3} H$$

se obtiene

$$\frac{Q}{\sqrt{g} D} = \sqrt{\frac{1}{2}} \frac{2}{3} \frac{H}{\cos \theta} \sqrt{\frac{H}{3}} = \sqrt{\frac{2}{27}} \frac{H^{\frac{3}{2}}}{\cos \theta}$$

Dividiendo entre $D^{3/2}$ resulta

$$\frac{Q}{\sqrt{g} D^{5/2}} = \sqrt{\frac{2}{27}} \frac{1}{\cos \theta} \left(\frac{H}{D} \right)^{3/2} \quad (I)$$

de otra forma

$$\frac{H}{D} = \left(\frac{27}{2}\right)^{1/3} \left[\frac{Q}{\sqrt{g} D^{5/2}} \cos \theta \right]^{2/3} \quad (\text{II})$$

La ley de gastos contra energía específica mínima H en la ranura está dada por las últimas dos ecuaciones en cualquiera de sus dos formas. Esta ley puede cambiar por la interferencia del chorro retornante en la lumbrera, pero en lo posible se tiene que tratar su vigencia en el intervalo más amplio posible, al menos cuando el flujo en el canal de aproximación sea subcrítico

2.3.3. Análisis del Flujo en la Lumbrera

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 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, figura 2.3.

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

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

donde ρ , Q_0 , V_0 , son condiciones en la sección 1 que permanecen prácticamente constantes, ρ es la densidad del agua, q_m es el gasto por unidad de tirante en el flujo de aproximación, V la velocidad media en la sección 2 , q_s el gasto por unidad de tirante del chorro lateral 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

$\int_e^A \rho q_m V dh$ 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 la velocidad del chorro lateral en el sitio de impacto con el chorro principal se reduce a cero, el momentum que se produce con la velocidad original del chorro lateral ($\rho Q_s V_s$) se sustituye por una presión omnidireccional de igual valor que el momentum.

Integrando el primer término de la ecuación (a) se obtiene

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

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

$$\rho Q_0 V_0 = \rho c_D g \frac{D}{2} H^2 \quad (b)$$

donde

h profundidad de un punto debajo de la línea de energía
 D diámetro de la lumbrera de caída

Integrando los sumandos del segundo término de la ecuación (a), se obtiene

$$\int_e^A \rho q_m V dh = \rho c_D \frac{D}{2} g A^2 \quad (c)$$

$$\int_A^H \rho (q_m + q_s) V dh = \rho c_D \frac{D}{2} k^2 g (H^2 - A^2) \quad (d)$$

donde

k 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, es decir

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

donde

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

Sustituyendo las ecuaciones de la (b) a la (e) en la ecuación (a) se obtiene la expresión que permite calcular el factor k , conocidos A , H , α . La ecuación resultante es

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

El factor k en el punto siguiente será de utilidad para la determinación del gasto total

2.3.4. Cálculo del Gasto Total

El gasto total se define por el flujo de aproximación δq_m y la parte del chorro retornante que regresa al flujo de aproximación

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

Debajo de la intersección del chorro retornante con el principal, éste último ocupa la fracción $1-f$ y el retornante la f , (figura 2.8).

Realizando operaciones algebraicas e integrando la ecuación (g), 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 la siguiente

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

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) figura (2.9), de donde se obtiene lo siguiente:

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

donde

Q es el gasto principal entrante.

Además, por el momentum vertical en el muro, de la figura 2.9 se obtiene

$$Q V \sen \theta = Q_d V - Q_u V \quad (j)$$

Al despejar Q_d de las ecuaciones (i) y (j) e igualarlas, se obtiene la definición de α en la siguiente forma

$$\frac{Q_u}{Q} = \frac{1}{2}(1 - \text{sen}\theta) = \alpha \quad (\text{k})$$

α factor de reducción del gasto para el flujo retornante

El ángulo θ se define de la caída libre del chorro, como se ve en la figura 2.9

$$U_0 \approx \sqrt{g H_c} \quad (1)$$

donde H_c es el tirante crítico.

El tiempo t para que el chorro alcance el muro es

$$t = \beta \frac{\frac{\pi}{2} D}{U_0} \quad (\text{m})$$

La velocidad vertical v del chorro en el muro será

$$v = g t \frac{g \beta \frac{\pi}{2} D}{\sqrt{g H_c}} \quad (\text{n})$$

El ángulo θ queda definido por la expresión

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

donde

- θ ángulo que forma la caída del chorro con la horizontal (figura 2.9).
- v velocidad vertical del chorro en el muro
- U_0 velocidad horizontal del chorro
- β fracción de la circunferencia atravesada por el chorro
- D diámetro de la lumbrera
- H carga en el flujo de aproximación

La geometría considerada consiste en tres cuartos de círculo y β toma un valor de 0.75

-Cálculo del Tirante A de Intersección del Chorro

Los dos chorros bidimensionales indicados en la figura 2.9 se pueden también utilizar para calcular A , tirante de intersección del chorro. Con una conservación perfecta de energía, el agua en el chorro salpicante ascendente se elevaría a la altura H de la superficie libre, donde la velocidad es cero.

El flujo de salpicadura se mueve con una velocidad horizontal U_0 , por lo que la altura máxima de salpicadura alcanza 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. En consecuencia el tiempo de caída antes de alcanzar el punto de intersección está dado por la ecuación (m).

Calculando el valor de A como caída libre, se obtiene

$$A = \frac{1}{2} g t^2 \quad (o)$$

$$A = \frac{1}{8} \beta^2 \pi^2 \frac{D^2}{H_c} \quad (p)$$

$$A H_c = \frac{1}{8} \pi^2 \beta^2 D^2 \quad (q)$$

El lado derecho es una constante del sistema, de manera que el producto $A H_c$ es constante si H_c es igual a $2/3$ de H

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

En resumen, el procedimiento de cálculo es el siguiente:

1. El factor β queda definido por la geometría y es 0.75 para este caso, debido a que el flujo recorre tres cuartos de un círculo.
2. El ángulo θ de incidencia del chorro, asociado al chorro ascendente de salpicadura, se calcula de la ecuación (ñ).
3. El factor α de reducción del flujo para el flujo retornante se calcula con la ecuación (k)
4. La ecuación (r) se utiliza para calcular A .
5. El factor k de reducción de la velocidad se calcula de la ecuación (f).
6. Finalmente, Q_T se calcula con la ecuación (h).

2.4. Variables de Diseño

Para el diseño de una estructura de captación al Sistema de Drenaje Profundo, deben determinarse ciertas variables que intervienen en el comportamiento del flujo, entre las que se encuentran:

- Gasto
- Velocidad del agua en el canal de aproximación
- Elevación del terreno natural
- Altura de caída del agua
- Distancia y pendiente entre la caja de derivación y la caja de control
- Distancia y pendiente entre la caja de control y la lumbrera de caída
- Elevación de plantilla y diámetro del túnel profundo.

La variable de mayor importancia en el diseño de una captación es el gasto de diseño, ya que en caso de que éste llegue a ser superado, aumentará la posibilidad de riesgo de daños, por lo cual se requiere que éste sea lo más confiable posible.

Adicionalmente, al gasto de diseño se unen las condiciones geométricas, ya que de ambos depende el diámetro de la lumbrera adosada, el empleo de uno o dos tubos de desfogue, el grado de ahogamiento y la presión en el fondo de la lumbrera.

El diámetro interior de la lumbrera constructiva juega un papel importante ya que dentro de ésta se adosará la lumbrera de caída y la estructura amortiguadora. Para determinar en primer instancia algunas de las variables que intervienen, se realiza un dimensionamiento preliminar de algunas de las estructuras para realizar posteriormente el diseño definitivo de éstas.

Para llevar a cabo el diseño de las estructuras de conexión se requiere conocer qué gastos se descargarán a éstas, por lo que deben realizarse simulaciones del funcionamiento hidráulico de la red de drenaje por captar, requiriendo como datos, tanto la información geométrica de la red como los hidrogramas de descarga a cada colector.

Para la elaboración de estos hidrogramas existen manuales elaborados por la DGCOH, en los que se recomienda el uso de hidrogramas para un período de retorno (T_r) de 10 años.

Dentro del desarrollo y objetivo de este trabajo se considerará el gasto de descarga como un dato de proyecto, el cual será establecido de acuerdo con las políticas de operación que se manejan en la DGCOH.

2.5. Revisión teórica de las pruebas realizadas

En éste punto se realizó la comprobación y/o revisión de las pruebas, utilizando la teoría de M Quick en el análisis de vórtice para ranura vertical y los principios de la Hidráulica que ahí intervienen.

2.5.1. Determinación del régimen del flujo en el canal de llegada a la captación

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 de la ranura resultan:

$$q_3 = \frac{Q}{b_3}$$

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

$$H_3 = H_c = \frac{3}{2} y_3$$

donde

Q	gasto de entrada a la lumbrera
y_3	tirante crítico en la ranura para el gasto de entrada
H_3	energía específica en la sección de la ranura
b_3	ancho de ranura en el modelo = $D/2$.

2. Tramo entre las secciones 1 y 3

En la transición de ancho debe cumplirse que

$$H_1 = H_3 + h_{1-3} \quad (1)$$

donde

$$h_{1-3} = hf_{1-3} + hc_{1-3} \quad (2)$$

donde

hf_{1-3}	representa a las pérdidas por fricción
hc_{1-3}	son las pérdidas por conversión.

Para la condición de flujo en estado crítico en la sección 3 se cumple que

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

De la ecuación de Manning se tiene que

$$hf_{1-3} = \left[\frac{Sf_1 + Sf_3}{2} \right] L_{1-3} \quad (4)$$

donde

Sf_1 pendiente hidráulica en la sección 1.

Sf_3 es la pendiente hidráulica en la sección 3.

L_{1-3} es la distancia entre las dos secciones.

Si además, es

$$Sf_i = \left[\frac{Qn}{A_i Rh_i^{2/3}} \right]^2 \quad (5)$$

donde

i representa la sección considerada

n es el coeficiente de Manning = 0.016.

Para la sección 1 se llega al siguiente grupo de ecuaciones

$$A_1 = b_1 y_1$$

$$Rh_1 = \frac{b_1 y_1}{b_1 + 2y_1} \quad (6)$$

$$Sf_1 = \left[\frac{Qn}{A_1 Rh_1^{2/3}} \right]^2$$

Las pérdidas por conversión se calculan con la expresión siguiente

$$hc_{1-3} = kc \left| \frac{V_1^2 - V_3^2}{2g} \right| \quad (7)$$

donde

kc 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.

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

$$y_1 + \frac{V_1^2}{2g} = y_1 + \frac{q_1^2}{2g y_1^2} = H_1$$

la cual se puede escribir de la siguiente forma

$$y_1^3 - H_1 y_1^2 + \frac{q_1^2}{2g} \quad (8)$$

Proponiendo diferentes valores para y_1 y utilizando las ecuaciones anteriores, se obtiene la tabla 2.1 ver anexo A, en éste caso, para el gasto máximo ensayado.

De la mencionada tabla se tomaron como buenos los valores más parecidos de H_1 para la determinación de y_1 , el cual tiene que ser mayor que y_{c1} para confirmar que existe régimen subcrítico aguas arriba de la ranura.

3. Régimen crítico en la ranura

Se determinaron las curvas adimensionales con las condiciones de régimen crítico en la ranura y régimen subcrítico en el canal de llegada, para su comparación con lo obtenido en laboratorio con las mediciones realizadas.

-Utilizando la ecuación de cantidad de movimiento, se determinó que el tirante y_3 que se presenta en la sección final del canal de llegada, se obtiene con la siguiente expresión:

$$y_3 = \frac{2}{3} y_c$$

considerando que al final del canal se presenta una caída libre y suponiendo que en dicha sección la presión en el fondo es cero y que la sección crítica se presenta poco antes de la caída libre, los resultados se presentan en el anexo A, (tabla A3, y figuras A2 y A3).

-Se toma en cuenta la expresión obtenida experimentalmente por Rouse que es

$$y_3 = 0.715 y_c$$

ver resultados en el anexo A, (tabla A4, y figuras A2 y A3).

-Considerando el tirante crítico en la ranura

$$y_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}$$

los resultados se presentan en el anexo A, (tabla A5, y figuras A2 y A3).

2.5.2. Flujo en la lumbrera

1. Determinación del gasto total en la lumbrera en una captación de ranura vertical, utilizando el criterio de Quick.

Para el cálculo del flujo en la lumbrera se siguió el procedimiento mencionado al final del inciso 2.3.3.-Análisis del flujo en la lumbrera de éste mismo capítulo, con las siguientes consideraciones.

Flujo crítico en la ranura

Del inciso anterior 2.5.1, H_3 es igual a H en la siguiente expresión

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

$$\beta = 0.75$$

El ángulo θ queda definido con la siguiente expresión

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

El factor de reducción α es

$$\frac{Q_u}{Q} = \frac{1}{2} (1 - \text{sen} \theta) = \alpha \quad (k)$$

Para el cálculo de A se utiliza la siguiente expresión

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

El factor k de reducción de velocidad resulta de

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

El tirante crítico del inciso 2.5.1 y_3 es igual a H_c , es decir

$$y_3 = H_c$$

Los resultados se presentan en el anexo A, (tabla A6 y figuras A4 y A5).

2.5.3. Flujo de aire en la lumbrera

Con relación a éste inciso, para las lumbreras de ranura vertical se tomaron como referencia los estudios realizados en la referencia 5, donde se recomienda que el área transversal del núcleo de aire en el centro de la lumbrera adosada se encuentre por sobre el 20 por ciento del área total de la lumbrera, con el fin de reducir el riesgo de que se presenten gastos que, para una geometría determinada, provoquen ahogamiento en la captación, reduciendo su capacidad de aireación y de conducción del gasto.

Una de las principales variantes que se recomiendan en el presente estudio tiene que ver con el área del núcleo de aire; para lo cual se parte de la recomendación anterior y en el modelo se propone un círculo concéntrico.

En función de lo anterior se determinó teóricamente lo siguiente:

$$A_c = \frac{\pi d_c^2}{4} \qquad A_L = \frac{\pi d_L^2}{4}$$

donde

A_c	área del núcleo de aire
D_c	diámetro del núcleo de aire
A_L	área de la lumbrera
D_L	diámetro de la lumbrera

Para el modelo en el que se realizaron las mediciones se utilizaron dos diámetros para la sección circular concéntrica que se está proponiendo en el presente estudio. Se tiene como dato el diámetro de la lumbrera en el modelo igual a, $D_L = 0.1$ m, y se obtuvieron los siguientes resultados

$$\begin{aligned} A_L &= 0.0078 \text{ m}^2 \\ A_c &= 0.2 * A_L = 0.00156 \text{ m}^2 \\ d_c &= 0.044 \text{ m} \end{aligned}$$

En los ensayos realizados se comprobó que el diámetro máximo d_c no provocara interferencia al flujo entrante y en el modelo utilizado fue de $d_c = 0.04$ m. Para el mencionado diámetro se obtuvo el siguiente resultado $A_c = 0.16$ y $A_L = 0.00125 \text{ m}^2$.

El resultado anterior se consideró como bueno ya que de acuerdo con las mediciones realizadas no provocaba interferencia alguna con el flujo entrante y además el área A_c está garantizada en el espacio en el que la lumbrera no trabaja a presión.

2.5.4. Arreglos geométricos de los tubos de descarga en el fondo de la lumbrera

En lo que corresponde a éste inciso se tomaron como base las pruebas realizadas con anterioridad en el Laboratorio de Ingeniería Experimental de la DGCOH.(referencia 5), debido a las distintas variantes que se ensayaron, tanto en la geometría como en los diámetros de los desfuegos en el mencionado estudio. Los resultados experimentales obtenidos en el mencionado estudio son de gran utilidad para determinar el tirante h_L que se establece en el fondo de la

lumbreira, para diámetros específicos de la lumbreira adosada y de el o los tubos de desfogue al túnel del drenaje profundo, correspondiente al gasto de diseño.

A continuación se hace mención de la metodología utilizada en dicho estudio, para la determinación de h_L .

1.- Datos necesarios de la captación:

- Q gasto de diseño
- D diámetro de la lumbreira adosada
- C_L altura de caída en la lumbreira
- D_T diámetro del túnel.

2. Se propone un diámetro D_0 del orificio u orificios de descarga y se obtiene la relación D_0 / D ; en el caso de dos orificios, D_0 es el diámetro equivalente de los mismos

3. Se inicia con un coeficiente de descarga inicial $c_d = 0.60$

4. Se obtiene el parámetro adimensional $c_d * D / D_0$, se entra a la gráfica adimensional correspondiente a la geometría de la descarga figuras 2.12 y 2.13, se obtiene h_L / D .

5. Despejando el valor de h_L se calcula el coeficiente de descarga con la siguiente expresión:

$$c_d = \frac{4Q}{\pi D_0^2 \sqrt{2g h_L}}$$

6. Si el valor de c_d obtenido es igual al propuesto, el proceso concluye y se toma como bueno el valor de h_L obtenido; en caso contrario, el proceso se repite a partir del paso 4.

A continuación se presentan los cálculos realizados de acuerdo con el modelo utilizado en éste estudio haciendo uso de las gráficas adimensionales de la referencia 5.

Los datos que se manejaron como constantes fueron los siguientes:

- D diámetro de la lumbreira = 3.5 m.
- Q gasto de diseño (gasto máximo) = 37.3 m³/s
- C_L altura de caída libre en la lumbreira = 17.5 m. En éste caso no se tomó en cuenta el diámetro del túnel considerando que se encontraba trabajando a tubo lleno.
- D_T diámetro del túnel = 5.00 m.

Se realizaron tres diferentes propuestas en los tubos de descarga

1. Con un solo orificio $D_0 = 3.00$ m.
2. Con un solo orificio $D_0 = 2.60$ m.
3. Con dos orificios $D_1 = 1.05$ m.; $D_2 = 1.95$ m.

Los resultados se presentan en el anexo A, (tablas 2.7 y 2.8).

3. MODELO EXPERIMENTAL

El planteamiento de Quick para las lumbreras de ranura es en forma teórica y verifica experimentalmente algunos resultados. Aplicarlos a una estructura, significa adaptar dicho planteamiento a la serie de condiciones hidráulicas y situaciones geométricas en que se presenta cada problema en la práctica, lo que no es tarea fácil partiendo sólo de dichos resultados. Fue así que el Dr. Gilberto Sotelo Ávila planteó a la DGCOH la necesidad de desarrollar un programa experimental, en el cual se propuso la realización de un modelo físico a escala para cubrir las necesidades del mayor número posible de casos que puedan presentarse en una captación.

3.1. Antecedentes

Con el fin de evaluar el funcionamiento hidráulico de las captaciones en lumbreras de caída con ranura vertical, diseñadas con los criterios establecidos, a partir de los resultados experimentales obtenidos en modelos previos, la DGCOH ha continuado la experimentación en modelos hidráulicos de las diferentes captaciones que se han ido requiriendo en el Sistema de Drenaje Profundo. Dichos modelos han sido realizados en el Laboratorio de Ingeniería Experimental de Xotepingo.

El procedimiento seguido en los modelos consiste principalmente en la medición del perfil hidráulico, así como el de observar y determinar las características del flujo que circula sobre cada una de las estructuras que conforman en conjunto la captación en estudio.

En el inicio de la etapa experimental se estudió la captación planteada por Quick, con algunas variantes como la inclusión de un muro guía paralelo al propuesto por Quick en su idea original. Los resultados que se obtuvieron en esta etapa fueron muy promisorios en cuanto a la factibilidad de utilizar el arreglo geométrico estudiado como una alternativa eficiente y más económica que las usadas con anterioridad. Sin embargo, fue necesario continuar con los estudios de experimentación, como complemento de la primera, que permitiera conocer el trabajo de la estructura para algunos arreglos específicos que no se pudieron considerar en la etapa inicial. Los resultados de esta segunda etapa originaron mejorar la eficiencia, tanto en los tubos de descarga al túnel profundo, como en el ancho del canal de aproximación.

Ante la necesidad de conocer con mayor detalle el comportamiento de la captación de ranura vertical, se continuó con la etapa experimental en la que se estudiaron distintas transiciones horizontales en el canal de aproximación.

En vista de que el presente estudio no corresponde propiamente a una estructura específica. Lo primordial era diseñar y construir un dispositivo experimental, en el que fuera posible realizar las pruebas, con el fin de procesar en forma adecuada los resultados y mediciones obtenidos; para determinar algunos parámetros adimensionales importantes, característicos de los estudios realizados y establecer la correlación entre las distintas variables y la generalización buscada.

3.2. Condiciones hidráulicas por satisfacer antes de una lumbrera de caída

Los estudios experimentales con lumbreras de caída con base en vórtice de ranura se han enfocado a la factibilidad de utilizarlas en condiciones semejantes a las de cámara espiral.

3.2.1. Generalidades

En las captaciones con lumbrera de ranura vertical, el agua se introduce mediante un canal rectangular de ancho variable (b_1 a b_3), que en las captaciones es la continuación, de las cajas de control. Dicho canal conduce un gasto máximo de operación con una energía específica cuya magnitud, es difícil de modificar sin alterar las condiciones de escurrimiento aguas arriba del canal.

Por otro lado, la captación admite caudales que crecen de acuerdo con la ley que los relaciona directamente con la energía específica en el canal de aproximación que la alimenta. Esta ley ha sido obtenida experimentalmente y coincide con la ley obtenida de la teoría del régimen crítico en la sección de la ranura.

El planteamiento consiste en lograr que la ley de descarga de la lumbrera de captación $Q - H$ se ajuste a las condiciones hidráulicas $Q - E$ con las que llega el flujo en el canal de aproximación que la alimenta, a fin de garantizar una buena operación de ambas estructuras.

La ley de descarga de la lumbrera difiere según el tipo de régimen que se tenga en el canal de aproximación. En éste punto se menciona las distintas condiciones hidráulicas que se pueden presentar en el canal de aproximación.

En el presente trabajo se analizará únicamente que las condiciones en el canal de aproximación sean de régimen subcrítico y que el flujo en el ingreso a la ranura sea en régimen crítico.

3.2.2. Régimen subcrítico en el canal de aguas arriba

El gasto total que desea captarse es Q y siendo b_1 el ancho de la sección antes de la transición figura 2.10 las condiciones de régimen en dicha sección quedan representadas por la rama superior de la curva de parámetro $q_1 = Q/b_1$, figura 2.11.

Si $b_3 = D/2$ es el ancho de la ranura, el gasto unitario es $q_3 = Q/b_3$, y en lo posible se presenta la condición de régimen crítico en dicha ranura, representado por el punto C figura 2.11. La sección de la ranura se convierte en sección de control y el cálculo del perfil será en dirección contraria al flujo.

3.2.3. Régimen supercrítico en el canal de aguas arriba

Esta condición puede ocurrir porque la pendiente del colector de llegada sea grande o bien como resultado de la descarga de una o varias compuertas que, de cualquier forma producen aguas arriba un régimen subcrítico con sus consabidos efectos.

En éste caso la sección de control donde se conoce el tirante, es la sección 1 y el cálculo se realiza en la dirección que lleva el flujo.

Esta condición de régimen supercrítico en el canal de aguas arriba no se considera en el presente estudio.

3.2.4. Régimen crítico en la ranura

Esta condición es la que se consideró en el presente estudio, para poder llevar a cabo la comparación entre los resultados obtenidos en forma experimental con los del planteamiento matemático, ya que la teoría de éste último está fundamentada en la consideración de la sección crítica cerca de la entrada de la lumbrera.

3.3. Selección de los dispositivos experimentales

El diseño y construcción del dispositivo experimental y del modelo de la captación, parten de las investigaciones previas, así como del aprovechamiento de los modelos que existen en el Laboratorio de Ingeniería Experimental y que puedan ser de utilidad en el presente estudio. En primera instancia se consideró la utilización de un modelo en el que se pudieran simular diferentes dimensiones.

El modelo en cuestión es un sistema a superficie libre donde la fuerza de gravedad es la más importante, quedando en segundo término las fuerzas viscosas y de inercia, por lo que el número de Froude debe ser igual en el prototipo y en el modelo de manera que se debe de cumplir lo siguiente:

$$1 = v_e / (g_e / l_e)^{1/2}$$

donde

v_e escala de velocidades
 g_e escala de aceleraciones de gravedad
 l_e escala de líneas

Considerando que $g_e = 1$, esto es que las aceleraciones de gravedad son iguales en el modelo y en el prototipo, se obtiene lo siguiente:

$$v_e = l_e^{1/2} \quad \text{escala de velocidades}$$

$$Q_e = l_e^{5/2} \quad \text{escala de gastos}$$

Para la selección de la escala de líneas se consideró, el espacio disponible en el laboratorio para la ubicación del modelo, capacidad del caudal del laboratorio, los diámetros comerciales de tubería para modelar las descargas, succiones, el sistema de aforo, el tipo de bombas a utilizar y las dificultades de medición en el modelo.

El inicio del programa experimental, tuvo contemplado observar el funcionamiento hidráulico del modelo de la captación de ranura vertical, de acuerdo con las nuevas ideas y obtener el mejor funcionamiento de las condiciones hidráulicas que tiene el flujo durante su recorrido; como lo es en la llegada y en la propia caída en la lumbrera, así como en el desfogue de la misma.

En virtud de la gran cantidad de variantes que se tiene de estas estructuras en la práctica, en el capítulo anterior se realizó el análisis teórico del funcionamiento en conjunto de la estructura con el fin de comparar los resultados obtenidos con los del modelo utilizado en el laboratorio de tal forma que se determinara lo siguiente:

La identificación de la principales variables geométricas e hidráulicas que intervienen en el fenómeno; por mencionar algunas se tienen las siguientes: ancho de ranura, determinación del gasto de descarga, diámetro de la lumbrera, características del flujo en la lumbrera, revisión del núcleo de aire, de la energía excedente y de la energía disipada, revisión del conducto de descarga, modificar el fondo curvo en la descarga del colector a la lumbrera, ver la posibilidad de que no se modifique la geometría del colector de llegada a la lumbrera.

El agrupamiento de las variables anteriores para constituir los parámetros adimensionales que describan con fidelidad la manera en que se comporta el flujo a través de la descarga.

Una representación simple de las distintas geometrías de los arreglos en los conductos de descarga, con la suficiente flexibilidad para el diseño de estructuras posteriores.

La introducción en el análisis de aquellos términos, coeficientes o variables difíciles de definir por las ecuaciones básicas y sujetos a verificación experimental.

3.4. Diseño y selección del Modelo Hidráulico

Una buena parte del dispositivo experimental ya existía en el Laboratorio de Ingeniería Experimental de la DGCOH. A continuación se enuncian las partes que lo conforman, con las características geométricas que constituían el modelo en su forma original.

Lumbrera constructiva:

Diámetro	34.29 cm
Altura	67.11 cm

Lumbrera adosada:

Diámetro	10.00 cm
Altura	67.00 cm

Tubo de desfogue:

Diámetro	6.97 cm
----------	---------

Cajón de conducción:

Ancho	11.43 cm
Alto	11.43 cm
Longitud	46.86 cm

Transición:

Longitud	31.71 cm
Ancho inicial	10.00 cm
Altura	

Ranura vertical:

Ancho	5.00 cm
Altura	

Vertedor triangular:

Angulo	60.00°
Tara	26.95 cm
μ	0.60
k	1.15

La lumbrera adosada se representó mediante un tubo de lucita; el corte hecho en el tubo para representar a la ranura vertical, fue desde la plantilla del canal de llegada hasta su bordo superior. El canal de aproximación se realizó también de lucita, y se instaló entre la lumbrera adosada y la caja de control existente en el modelo. Una de las paredes del canal era tangente a la pared de la lumbrera para simular el muro guía, la otra pared adoptó posiciones variables para representar anchos de ranura variables b_3 y la pendiente del canal fue $S_0 = 0$.

Para medir el gasto empleado en las pruebas, el modelo ya contaba con una estructura de aforo antes de la caja de control, unida a ésta por medio de un canal rectangular. El vertedor en cuestión, fue un vertedor de pared delgada de forma triangular con un ángulo $\theta = 60^\circ$.

La ecuación utilizada para la determinación del gasto fue la de la Universidad Católica de Chile:

$$Q = \frac{8}{15} \sqrt{2g} \tan \frac{\theta}{2} \mu k h^{5/2}$$

donde

- Q gasto vertido, en m^3/s
- g aceleración de la gravedad
- μ coeficiente experimental que depende de h y θ
- k coeficiente que depende de B/h
- h carga sobre el vertedor en m
- θ ángulo en el vértice del vertedor

3.5. Programa Experimental

El presente programa consistió en modificar la geometría de las captaciones con el fin de mejorar las condiciones hidráulicas, tanto de operación y capacidad de conducción de las mismas, así como la consideración del procedimiento constructivo. Por lo anterior, el procedimiento será el siguiente:

1. El diámetro de la lumbrera adosada D se mantuvo constante variando únicamente los gastos en los ensayos los cuales serán los gastos de operación.
2. Modificando el fondo curvo en el canal de llegada, eliminación del cimacio, para trabajar con una pendiente $S_0 = 0$.
- 3.- Modificando la relación que existe entre el ancho de ranura b_3 , con el diámetro de la lumbrera adosada D la cual hasta el momento es $b_3 = D/2$ proponiendo una relación mayor y otra menor.
- 4.- Variando la relación entre b_3 y b_1 modificando el ángulo θ .
- 5.- Determinación de las curvas adimensionales $\frac{H}{D}$ vs $\frac{Q}{\sqrt{g} D^{5/2}}$ para los casos anteriores.
- 6.- Estudio de arreglos geométricos de los tubos de descarga al túnel profundo.

Para la identificación de la notación de las variables ver figura 2.10

3.6. Experimentación y resultados obtenidos

El objetivo de los experimentos fue determinar la capacidad de la lumbrera con ranura vertical para diferentes condiciones en los ensayos.

3.6.1. Estudio de distintas transiciones horizontales del canal de aproximación

De pruebas ya realizadas en el Laboratorio de Ingeniería Experimental de la DGCOH, referencia 5, se observó que para valores entre 1.0 y 2.0 de la relación b_1/D , y de θ entre 30° y 45° tienen poca influencia en la gráfica adimensional que relaciona los siguientes términos:

$$\frac{Q}{\sqrt{g} D^{\frac{5}{2}}} \text{ vs } \frac{H}{D}$$

Lo anterior quiere decir que se puede utilizar, cualquier valor de b_1/D y θ dentro de los límites especificados; sin modificar sustancialmente la capacidad de la captación, siempre que el flujo de aproximación en el canal de llegada sea subcrítico.

Dentro de la misma referencia, se recomienda utilizar en el diseño de éstas captaciones, la porción de las gráficas de los términos adimensionales, a la izquierda del límite superior acotado figura 2.12. Esta recomendación es con el fin de mantener el área transversal del núcleo de aire en el centro de la lumbrera, por sobre del 20 % del área transversal de la lumbrera adosada; esto con el fin de reducir el riesgo de que se presenten gastos que para una geometría determinada ahoguen la captación, reduciendo su capacidad de aireación y de capacidad de captación del flujo.

Además de los arreglos experimentales ensayados se obtuvo que para un valor de $Q / (g^{1/2} D^{5/2})$ menor de 0.9, se presentan capacidades mayores que el estado crítico, en el caso de que sea mayor que 0.9 ocurre lo contrario. Esto se debe a que para la segunda condición el flujo retornante dentro de la lumbrera incide contra el entrante en la ranura.

Con base en lo anterior, las consideraciones que se tomaron en el presente estudio para realizar las pruebas en el modelo, fueron las siguientes:

1. El ancho del canal de llegada b_1 , así como su longitud, no se modificaron, permaneciendo constantes en todas las pruebas.
2. Con relación al ancho b_3 de la ranura, se realizaron pruebas en las que se redujo el valor original, modificando con esto las relaciones con b_1 y θ pudiendo comprobar lo mencionado con anterioridad; en el sentido de que no se obtiene beneficio alguno en los resultados con ésta modificación y sí en cambio afecta la capacidad de conducción del canal de llegada lo cual no es recomendable. Con lo anterior, el modelo quedó con los siguientes valores en el presente estudio:

$$b_3 = D/2$$

$$\theta = 18.2^\circ$$

Los resultados de las mediciones realizadas en el modelo con la finalidad de determinar las condiciones hidráulicas del flujo en el canal de llegada y la obtención de los parámetros adimensionales correspondientes, se presentan en el anexo A, (tablas A1, A2 y figuras A1y A3).

3.6.2. Estudio del Núcleo de Aire

En el presente estudio, se tuvo como propósito mantener el área transversal del núcleo de aire, en la lumbrera de caída, por encima del 20 por ciento del área transversal de la misma; con el fin de reducir el riesgo de que se presenten gastos que para una geometría determinada, ahoguen la captación reduciendo su capacidad de aireación y de captación del gasto de operación.

Se propuso por primera vez en éste tipo de estructuras, colocar una sección circular concéntrica dentro de la lumbrera adosada, con el propósito de poder mantener el núcleo de aire mencionado.

Con lo anterior y partiendo de garantizar el 20 por ciento del núcleo de aire se obtuvo que el diámetro necesario era, $d_n = 4.4 \text{ cm}$ para el diámetro de lumbrera de $D = 10.00 \text{ cm}$. Se realizaron pruebas con los siguientes diámetros, 4.0, 3.0 y 2.0 cm.

De las pruebas realizadas se pudo determinar que el diámetro mayor del elemento concéntrico propuesto para éste modelo y que no provocaba interferencia en el flujo entrante, fue $d_n = 4.0 \text{ cm}$ que corresponde al 16 % del área total de la lumbrera adosada.

3.6.3. Estudio de arreglos geométricos en los tubos de descarga

Para éste caso, los resultados experimentales obtenidos en la referencia 5 son de gran utilidad para determinar el tirante h_L que se establece para diámetros específicos de la lumbrera adosada y del o los tubos de desfogue al túnel profundo, y que corresponde al gasto de diseño. En el capítulo anterior se mencionó una metodología para la determinación de h_L utilizando los resultados experimentales señalados.

Vale la pena aclarar, que no es recomendable generalizar los resultados obtenidos en lo que se refiere a las descargas, ya que las características geométricas e hidráulicas de cada captación son diferentes, no obstante, se recomiendan para determinar en forma preliminar las condiciones que se pueden presentar en la captación.

El resto de la geometría del modelo se mantuvo igual realizándose también pruebas con la modificación del círculo concéntrico dentro de la lumbrera adosada. Los resultados que se compararon en lo teórico y experimental fueron con la condición de tener el túnel lleno en el fondo de la lumbrera y el gasto máximo de operación ingresando a la lumbrera.

4.- TRABAJOS DE CAMPO..

Como apoyo y complemento a la etapa experimental, se realizaron visitas de campo a captaciones en operación, localizadas a lo largo de la red del Drenaje Profundo, con la finalidad de observar su funcionamiento y la problemática que en su caso han tenido durante su operación.

Dentro de esta actividad, se propuso a la DGCOH la necesidad de realizar visitas a diversas estructuras que se encuentren en operación y que pueden ser, en lo posible, útiles para el presente estudio. Con base en lo anterior y en coordinación con la Unidad Departamental de Planes Hidráulicos Delegacionales y con el área de Operación del Sistema de Drenaje Profundo, se realizó la visita a las siguientes estructuras.

1. Lumbreira 2 del Interceptor Oriente. Esta lumbreira se encuentra ubicada en Apatlaco y Eje 3 Oriente.
2. Lumbreira 1-B del Interceptor Oriente y Lumbreira 3 del Interceptor Semi - profundo Canal Nacional Canal de Chalco. Ubicada en Calzada Taxqueña y Eje 3 Oriente.
3. Planta de Bombeo Zaragoza y Lumbreira 7 Interceptor Oriente – Sur. Localizada en Calzada Ignacio Zaragoza y Río Churubusco; esta captación es del tipo de ranura vertical.

4. Captación Iztaccihuatl, ubicada en Calzada Ignacio Zaragoza y Av. Iztaccihuatl. Dentro del sistema de drenaje se encuentra entre la Lumbreira 8 del Interceptor Oriente – Sur y la Lumbreira 5 del Interceptor Oriente. Esta captación es de caída libre.

5.Lumbreira 2 Interceptor Centro – Centro. Ésta lumbreira se localiza entre Roa Barcenas y Juan A. Mateos. Es una captación de tipo espiral y recibe el flujo del Colector 10.

6.Lumbreira 6 Interceptor Central, localizada en Av. Cuauhtémoc y Av. Álvaro Obregón. Esta captación alivia el colector Tabasco, el cual desaloja el drenaje de la colonia Roma; es una captación de caída libre.

En vista de que no se pudo bajar a las estructuras anteriores, se procedió a realizar una inspección visual desde la superficie y tomar fotografías (anexo B) de las condiciones en que se encuentran debido a los daños ocasionados durante su operación. En función de lo visto y de los comentarios realizados por el personal de la DGCOH, se concluyó que los principales problemas que se tienen en las estructuras de conexión al drenaje profundo son las siguientes:

- Caída y erosión de recubrimientos de concreto, debido al arrastre de aire e impacto del agua en su recorrido.
- Corrosión en elementos metálicos, tanto en armados estructurales como compuertas y mecanismos de control.
- Ventilación y aireación.
- Liberación de gases, los cuales en época de estiaje, los olores son bastante desagradables
- Con la presencia de gastos extraordinarios en época de lluvias, el nivel del agua en las lumbreras ha estado cerca de desbordarse. Bajo éstas condiciones, se generan empujes adicionales en las paredes de las lumbreras y las compuertas de control.
- Reducir la energía con que el flujo llega al fondo de la lumbreira, con el fin de disminuir los daños en las estructuras, así como también mejorar la incorporación del flujo de la captación hacia el Sistema de Drenaje Profundo.

5. MANUAL DE DISEÑO

Con objeto de divulgar de manera nacional e internacional, el presente estudio de captaciones al Sistema de Drenaje Profundo, auspiciado por la DGCOH, se elaboró un manual de recomendaciones; que pueda ser utilizado en el proyecto de obras futuras similares, no sin antes mencionar que para observar el comportamiento de la estructura de manera cualitativa y cuantitativa es recomendable la construcción de un modelo físico.

5.1. Introducción

Dado que varias de las principales ciudades del interior de la República están creciendo día con día, tanto en extensión territorial como de población; los problemas en sus sistemas de drenaje crecen año con año, los cuales en algunos casos han sido insuficientes, ocasionando problemas de inundaciones. Por lo anterior, es probable que en el futuro algunos casos requieran de un sistema de drenaje similar al de la Ciudad de México, pudiendo ser de utilidad el presente estudio.

La elaboración del manual de recomendaciones propuesto esta respaldado, de acuerdo con los criterios teóricos utilizados, así como los resultados experimentales obtenidos. Además de exponer un procedimiento general de diseño de captaciones, de acuerdo con las condiciones que se presentan en la realidad

Se pretende que el manual se encuentre al alcance tanto de instituciones y proyectistas interesados, con el fin de utilizarlos en estudios posteriores.

5.2. Antecedentes

De acuerdo con los resultados en los estudios realizados por la DGCOH, se ideó un método iterativo para determinar el diámetro requerido en una lumbrera de ranura vertical, referencia 4.

El método mencionado ha hecho las veces de manual de diseño para éste tipo de captaciones hasta la actualidad. El desarrollo del método es el siguiente:

1. Conocida la geometría del canal de aproximación, como es el ancho, la altura y la distancia entre la caja de control y la lumbrera, se determina la carga máxima h que puede aceptar el canal de llegada antes de trabajar a presión.
2. Con el gasto de diseño Q se calcula la carga de velocidad $v^2/2g$.
3. Se obtiene $H = h + v^2/2g$.
4. Se propone un diámetro de la lumbrera D , que inicialmente puede ser el doble del ancho del canal de llegada b .
5. Con H/D y b/d se entra a las curvas de la figura 2.13, donde se relacionan éstos parámetros con $Q / (g^{1/2} D^{5/2})$, se calcula el gasto Q para el diámetro propuesto D .
6. Si el gasto anterior es igual o mayor al de diseño se tiene el diámetro buscado; en caso contrario se repiten los pasos 4 y 5.
7. Se verifica que la geometría de la lumbrera sea congruente con la del canal de aproximación y con la disposición de las estructuras que conforman la captación, como son, caja de control y rejillas, lumbrera constructiva, descarga al túnel profundo.

5.3. Conclusiones

A continuación se mencionan las conclusiones del presente estudio, de acuerdo con los resultados obtenidos, en lo teórico y experimental. En el recorrido del flujo a través de la captación.

5.3.1. Canal de llegada

En ésta parte de la captación fue factor primordial que en el canal de llegada se estableciera un régimen subcrítico, cómo se demuestra en la tabla A1 del anexo A en forma teórica y experimental; una vez determinada ésta condición se concluyó lo siguiente:

1. Se determinó la eliminación del cimacio que se venía usando en las captaciones en la llegada a la lumbrera proponiéndose una pendiente $S_0 = 0$ o en su caso mantener la pendiente del canal de llegada.
2. Se eliminó también la posibilidad de cualquier obstáculo o modificación en la plantilla del canal con el fin de variar las condiciones del flujo.
3. En lo que se refiere a las relaciones entre el ancho del canal de llegada y el ancho de ranura con el diámetro de la lumbrera, se mantuvieron constantes con los siguientes valores $b_1 / D = 1.0$ y $b_3 / D = 0.5$ respectivamente. La relación de b_1 / D se eligió ya que en los resultados de la gráficas adimensionales que se presentan en la figura 2.13 (referencia 4) se observa poca variación con respecto a las de valores mayores cómo son $b_1 / D = 1.31$ y 2.61 . Considerando también que uno de los problemas principales en éstas obras es el espacio del que se dispone.
4. La condición de régimen crítico en la ranura quedó comprobada tanto en forma experimental cómo teórica, ya que la curva de la primera quedó comprendida entre las obtenidas con el principio de cantidad de movimiento y el criterio de Rouse para un canal de pendiente cero y con caída libre al final del mismo (referencia 7). Los resultados se presentan en las tablas A2, A3, A4, A5, y figuras A1, A2, A3 del anexo A.

5.3.2 Flujo en la lumbrera

Con relación a éste punto, fue posible observar en el modelo y realizar la comprobación en forma teórica, la importancia del flujo vórtice, dentro de la lumbrera, así como la manera en que afecta el flujo retornante al flujo principal. También cómo se produce el arrastre de aire en el acceso del flujo a la lumbrera, los resultados se presentan en las tablas A2, A6 y figura A4. En los resultados obtenidos se puede observar que la mayor similitud, en la forma y pendiente de las gráficas teórica y experimental, en función de la carga H a la entrada de la lumbrera, se presenta para gastos Q dentro de un intervalo que varía entre 20 y 40 m³/s. El mencionado intervalo se recomienda tomarlo como el rango de operación en el diseño de las lumbreras.

Se determinó en forma teórica; que en las curvas adimensionales $(H/D - Q / (g^{1/2} * D^{5/2}))$ la teoría de Quick, para el cálculo del flujo en la lumbrera queda dentro de la misma curva teórica para flujo crítico, con diferencia en sus valores, dicha variación es menor dentro del rango de gastos entre 20 y 40 m³/s ya mencionado, los resultados se encuentran en la tabla A6 y figura A5.

5.3.3. Flujo de aire en la lumbrera

En éste estudio se propone por primera vez, la colocación de un elemento cilíndrico concéntrico a la lumbrera adosada, con el propósito de mantener un núcleo de aire constante dentro de la lumbrera, al menos donde ésta no trabaje con carga. Otra ventaja que se pudo observar en el laboratorio es que contribuye en gran forma, a la circulación del flujo en su recorrido dentro de la lumbrera, aumentando su contacto con las paredes de la

misma, incrementándose la pérdida de energía del flujo por fricción con las paredes del nuevo elemento y la lumbrera.

En las pruebas realizadas para éste modelo específico el diámetro máximo que no provocó interferencia en el flujo entrante fue $d_c=0.04m$ y cuya área resultó $A_c=16\% A_L$.

5.3.4. Tubos de descarga

En lo que se refiere a los tubos de descarga, se propone el procedimiento de cálculo realizado en la referencia 5 para calcular la carga h_L dentro de la lumbrera, la cual será utilizada para generar un espejo de agua al pie de la lumbrera con el fin de disipar la energía con que llega el flujo en el fondo, para éste estudio específico los resultados se presentan en las tablas A7 y A8 del anexo A.

Es conveniente mencionar lo difícil que es poder generalizar los resultados en éste punto, debido a que las captaciones difieren en la realidad, por sus condiciones Topográficas y Geométricas en su incorporación al Sistema de Drenaje Profundo.

5.4. Manual de diseño

De acuerdo con estudios realizados con anterioridad y las conclusiones del presente estudio, se presenta el método ya utilizado con las variantes obtenidas en éste estudio:

1. Proponiendo la geometría del canal de llegada, cómo es ancho, altura y la distancia entre la caja de control y la lumbrera, se determina la carga máxima h que puede aceptar el canal antes de trabajar a presión, teniendo cómo gasto máximo de operación $Q_{máx} = 40.0 m^3/s$, de acuerdo con lo obtenido en el presente estudio.
2. Con el gasto de diseño Q se calcula la carga de velocidad $v^2/2g$.
3. Se obtiene $H = h + v^2/2g$.
4. Se propone un diámetro de lumbrera D igual al ancho del canal de llegada b_1 .
5. Con H/D y $b_1/D = 1$ se entra a la figura A3 donde se relacionan éstos parámetros con $Q / (g^{1/2} * D^{5/2})$.
6. Si el gasto anterior es igual o mayor al de diseño se tiene el diámetro buscado en caso contrario se repite el proceso.
7. Se verifica que la geometría de la lumbrera sea congruente con la del canal de aproximación, con la disposición de las estructuras que conforman en conjunto la captación.

ANEXO A

TABLAS Y GRAFICOS

Qmax. 37.3 m³/s
 n 0.016 g 9.81 m/s²
 b3 1.75 m b1 3.5 m.
 L(1-3) 5.32 m

Tabla A-1

q3	yc3	H3	P3	A3	Rh3	Sf3	v3
m ³ /s/m	m.	m	m.	m ²	m.		m/s
21.31	3.59	5.387	8.932	6.284	0.704	0.014	5.935

y1	A1	P1	Rh1	Sf1	hf(1-3)	v1	hc(1-3)	h(1-3)	H1	H1(revisión)
m.	m ²	m	m.		m.	m/s	m.	m.	m.	m.
5.10	17.85	13.70	1.30	0.000786	0.040425	2.090	0.315	0.355	5.742	5.323
5.60	19.60	14.70	1.33	0.000632	0.040016	1.903	0.322	0.362	5.749	5.785
5.50	19.25	14.50	1.33	0.000659	0.040088	1.938	0.321	0.361	5.748	5.691
5.56	19.46	14.62	1.33	0.000642	0.040045	1.917	0.322	0.362	5.748	5.747
5.55	19.43	14.60	1.33	0.000645	0.040052	1.920	0.322	0.362	5.748	5.738
5.57	19.48	14.63	1.33	0.000641	0.040041	1.915	0.322	0.362	5.748	5.752

g= 9.81 m/s²
 escala 35

Tabla A-2

y modelo	y prototipo	b3	A	v	v ² /2g	H	Dlum.	Qm	Qprototipo	Q/(g ^{1/2} D ^{5/2})	H/D
cm.	m.	m.	m ²	m/s	m.	m.	m.	m ³ /s	m ³ /s		
7.100	2.485	1.750	4.349	8.577	3.750	6.235	3.500	0.005	37.300	0.520	1.781
6.900	2.415	1.750	4.226	8.270	3.486	5.901	3.500	0.005	34.950	0.487	1.686
6.550	2.293	1.750	4.012	8.216	3.440	5.733	3.500	0.005	32.960	0.459	1.638
6.400	2.240	1.750	3.920	7.888	3.171	5.411	3.500	0.004	30.920	0.431	1.546
5.650	1.978	1.750	3.461	7.415	2.802	4.780	3.500	0.004	25.660	0.357	1.366
4.700	1.645	1.750	2.879	7.264	2.689	4.334	3.500	0.003	20.910	0.291	1.238
3.950	1.383	1.750	2.419	7.076	2.552	3.935	3.500	0.002	17.120	0.239	1.124
3.850	1.348	1.750	2.358	7.061	2.541	3.888	3.500	0.002	16.650	0.232	1.111

b3= 1.75 m.
 g= 9.81 m/s²
 Dlum.= 3.5 m.
 escala= 35

Tabla A-3 (Empleando Ec. De Cantidad de Movimiento)

Qprototipo	q	y _{cp} (teórico)	y _{cm} (teo)	y ₃ (ca.m)	A	v	v ² /2g	H	Q/(g ^{1/2} D ^{5/2})	H/D
m ³ /s	m ³ /s/m	m	m	m.	m ² .	m/s	m.	m.		
70.000	40.000	5.464	0.156	3.642	6.374	10.982	6.147	9.789	0.975	2.797
60.000	34.286	4.930	0.141	3.287	5.752	10.432	5.546	8.833	0.836	2.524
50.000	28.571	4.366	0.125	2.911	5.093	9.817	4.912	7.822	0.697	2.235
40.000	22.857	3.762	0.107	2.508	4.389	9.113	4.233	6.741	0.557	1.926
37.300	21.314	3.591	0.103	2.394	4.190	8.903	4.040	6.434	0.520	1.838
34.950	19.971	3.439	0.098	2.292	4.012	8.712	3.868	6.161	0.487	1.760
32.960	18.834	3.307	0.094	2.205	3.858	8.543	3.720	5.925	0.459	1.693
30.920	17.669	3.169	0.091	2.113	3.697	8.363	3.565	5.678	0.431	1.622
25.660	14.663	2.798	0.080	1.866	3.265	7.859	3.148	5.014	0.357	1.433
20.910	11.949	2.441	0.070	1.628	2.848	7.341	2.747	4.374	0.291	1.250
17.120	9.783	2.137	0.061	1.425	2.493	6.868	2.404	3.828	0.239	1.094
16.650	9.514	2.097	0.060	1.398	2.447	6.804	2.360	3.758	0.232	1.074
10.000	5.714	1.493	0.043	0.995	1.742	5.741	1.680	2.675	0.139	0.764
5.000	2.857	0.941	0.027	0.627	1.097	4.556	1.058	1.685	0.070	0.481

b3= 1.75 m.
 g= 9.81 m/s²
 Dlum.= 3.5 m.
 escala= 35

Tabla A-4 (Datos Experimentales de Rouse)

Qprototipo	q	ycp(teórico)	ycm(teó)	yp(Ro)	A	v	v ² /2g	H	Q/(g ^{1/2} D ^{5/2})	H/D
m ³ /s	m ³ /s/m	m	m	m.	m ² .	m/s	m.	m.		
70.000	40.000	5.464	0.156	3.907	6.836	10.239	5.344	9.250	0.975	2.643
60.000	34.286	4.930	0.141	3.525	6.169	9.726	4.822	8.347	0.836	2.385
50.000	28.571	4.366	0.125	3.122	5.463	9.153	4.270	7.392	0.697	2.112
40.000	22.857	3.762	0.107	2.690	4.708	8.497	3.680	6.370	0.557	1.820
37.300	21.314	3.591	0.103	2.568	4.493	8.301	3.512	6.080	0.520	1.737
34.950	19.971	3.439	0.098	2.459	4.303	8.123	3.363	5.822	0.487	1.663
32.960	18.834	3.307	0.094	2.364	4.138	7.966	3.234	5.599	0.459	1.600
30.920	17.669	3.169	0.091	2.266	3.965	7.798	3.099	5.365	0.431	1.533
25.660	14.663	2.798	0.080	2.001	3.502	7.328	2.737	4.738	0.357	1.354
20.910	11.949	2.441	0.070	1.746	3.055	6.845	2.388	4.134	0.291	1.181
17.120	9.783	2.137	0.061	1.528	2.674	6.403	2.090	3.618	0.239	1.034
16.650	9.514	2.097	0.060	1.500	2.624	6.344	2.051	3.551	0.232	1.015
10.000	5.714	1.493	0.043	1.068	1.868	5.353	1.460	2.528	0.139	0.722
5.000	2.857	0.941	0.027	0.673	1.177	4.248	0.920	1.592	0.070	0.455

b3= 1.75 m.
 g= 9.81 m/s²
 Dlum= 3.5 m.

escala= 35

Tabla A-5 (Régimen Crítico en la ranura)

Qprototipo	q	ycp(teórico)	ycm(teórico)	Ac	vc	vc ² /2g	Hc	Q/(g ^{1/2} D ^{5/2})	Hc/D
m ³ /s	m ³ /s/m	m	cm.	m ²	m/s	m	m		
70.000	40.000	5.464	0.156	9.561	7.321	2.732	8.195	0.975	2.342
60.000	34.286	4.930	0.141	8.628	6.954	2.465	7.395	0.836	2.113
50.000	28.571	4.366	0.125	7.640	6.544	2.183	6.549	0.697	1.871
40.000	22.857	3.762	0.107	6.584	6.075	1.881	5.644	0.557	1.612
37.300	21.314	3.591	0.103	6.284	5.935	1.796	5.387	0.520	1.539
34.950	19.971	3.439	0.098	6.018	5.808	1.719	5.158	0.487	1.474
32.960	18.834	3.307	0.094	5.787	5.696	1.653	4.960	0.459	1.417
30.920	17.669	3.169	0.091	5.546	5.576	1.584	4.753	0.431	1.358
25.660	14.663	2.798	0.080	4.897	5.240	1.399	4.198	0.357	1.199
20.910	11.949	2.441	0.070	4.273	4.894	1.221	3.662	0.291	1.046
17.120	9.783	2.137	0.061	3.739	4.578	1.068	3.205	0.239	0.916
16.650	9.514	2.097	0.060	3.671	4.536	1.049	3.146	0.232	0.899
10.000	5.714	1.493	0.043	2.613	3.827	0.747	2.240	0.139	0.640
5.000	2.857	0.941	0.027	1.646	3.038	0.470	1.411	0.070	0.403

D= 3.5 m a= 1.8 m.
 β = 0.75 g= 9.8 m/s²
 π = 3.14 cd= 0.6

Tabla A-6

Qprototipo	q	ycp(teórico)	Hp	Teta	Alfa	A	k2	k	Cte.	Var.	Qt	Qp/Qt	Qt/Qp	Hp/D	Qp/g1/2 D5/2	Qt/g1/2 D5/2	Qt	qt	yct	Ht	Ht/D
m3/s	m3/s/m	m	m.	rad					gasto	gasto	m3/s						m3/s	m3/s/m	m	m	
70.00	40.00	5.46	8.20	0.65	0.20	1.56	0.86	0.93	3.10	18.55	57.52	1.22	0.82	2.34	0.98	0.80					
60.00	34.29	4.93	7.40	0.70	0.18	1.72	0.89	0.94	3.10	16.67	51.68	1.16	0.86	2.11	0.84	0.72	57.52	32.87	4.79	7.19	2.05
50.00	28.57	4.37	6.55	0.76	0.16	1.95	0.92	0.96	3.10	14.60	45.28	1.10	0.91	1.87	0.70	0.63	51.68	29.53	4.46	6.69	1.91
40.00	22.86	3.76	5.64	0.83	0.13	2.26	0.94	0.97	3.10	12.31	38.17	1.05	0.95	1.61	0.56	0.53	45.28	25.87	4.09	6.13	1.75
37.30	21.31	3.59	5.39	0.85	0.12	2.37	0.95	0.98	3.10	11.64	36.10	1.03	0.97	1.54	0.52	0.50	38.17	21.81	3.65	5.47	1.56
34.95	19.97	3.44	5.16	0.88	0.12	2.47	0.96	0.98	3.10	11.04	34.24	1.02	0.98	1.47	0.49	0.48	36.10	20.63	3.51	5.27	1.51
32.96	18.83	3.31	4.96	0.89	0.11	2.57	0.97	0.98	3.10	10.52	32.62	1.01	0.99	1.42	0.46	0.45	34.24	19.56	3.39	5.09	1.45
30.92	17.67	3.17	4.75	0.92	0.10	2.68	0.97	0.99	3.10	9.97	30.91	1.00	1.00	1.36	0.43	0.43	32.62	18.64	3.28	4.93	1.41
25.66	14.66	2.80	4.20	0.97	0.09	3.04	0.99	0.99	3.10	8.47	26.26	0.98	1.02	1.20	0.36	0.37	30.91	17.66	3.17	4.75	1.36
20.91	11.95	2.44	3.66	1.04	0.07	3.48	1.00	1.00	3.10	7.00	21.71	0.96	1.04	1.05	0.29	0.30	26.26	15.01	2.84	4.26	1.22
17.12	9.78	2.14	3.21	1.09	0.06	3.98	1.01	1.00	3.10	#iNUM!	#####	#####	####	0.92	0.24		21.71	12.41	2.50	3.76	1.07
16.65	9.51	2.10	3.15	1.10	0.05	4.05	1.01	1.00	3.10	#iNUM!	#####	#####	####	0.90	0.23	#iNUM!					
10.00	5.71	1.49	2.24	1.22	0.03	5.69	1.01	1.01	3.10	#iNUM!	#####	#####	####	0.64	0.14	#iNUM!					
5.00	2.86	0.94	1.41	1.35	0.01	9.04	1.01	1.00	3.10	#iNUM!	#####	#####	####	0.40	0.07	#iNUM!					

D= 3.5 m.
 Qmax.= 37.3 m3/s
 CL= 17.5 m
 DT= 5 m.
 g= 9.81 m/s2
 Pi= 3.14159265

Tabla A-7

D0	D0/D	cdinicial	cdD/D0	hL/D	hL	cdfinal
m					m	
2.600	0.743	0.600	0.808	4.000	14.000	0.424
2.600	0.743	0.424	0.571	2.200	7.700	0.572
2.600	0.743	0.572	0.769	3.700	12.950	0.441
2.600	0.743	0.441	0.593	2.600	9.100	0.526
2.600	0.743	0.526	0.708	3.200	11.200	0.474
2.600	0.743	0.474	0.638	2.800	9.800	0.507
2.600	0.743	0.507	0.682	3.100	10.850	0.482
2.600	0.743	0.482	0.648	3.000	10.500	0.489

D0	D0/D	cdinicial	cdD/D0	hL/D	hL	cdfinal
m					m	
3.000	0.857	0.500	0.583	3.700	12.950	0.331
3.000	0.857	0.331	0.386	2.600	9.100	0.395
3.000	0.857	0.395	0.461	2.800	9.800	0.381
3.000	0.857	0.381	0.444	2.750	9.625	0.384

D= 3.5 m.
 Qmax.= 37.3 m³/s
 CL= 17.5 m
 DT= 5 m.
 g= 9.81 m/s²
 Pi= 3.14159265

Tabla A-8

D0	D0/D	cdinicial	cdD/D0	hL/D	hL	cdfinal
m					m	
2.21	0.631	0.600	0.950	3.700	12.950	0.610
2.21	0.631	0.610	0.966	3.800	13.300	0.602
2.21	0.631	0.602	0.953	3.750	13.125	0.606
2.21	0.631	0.606	0.960	3.750	13.125	0.606

Figura A1 curva adimensional experimental

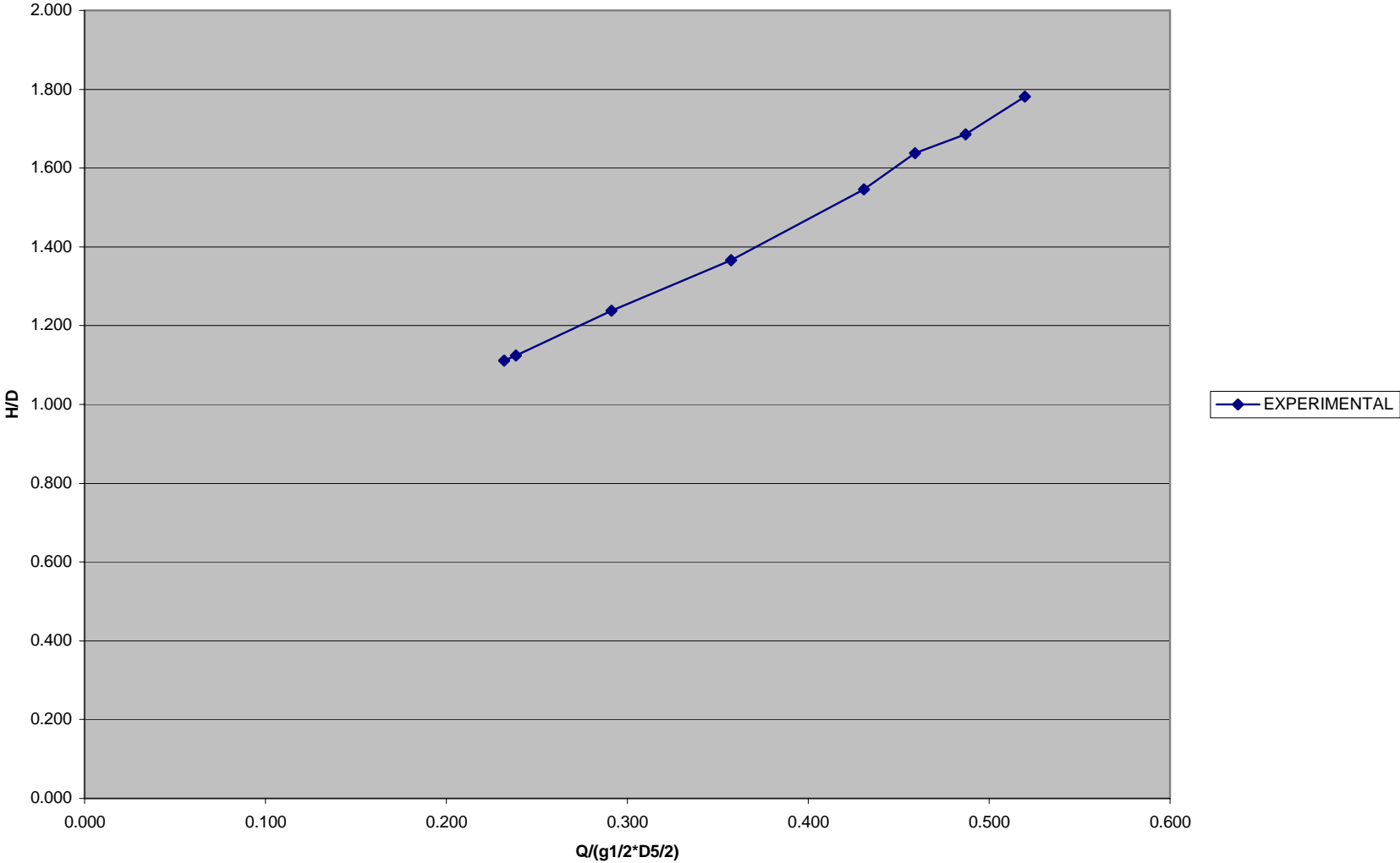


Figura A2 curvas adimensionales teóricas

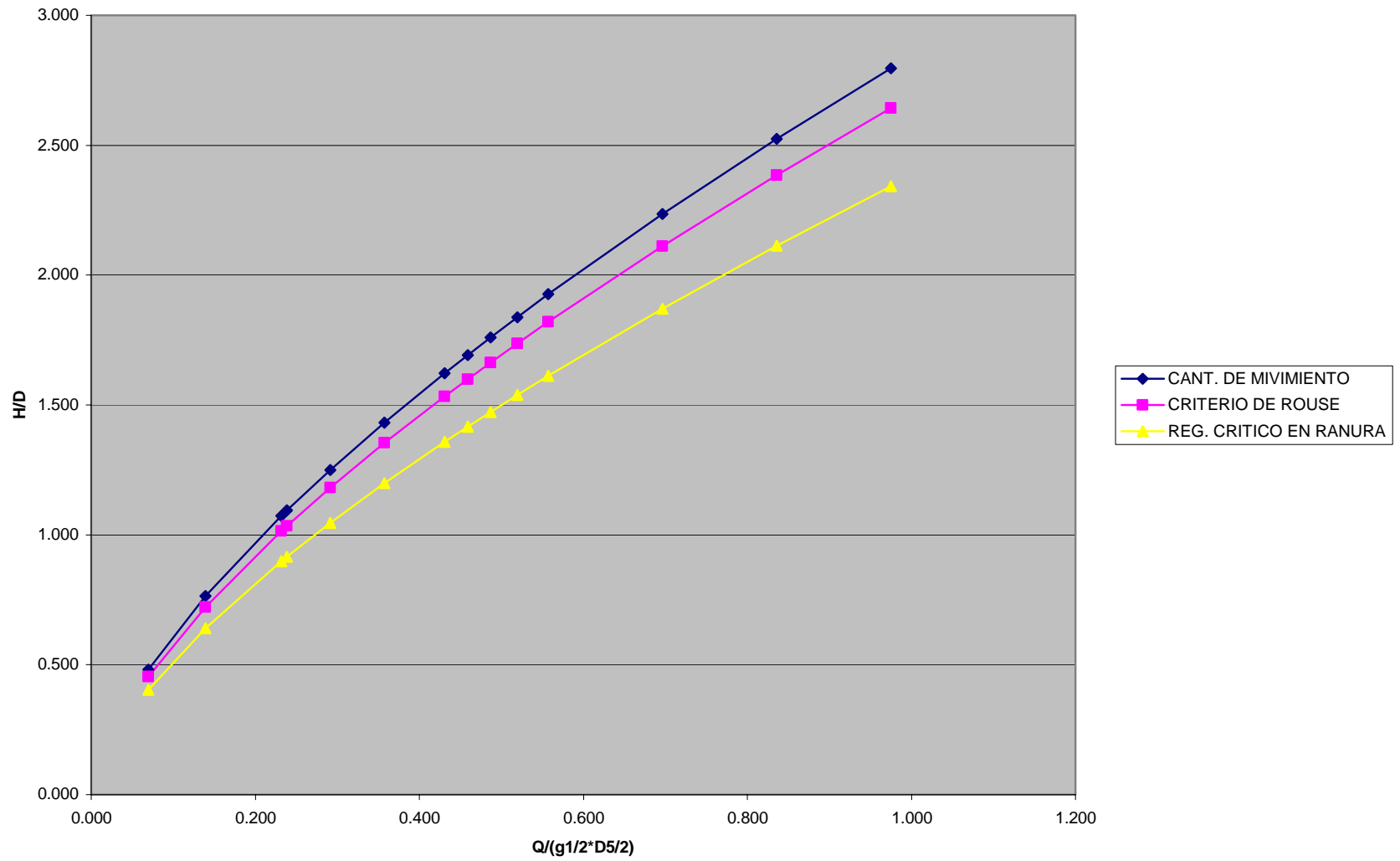


Figura A3 curvas adimensionales teóricas y experimental

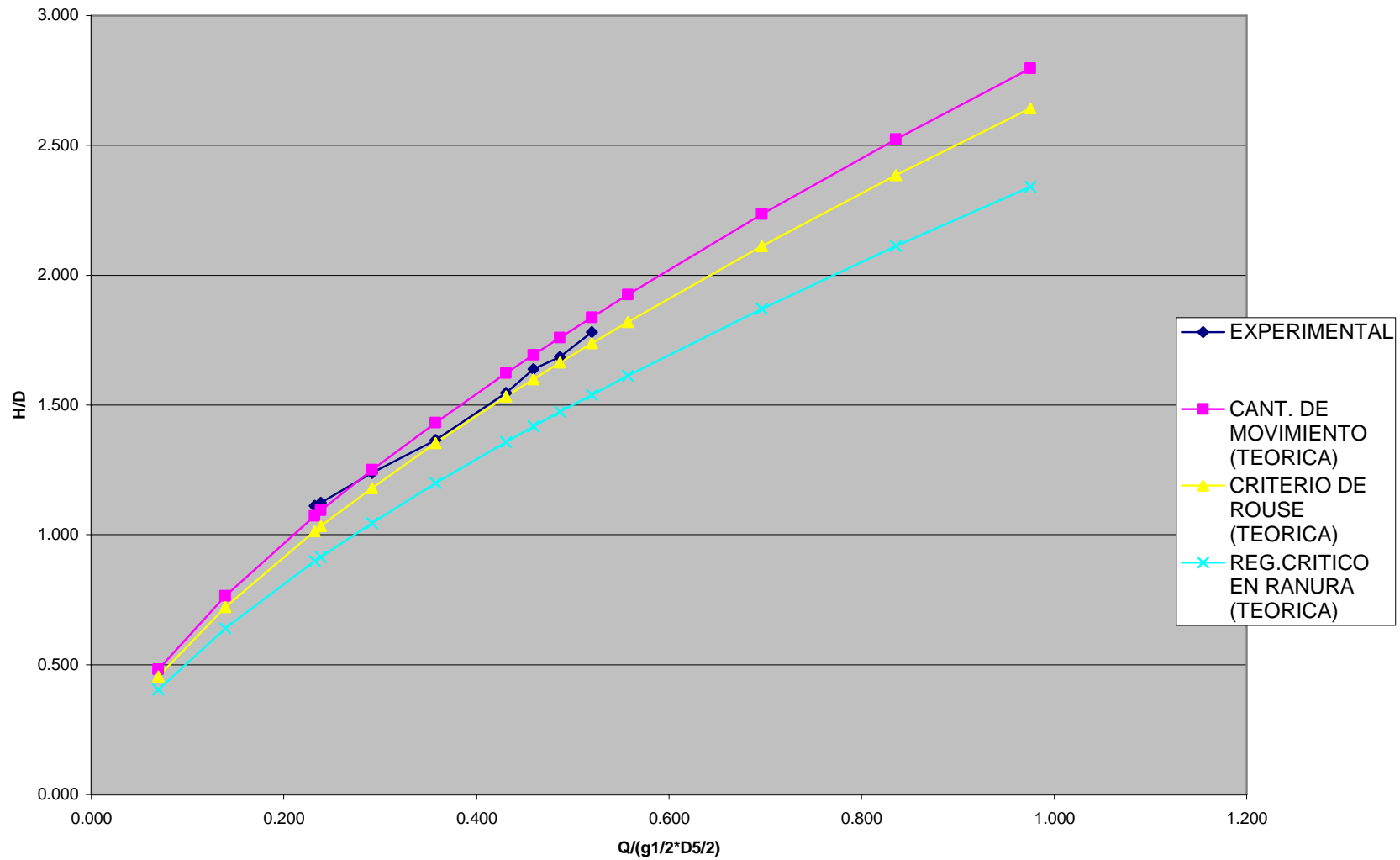


Figura A4 curvas del flujo en la lumbrera (flujo crítico, teoría de Quick y experimental)

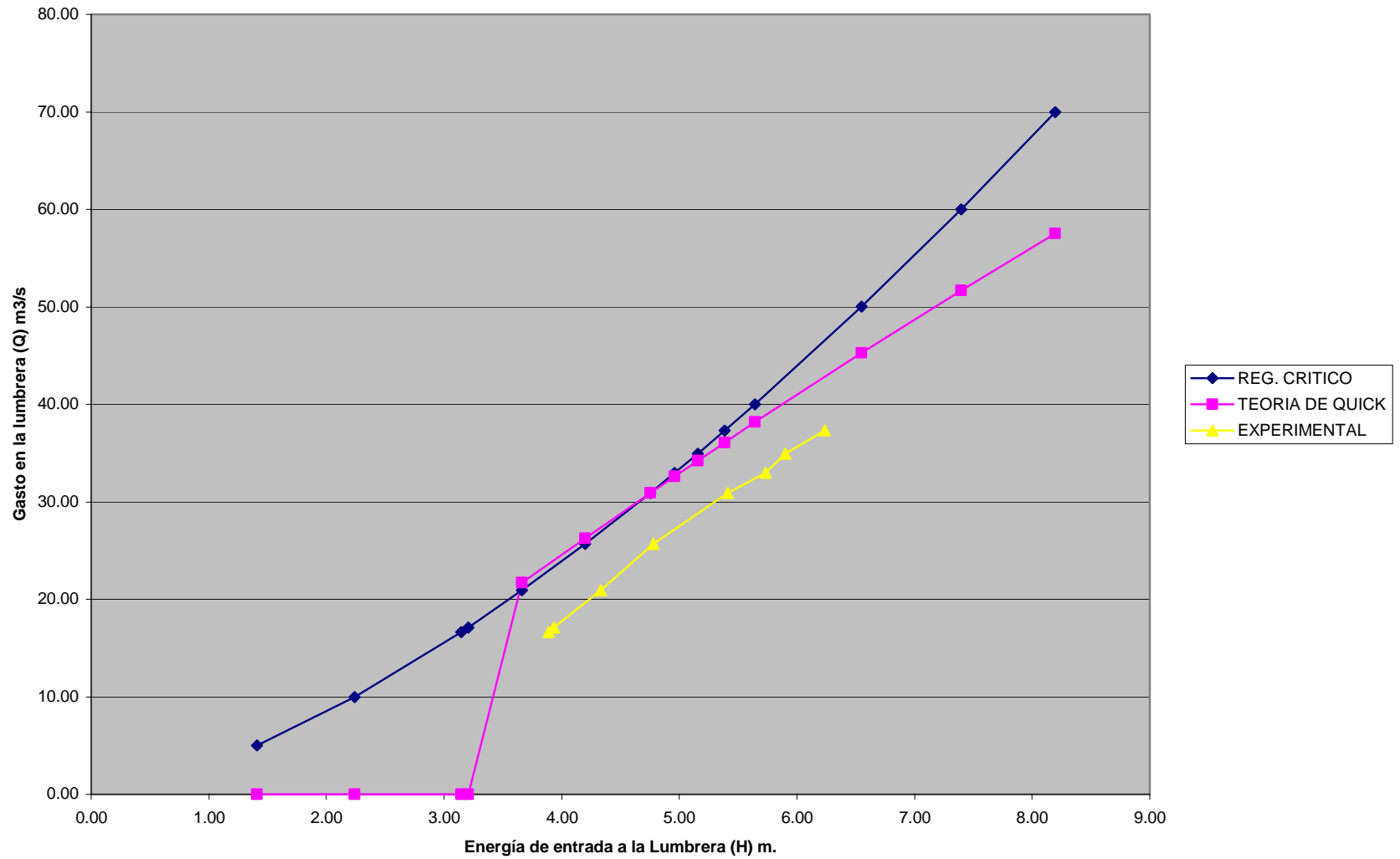
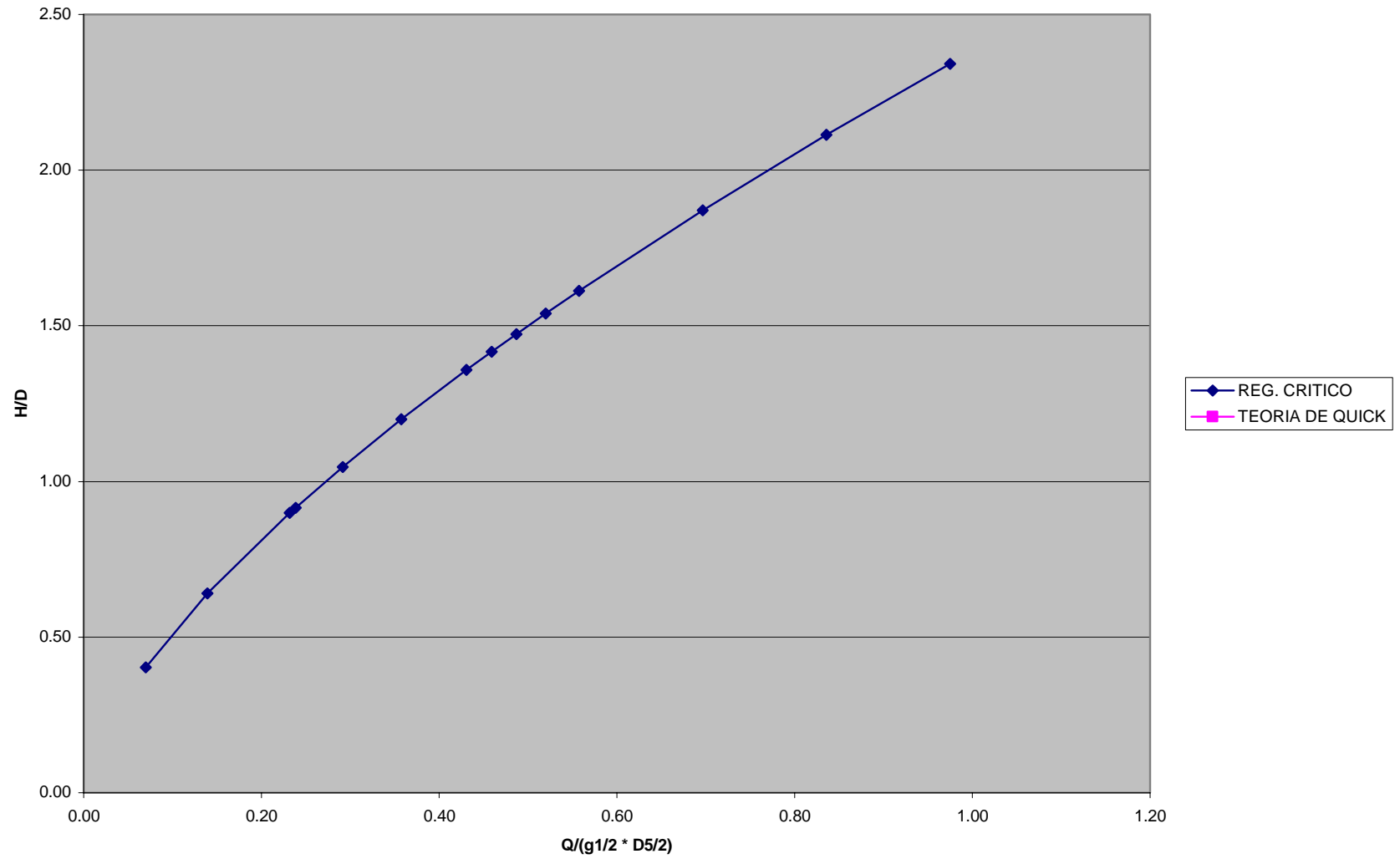


Figura A5 curvas adimensionales del flujo en la lumbrera (crítico - teoría de Quick)



ANEXO B

FIGURAS

FIGURA 1.1.-RANURA VERTICAL

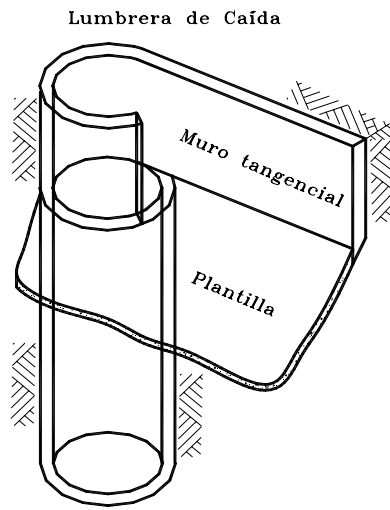
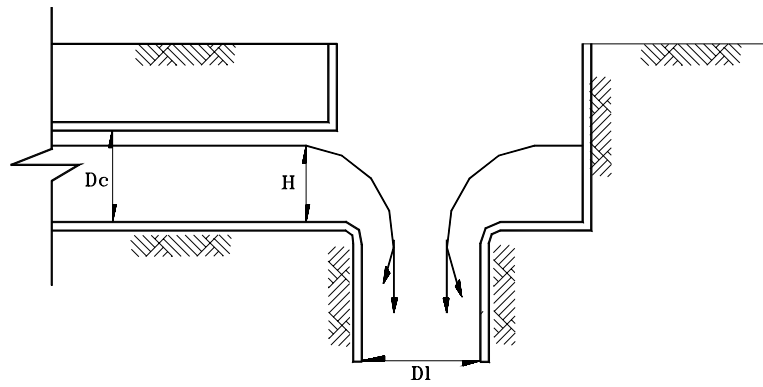


FIGURA 1.2.- CAMARA EN ESPIRAL



PLANTA

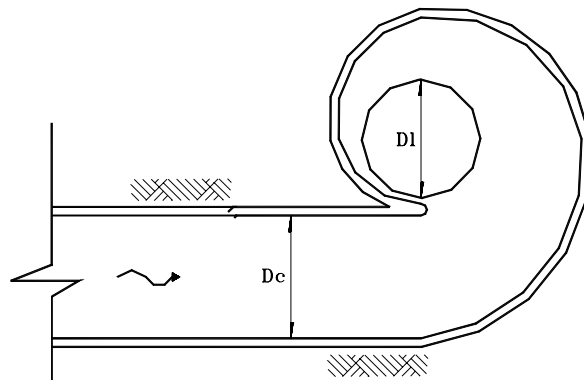
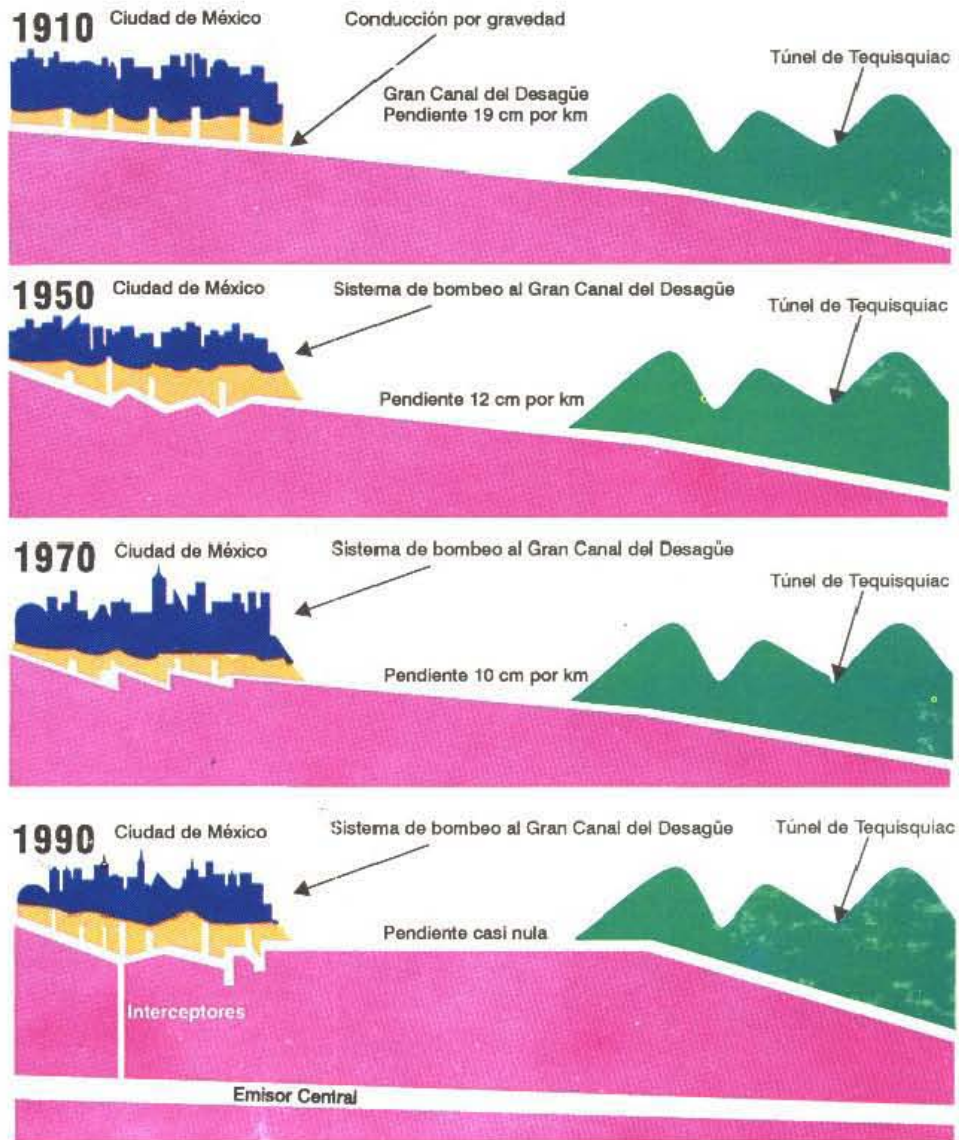


FIGURA III.3



El hundimiento de la Ciudad de México.

FIGURA III.2

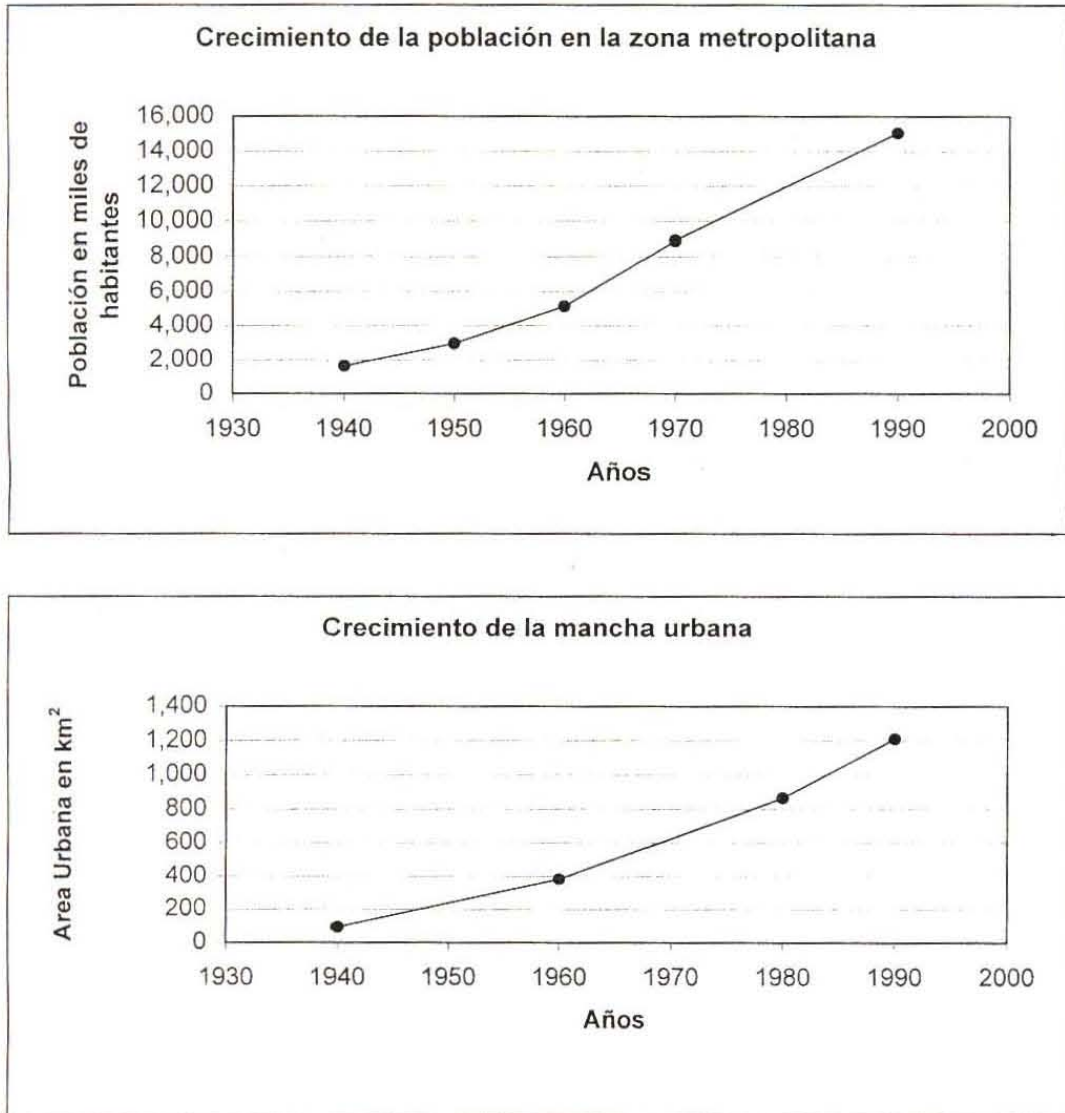
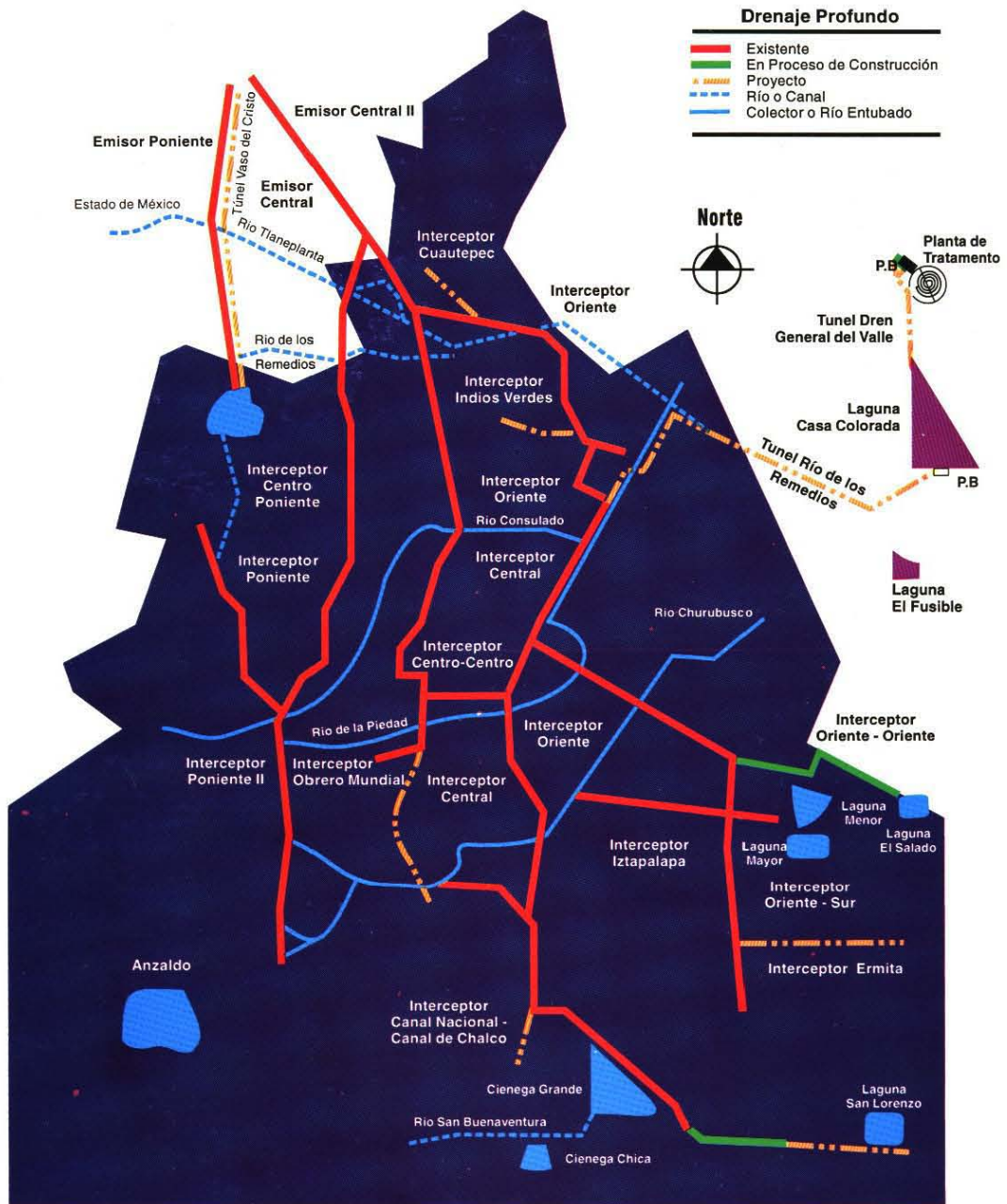


Figura 2. Crecimiento de la población y del área urbana

FIGURA III. 4



FIGURA III.1



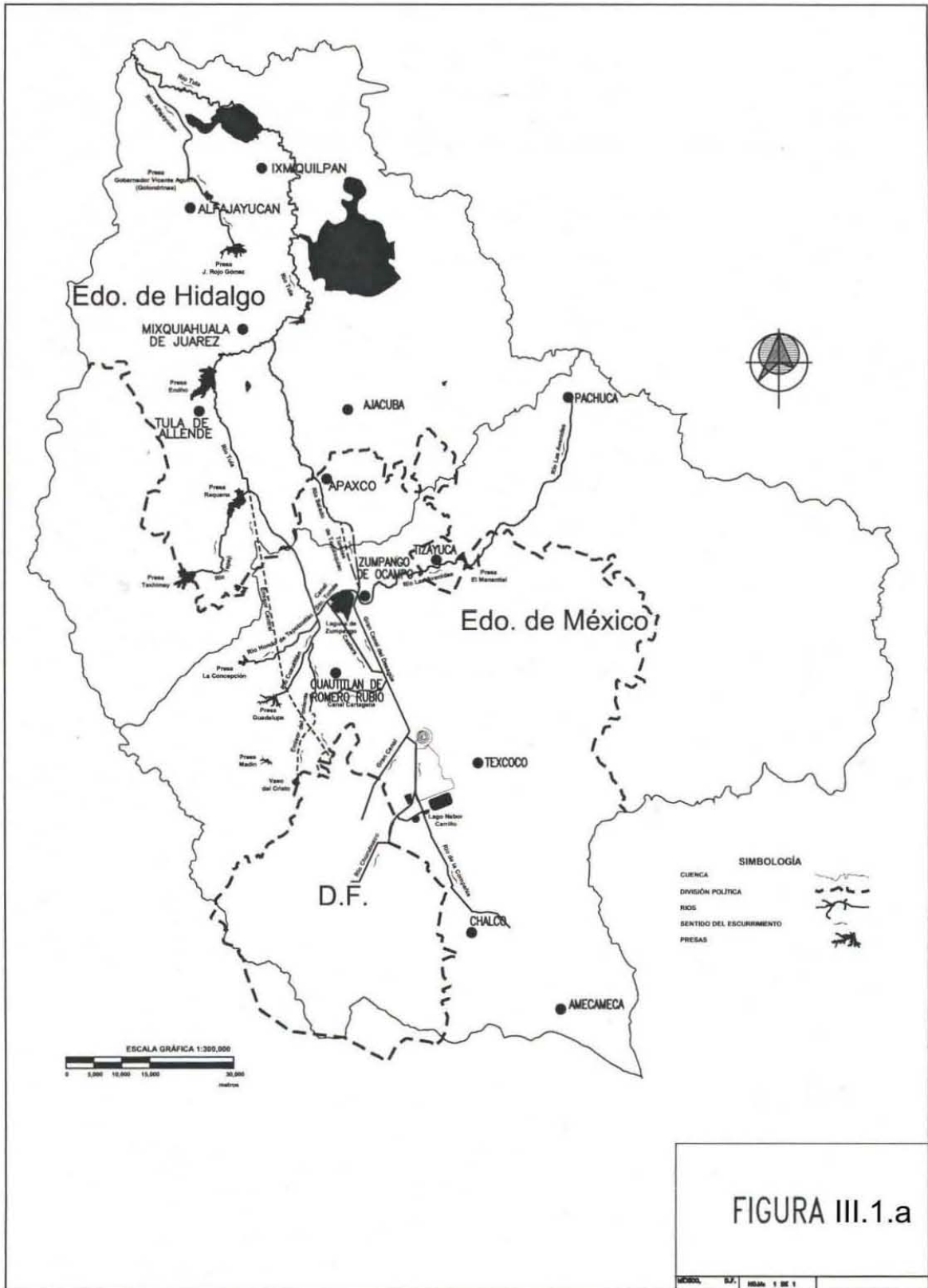


FIGURA 1.3.- LUMBRERA CON CAMARA ESPIRAL

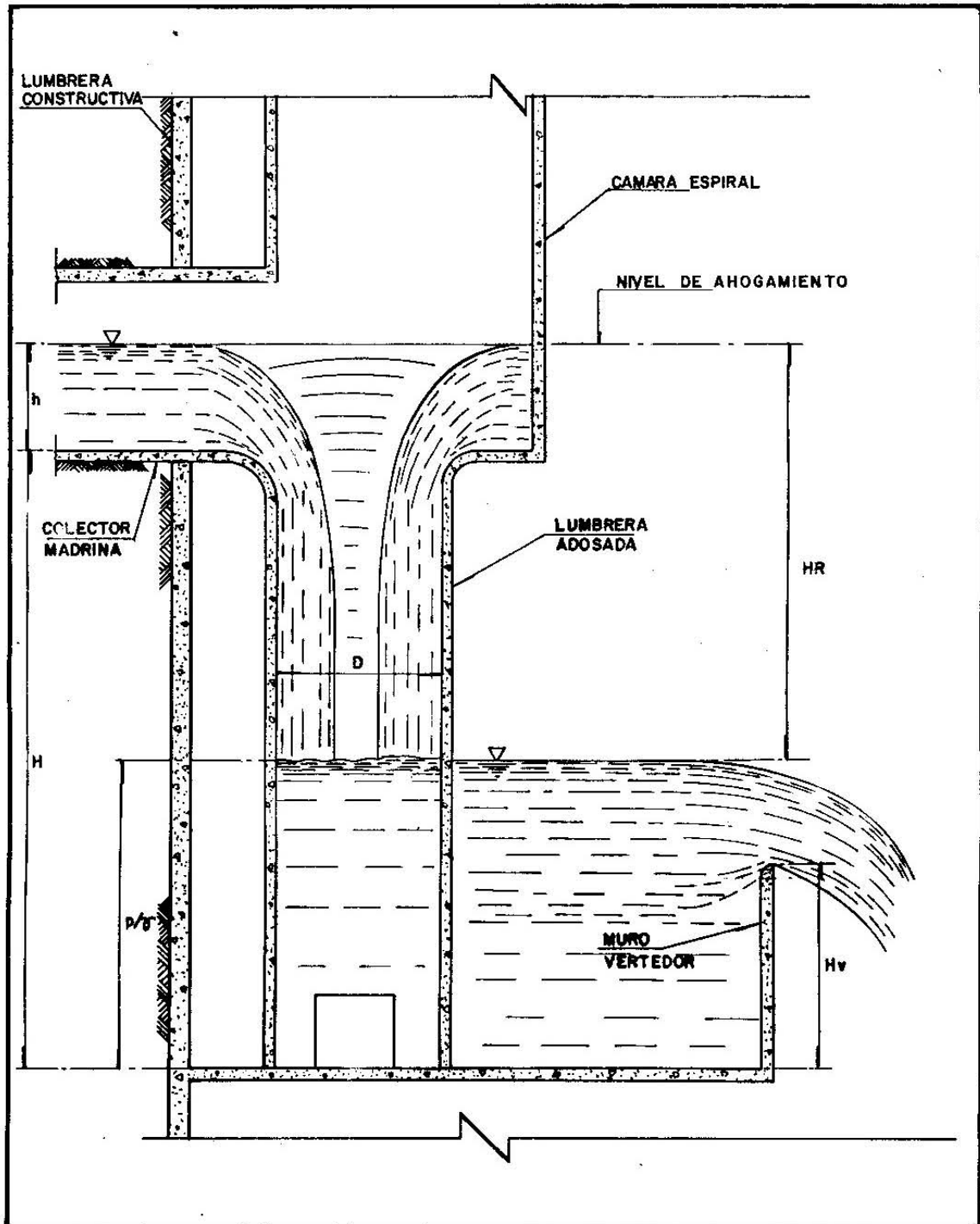


FIGURA 1.4.- LUMBRERA CON CAIDA LIBRE

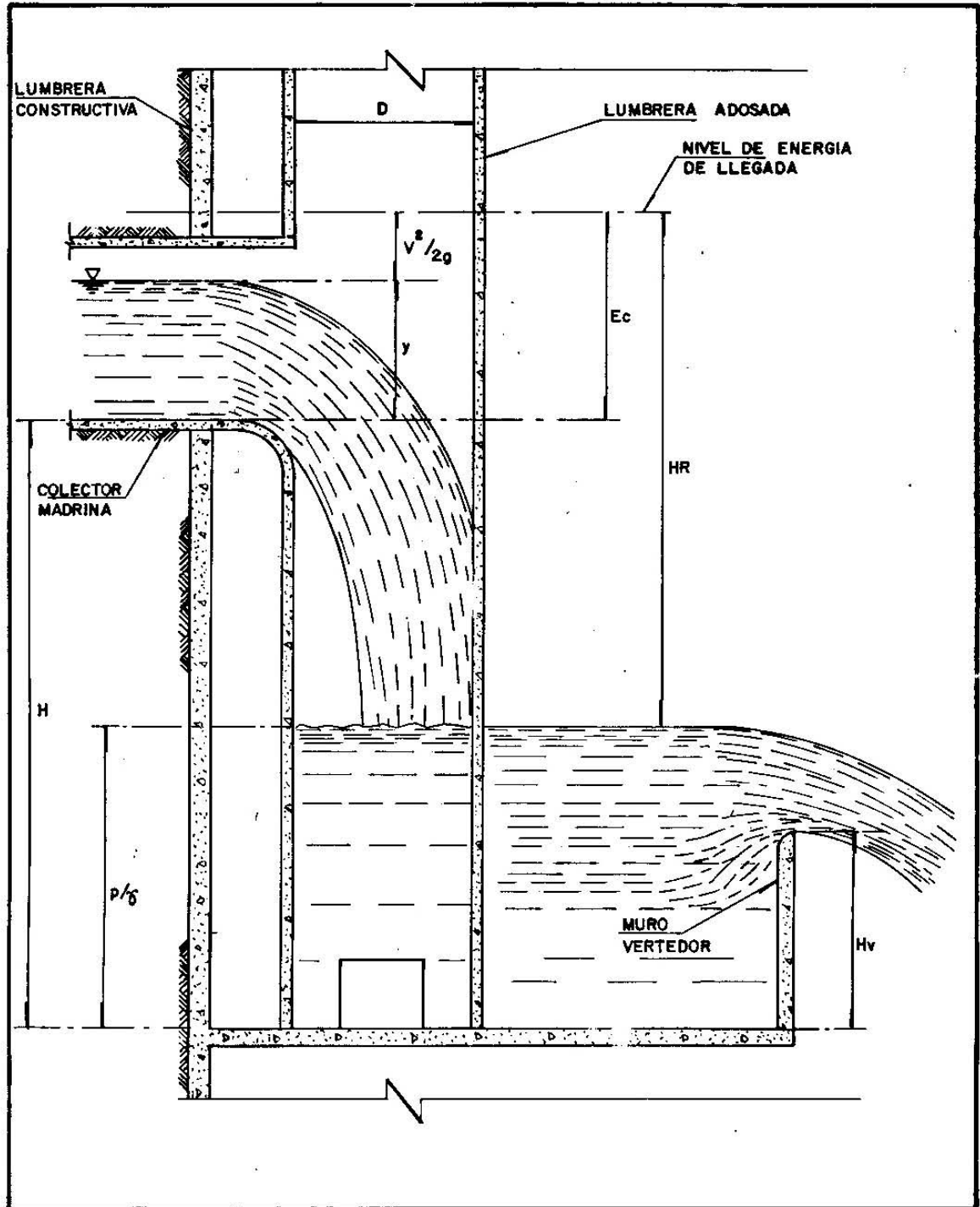


FIGURA 1.5.- LUMBRERA TIPO CAIDA LIBRE CON DIAFRAGMAS

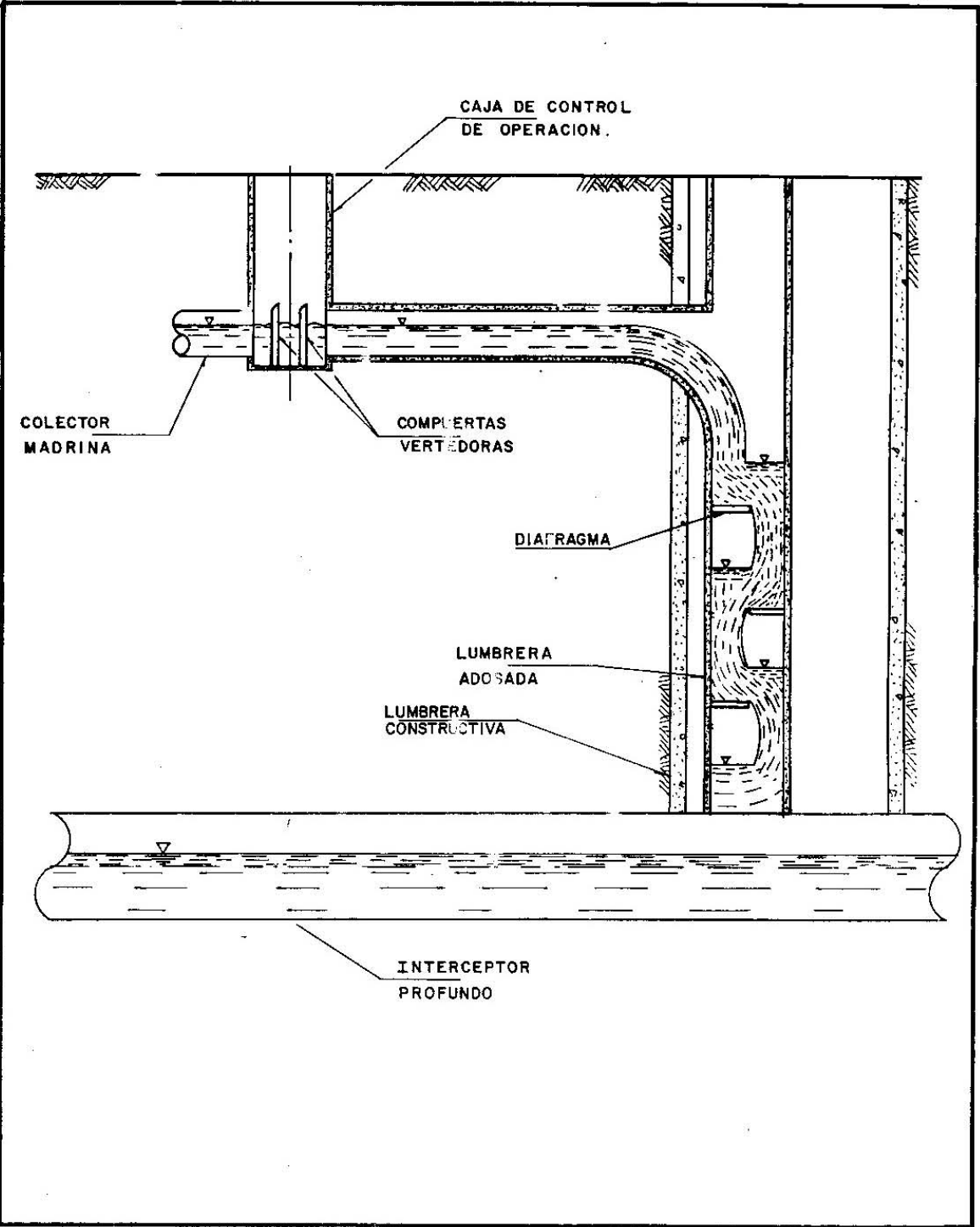
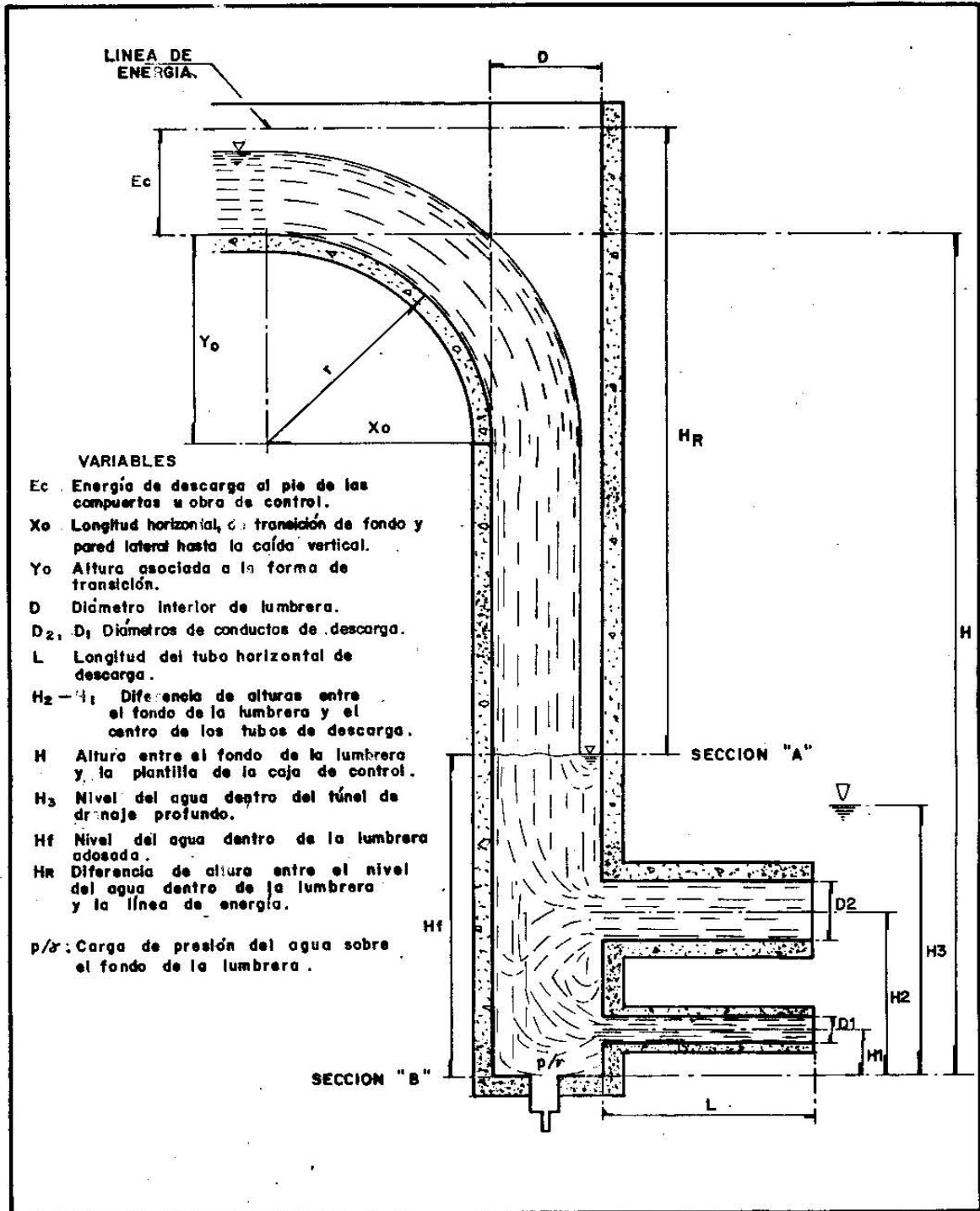


FIGURA 1.6.- ELEMENTOS GEOMETRICOS DE CAPTACIONES CON CAIDA LIBRE



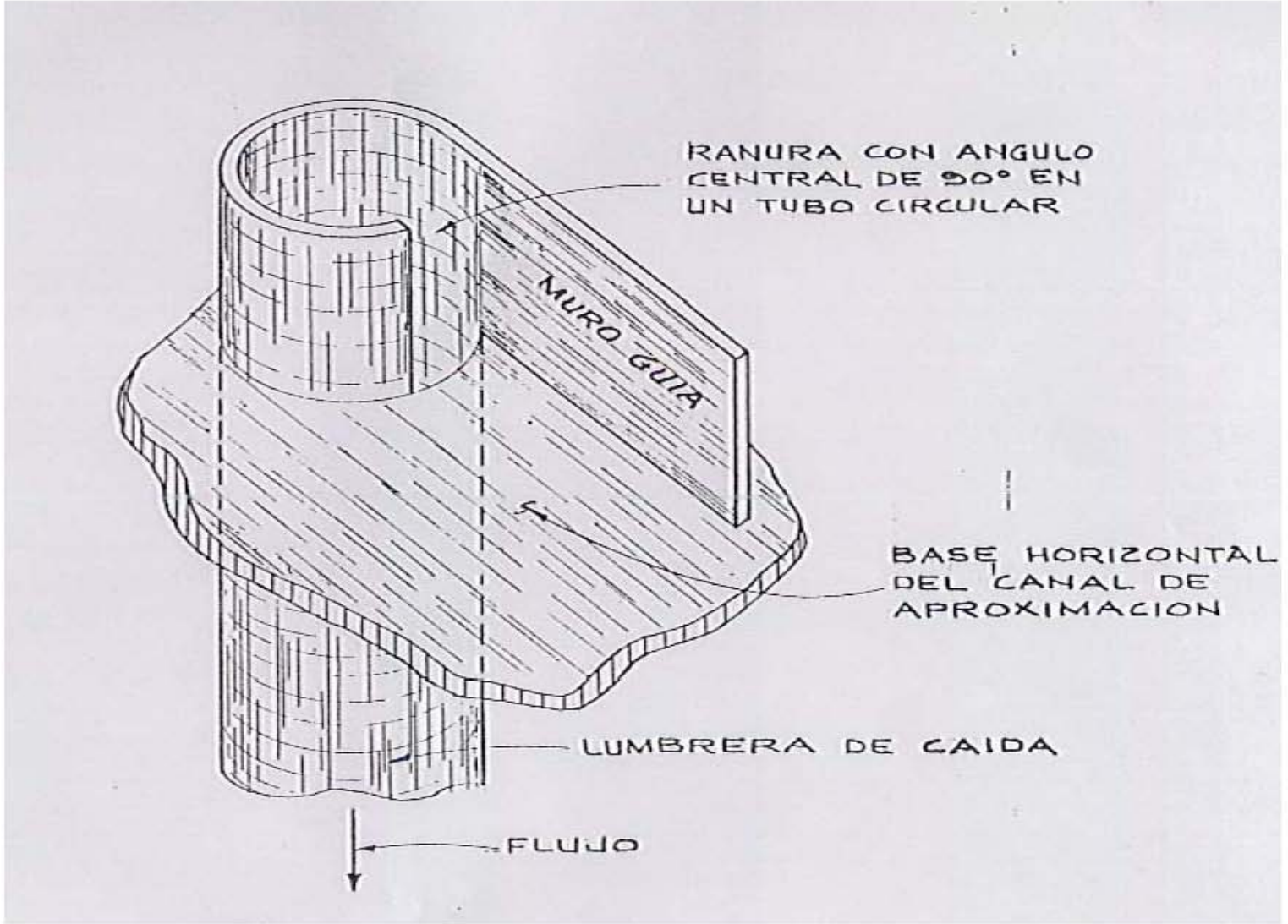


FIGURA 2.1 LUMBRERA DE RANURA VERTICAL DE QUICK

FIGURA 2.2 FIGURA CON MODIFICACION POR LA DGOH

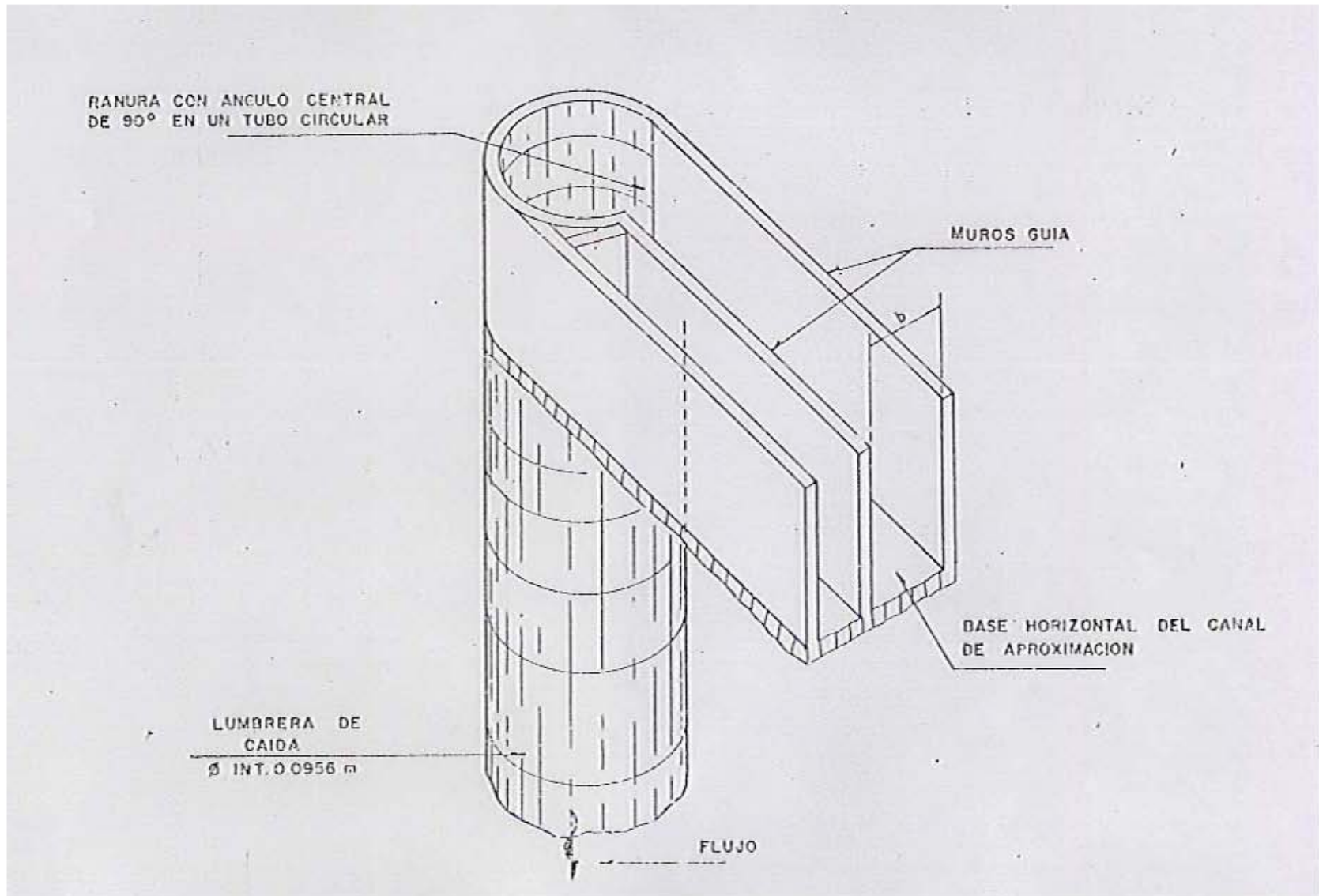
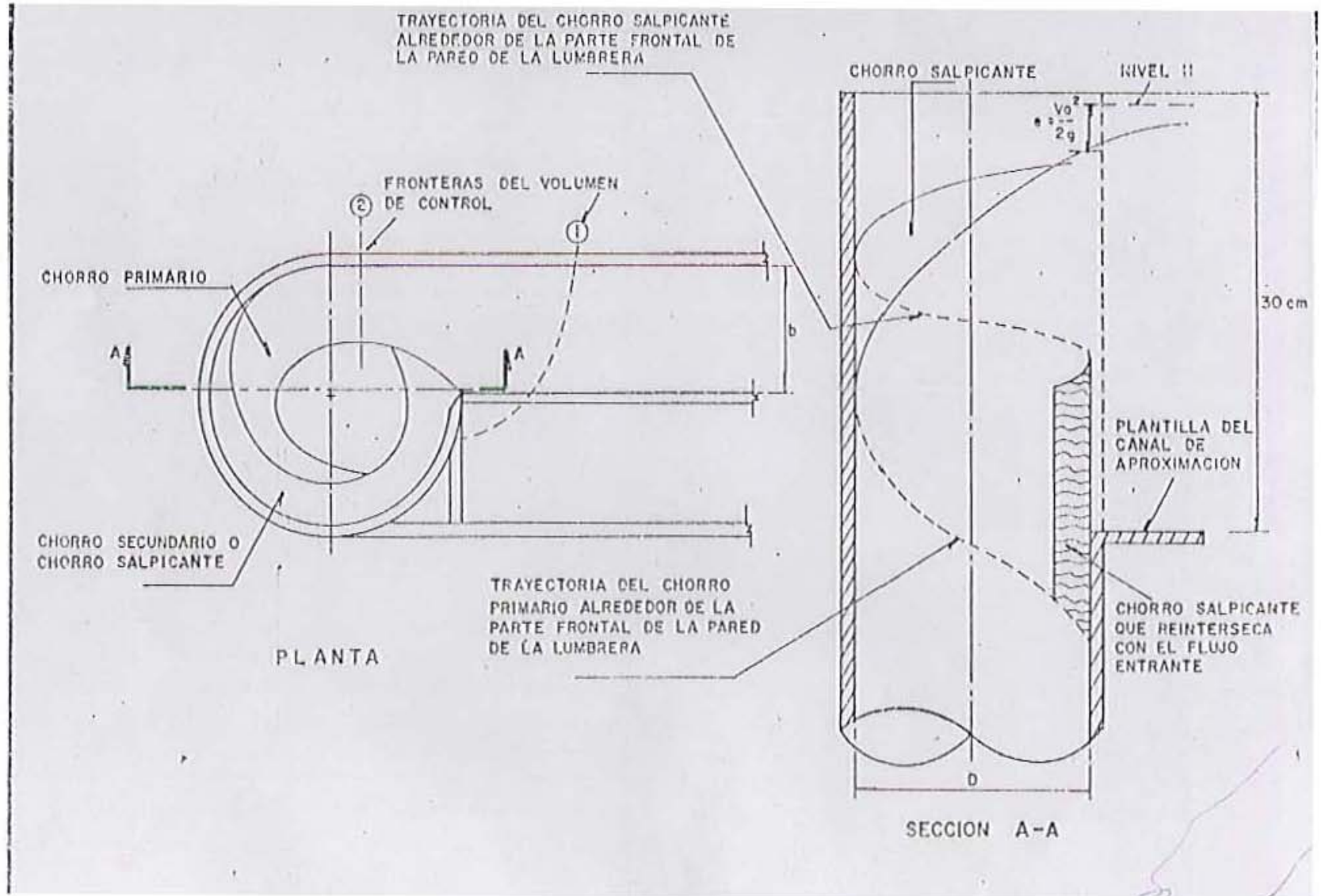


FIGURA 2.3 VARIABLES PARA EL FLUJO DE VORTICE



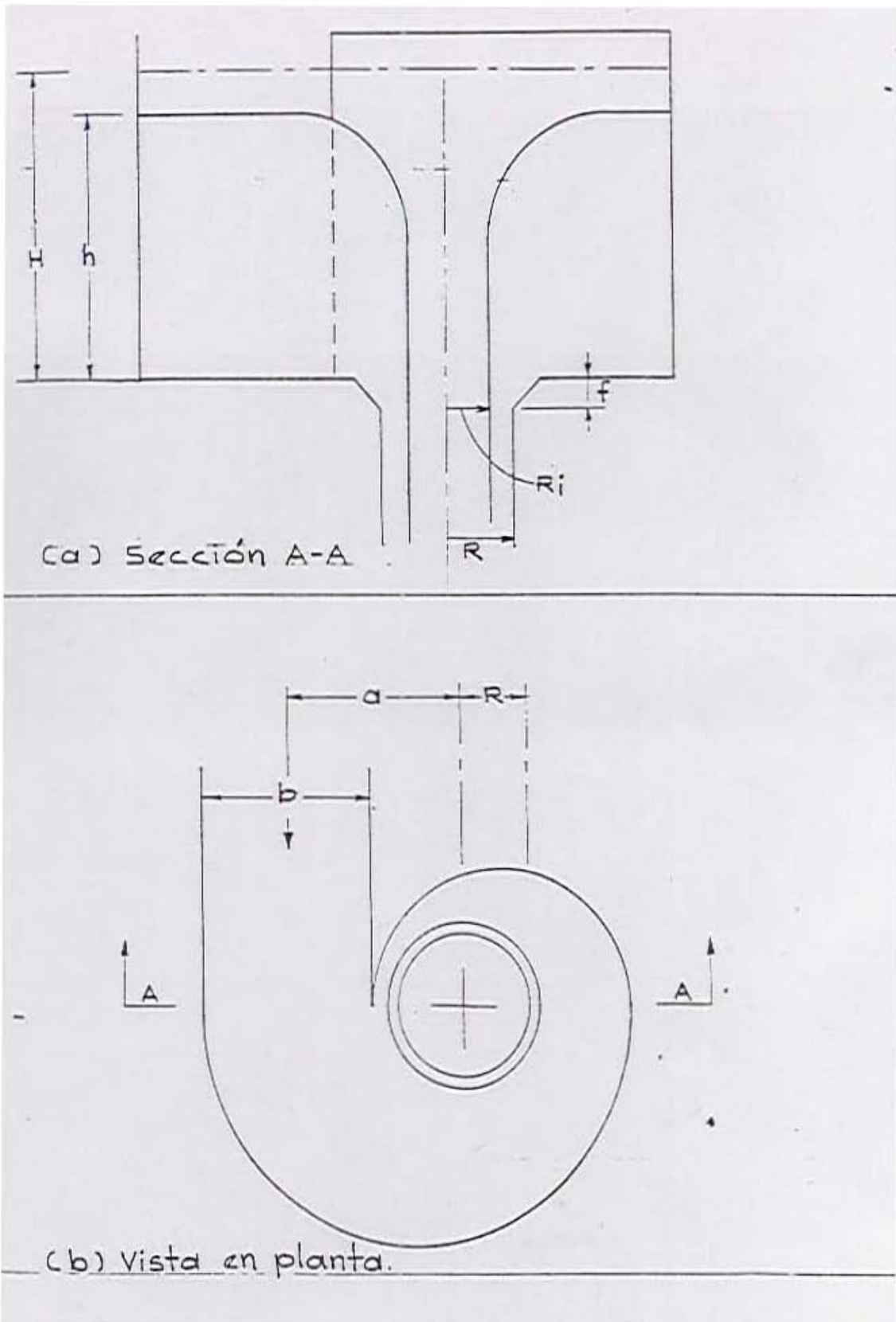
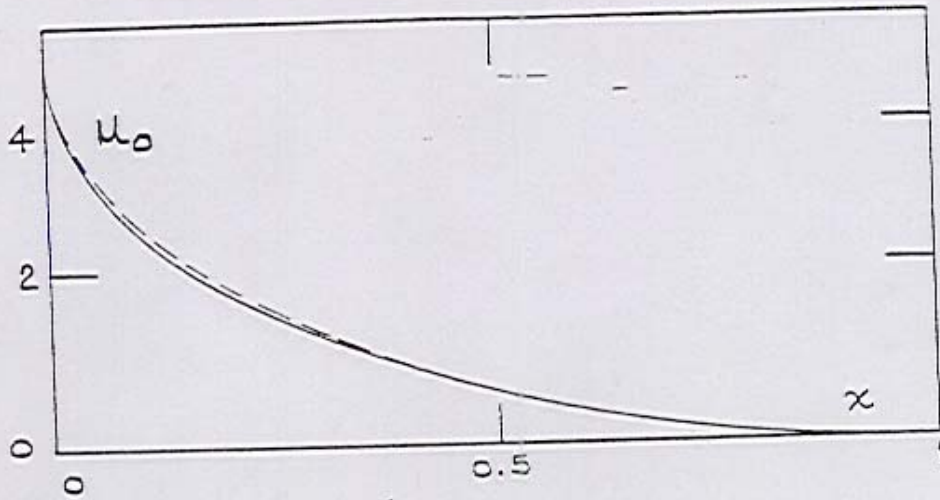


FIGURA 2.4 LUMBRERA DE CAMARA ESPIRAL DE HAGER

FIGURA 2.5



μ_0 como una función de x , según Pica (3) (línea llena) y cc. 5 (línea discontinua)

FIGURA 2.6

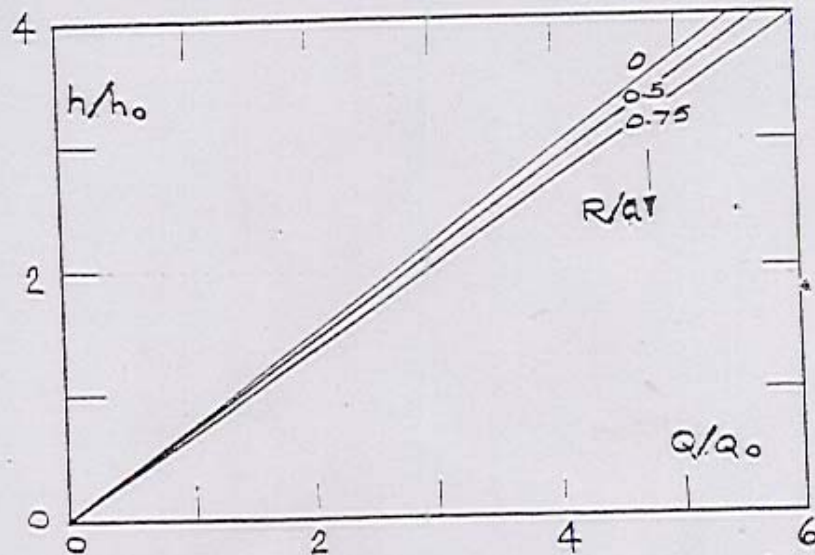


FIGURA 2.7 ANALISIS DEL VORTICE ESPIRAL

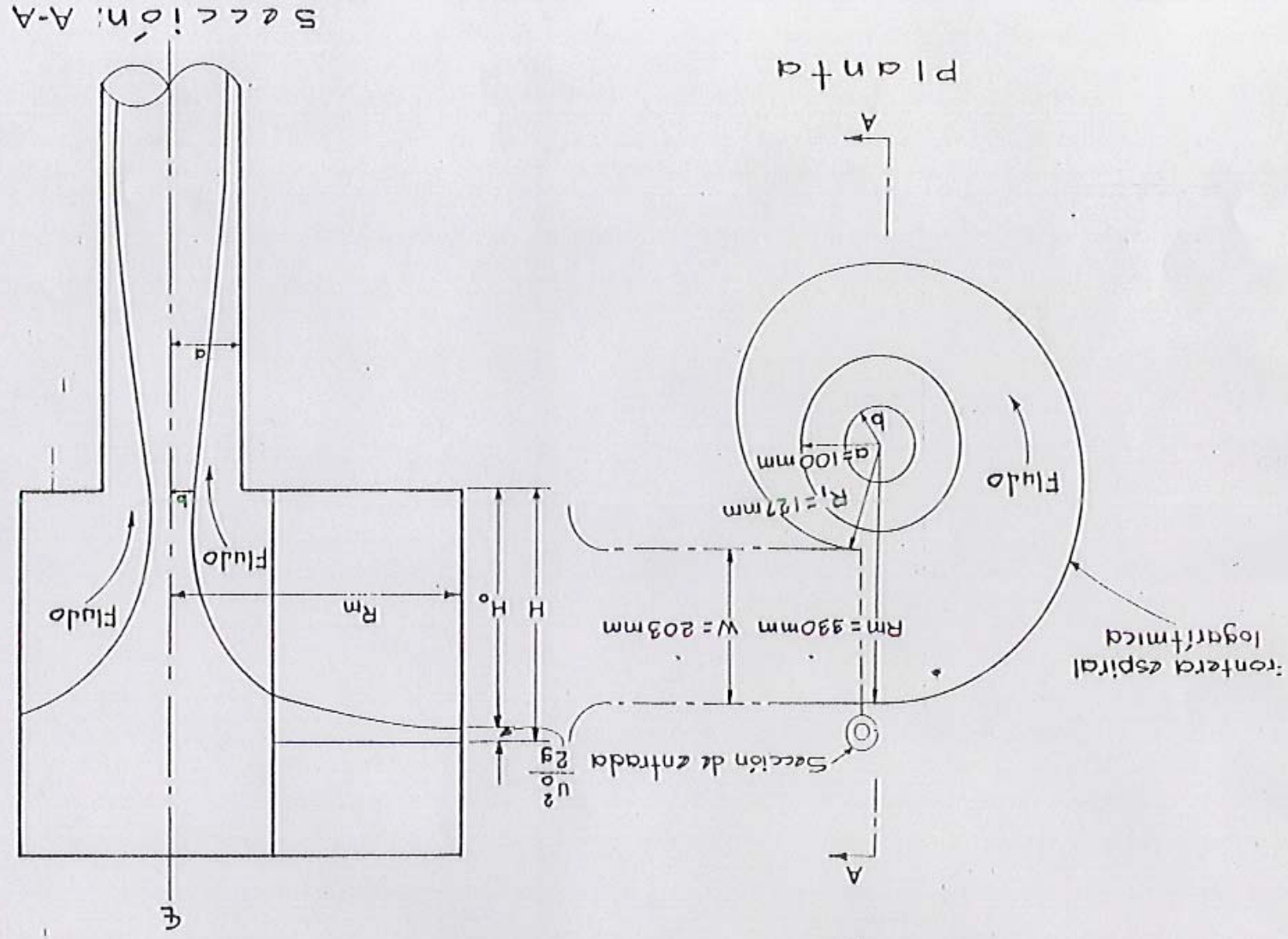


FIGURA 2.8

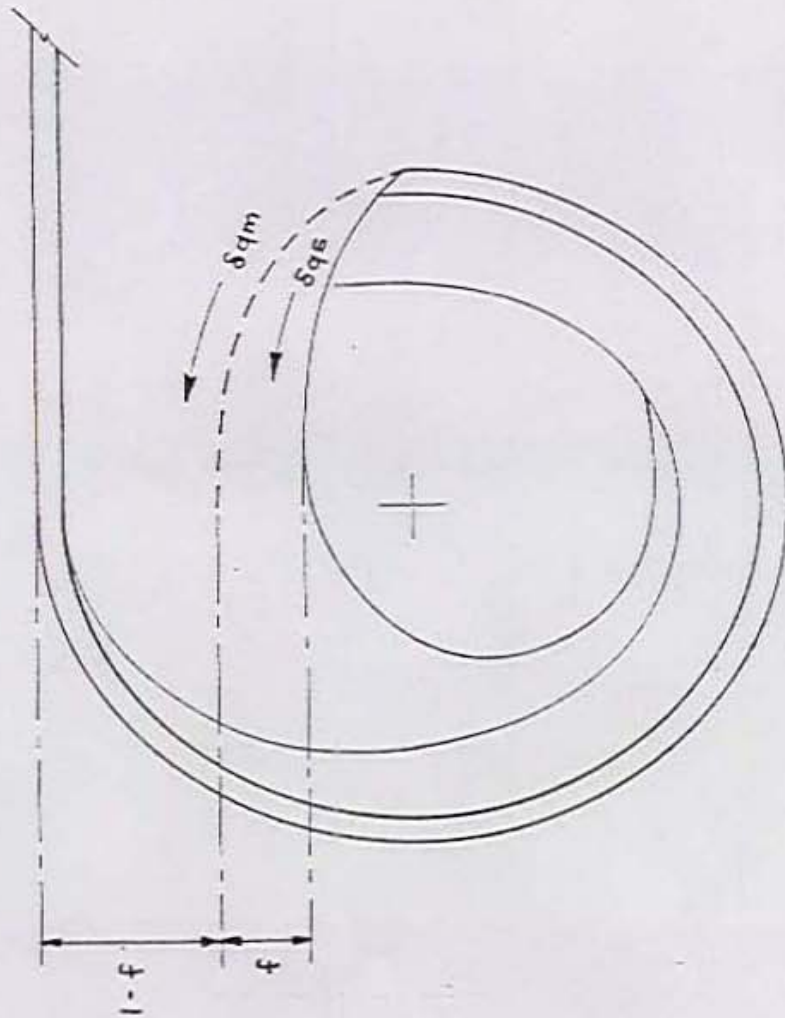


FIGURA 2.9

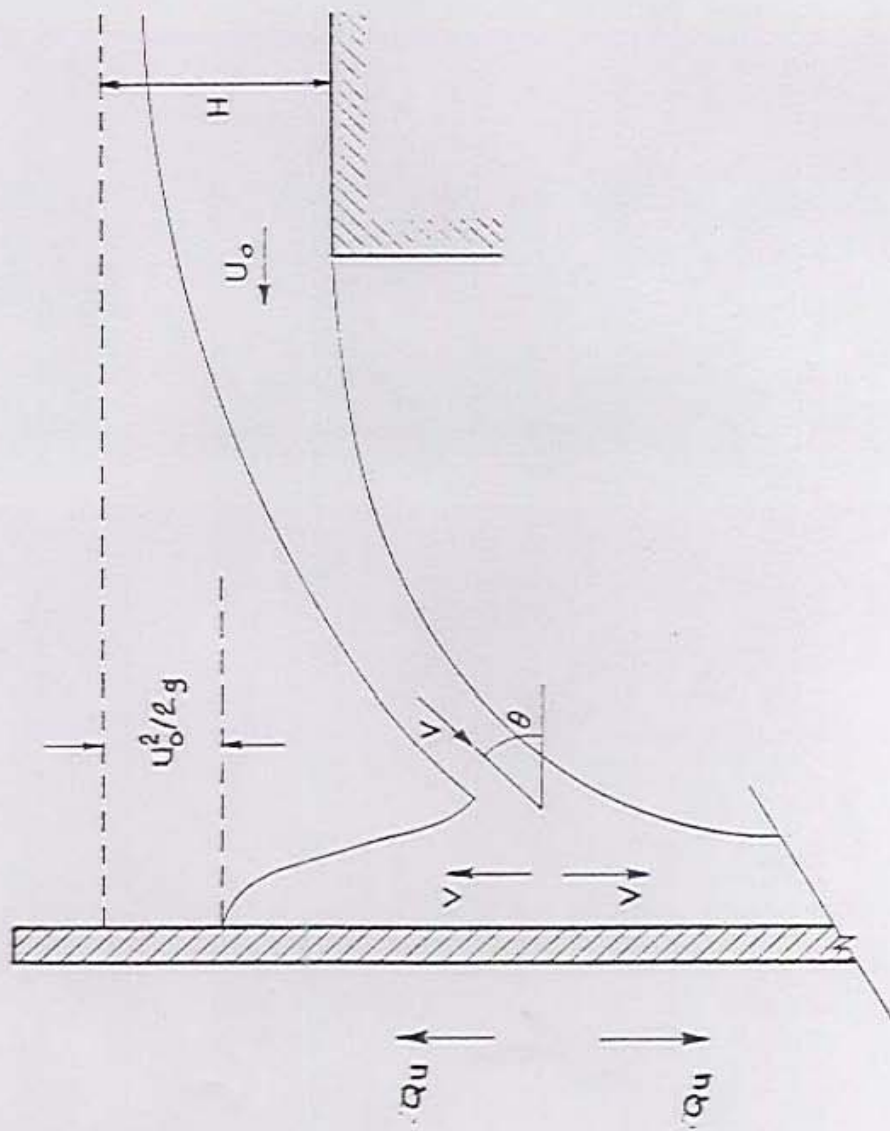


FIGURA 2.12 CURVAS DIMENSIONALES

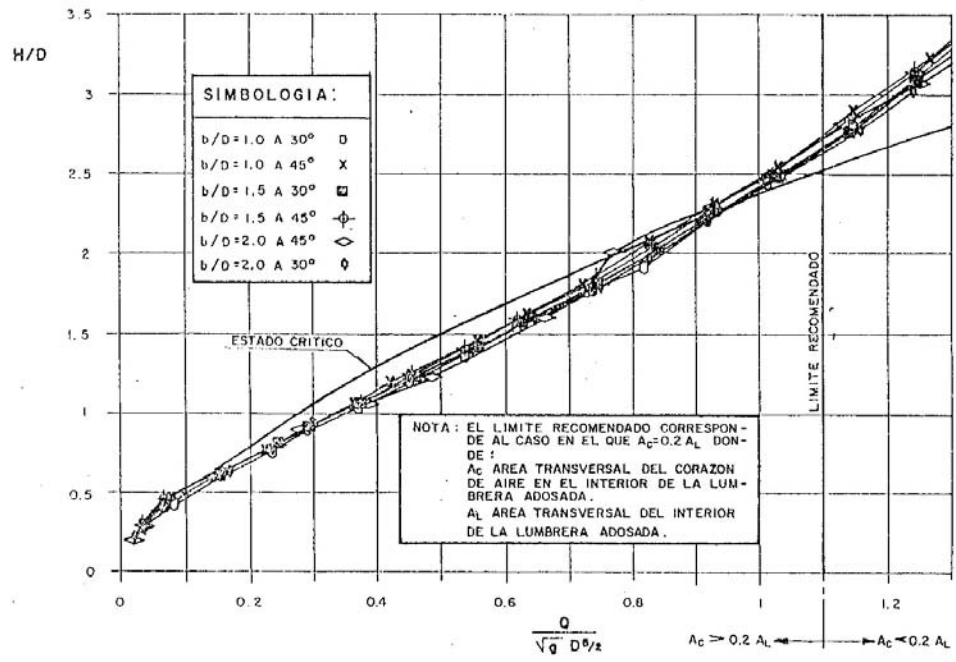


FIGURA 2.11 CURVA DE ENERGIA ESPECIFICA

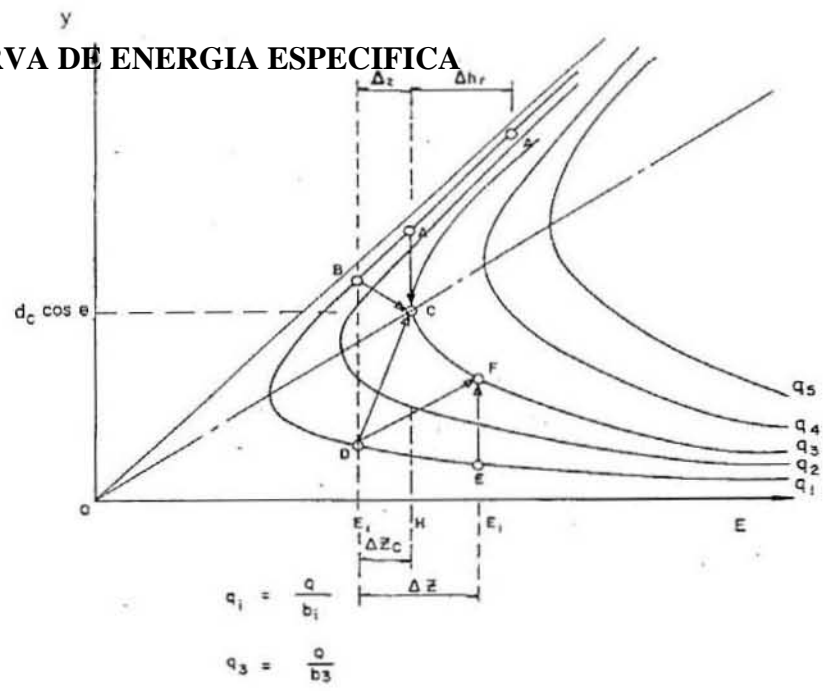


FIGURA 2.10 LUMBRERA DE RANURA VERTICAL

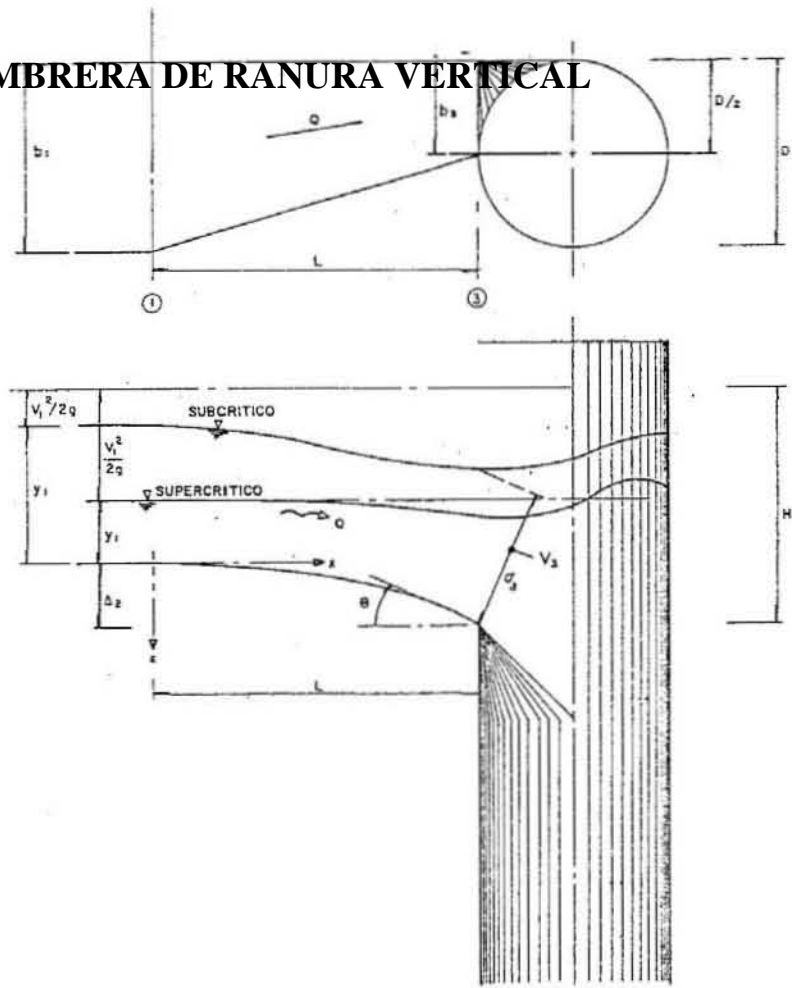
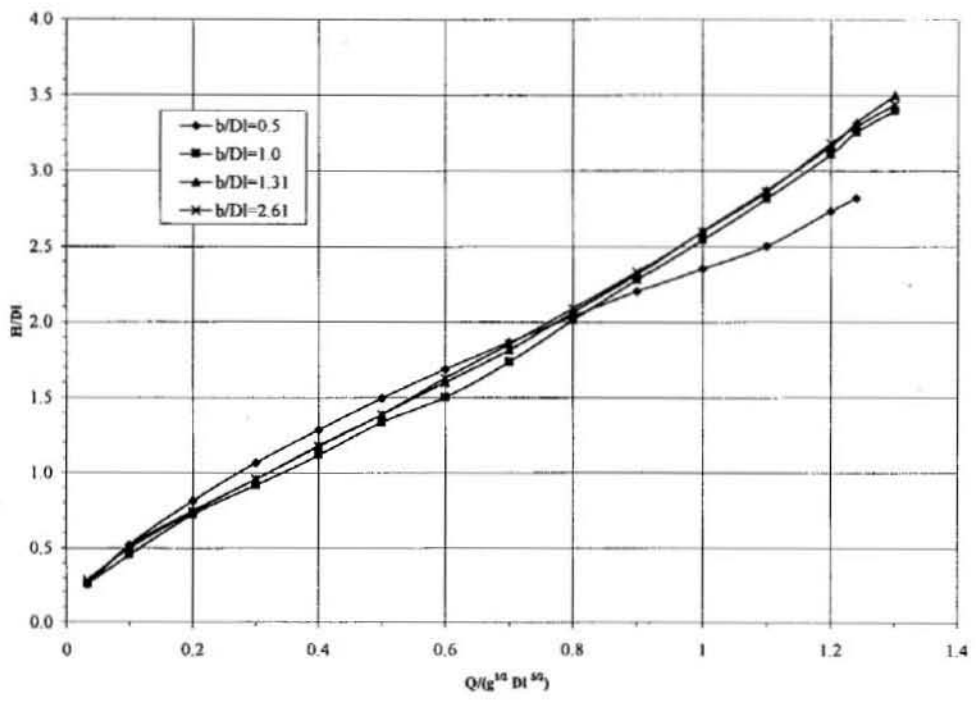


FIGURA 2.13 CURVAS DIMENSIONALES



ANEXO C

**REPORTE FOTOGRAFICO
DE LABORATORIO**



Foto 1.

Modificación al cimacio de la transición del canal de aproximación de la captación de la Lumbra 2 del Túnel Río de los Remedios..



Foto 2.

Eliminación del cimacio, conservando la elevación del canal de aproximación , con pendiente nula



Foto 3.

Funcionamiento del modelo de captación de la L2 del TRR modificado.



Foto 4.

Adecuación del modelo de la captación de la Obra de Toma del Gran Canal a la lumbrera 8 del I.O.



Foto 5.

Ajustes para la realización de ensayos al modelo de la L8 - IO.



Foto 6.

Preparativos para la realización de ensayos



Foto 7.

Revisión y adecuación del modelo utilizado en laboratorio.

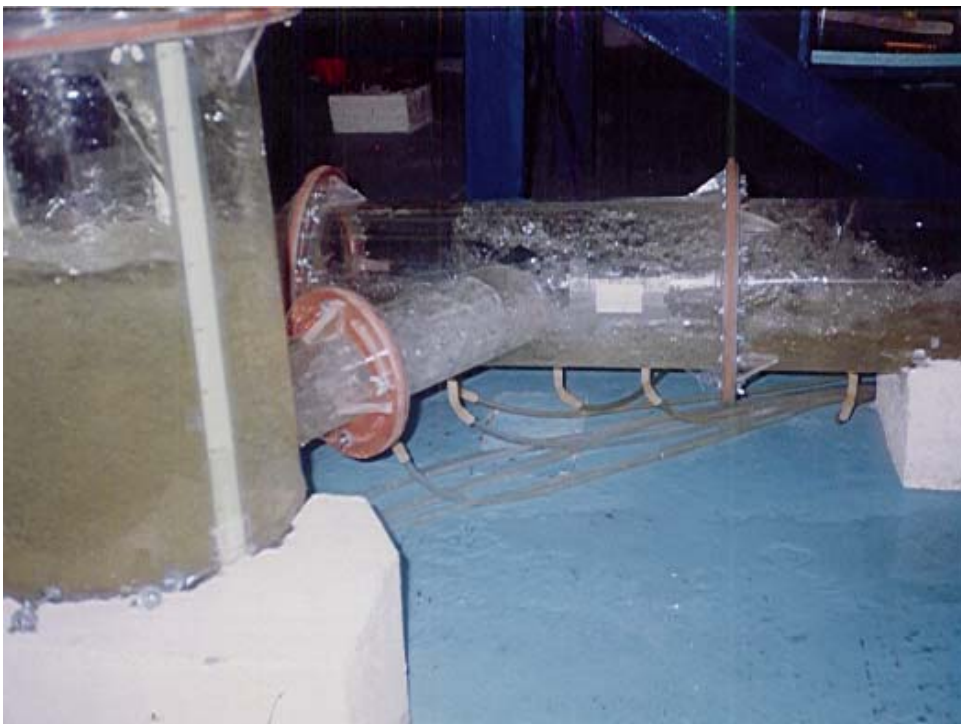


Foto 8.

Comprobación del funcionamiento del modelo



Foto 9.

Vista general
del modelo
utilizado.



Foto10.
Realización
de ensayos
en el
modelo de
prueba



Dsc01945.jpg

Foto 11.
Vista del canal de llegada sin cimacio $S=0$



Figura 12.
Arreglo y calibración del modelo

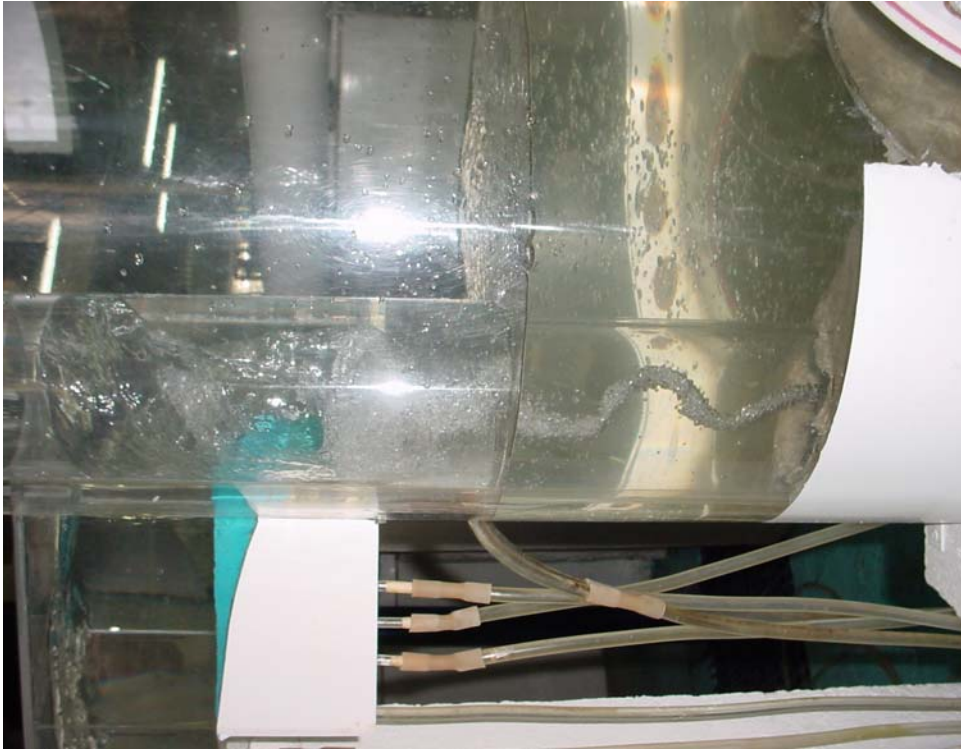


Figura 13

Vista del efecto de vórtice en la lumbrera adosada



Figura 14

Vista de los diferentes tipos de flujo en las partes que conforman una captación



Figura 15

Vista del flujo en el canal de llegada hacia la lumbrera.

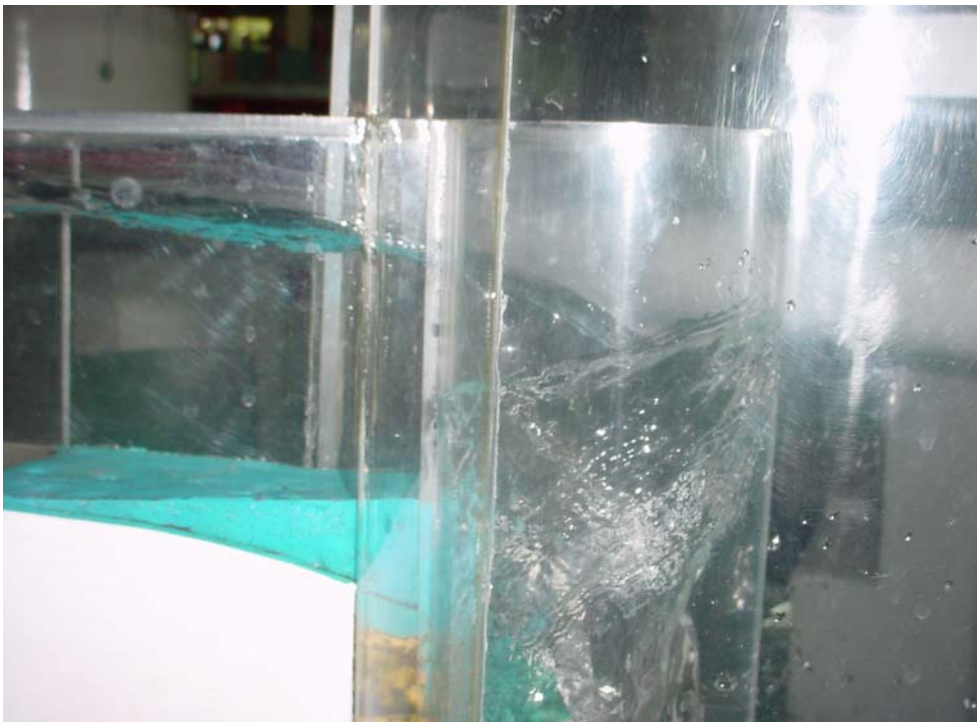


Figura 16

Vista del choque del flujo principal con el retornante.



Figura 17

Otra vista de los diferentes tipos de flujo en una captación incluyendo el de vórtice.



Foto 18

Toma de lecturas en el tablero de los piezómetros colocados en el modelo.

ANEXO D
FOTOGRAFIAS DE RECORRIDOS
EN CAMPO



Fotos 1 y 2
Efectos de la
corrosión y
erosión en
las
lumberas en
operación.





Fotos 3 y 4
Mismos
efectos que en
las fotos
anteriores





Foto 5
Vista de las visitas con personal de la DGCOH



Foto 6
Vista de una compuerta de control de flujo.



Foto 7
Daños en los mecanismos de operación



Foto 8
Visita a la planta de bombeo Zaragoza



Fotos 9 y 10

Vista de las condiciones de operación de la planta de bombeo Zaragoza en época de estiaje





Fotos 11 y 12

Vista de las
compuertas de
control en planta
de bombeo
Zaragoza





Fotos 13 y
14

Mismo
caso
que en
fotos
anteriores





Foto 15

Vista de los elementos electromecánicos de operación. en planta de bombeo Zaragoza



Foto 16

Vista de una caída libre en una lumbrera en época de estiaje



Fotos 17 y
18
Caída libre
en una lum-
brera y sus
efectos





Foto 19

Efectos de corrosión en las paredes de una lumbrera



Foto 20

Funcionamiento de una compuerta de control



Fotos 21 y 22
Vista de los daños ocasionados en las lumbreras por acumulación de gases en el interior





Fotos 23 y 24
Vista de los Canales de alivio del gran canal con las compuertas casi cerradas en su totalidad





Fotos 25 y
26

Condiciones
de operación
de la obra de
toma del
gran canal
en un día en
época de
estiaje





Fotos 27 y
28

Mismo
caso que
las fotos
anteriores





Fotos 29 y
30

Obra de
toma del
gran canal



Referencias

- 1.Hager, Willi. Relaciones carga gasto para lumbreras vórtice. Traducción realizada por Ingeniería, Desarrollo y Sistemas S.A.
- 2.Quick, Michael. Análisis del vórtice espiral y del vórtice de ranura vertical en lumbreras de caída. Traducción realizada por Ingeniería, Desarrollo y Sistemas S.A.
- 3.Gilberto Sotelo y Gabriel Echávez. Un criterio para el diseño hidráulico de una cámara en espiral sobre una lumbrera.
Informe del Instituto de Ingeniería febrero de 1971.
- 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, 7B, 7C 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 DGCOH del DDF 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 DGCOH del DDF 1991.
- 6.Gilberto Sotelo. Hidráulica General Fundamentos
Ed. Limusa, México, 1974.
- 7.Gilberto Sotelo. Hidráulica de Canales.
Facultad de Ingeniería UNAM. México 2001.
- 8.Ramón Domínguez Mora. El Sistema Principal de Drenaje del Area Metropolitana del Valle de México.
Instituto de Ingeniería UNAM, México 2001
9. El Sistema de Drenaje Profundo de la Ciudad de México.
DGCOH DDF, México 1996.
10. Alcantarillado 2000 Estrategia para la Ciudad de México.
DGCOH DDF, México 1998.
11. Estudio experimental de captaciones con descarga directa a lumbrera vertical y túnel profundo, Informe final realizado por Ingeniería, Desarrollo y Sistemas S. A. para la DGCOH del DDF 1989.
12. Drioli, C. Esperienze su installazioni con pozzo di scarico a Vortice (Observations on vertical vortex shafts), L' Energia Electrica, vol 46, 1969.

13. Pica, M. Scaricatori a vortice (Vortex shafts), L' Energia Elettrica, vol. 47. 1970.
14. Hager, W. H. Head- discharge relation for vortex shaft. J. Hydr. Eng. ASCE 1985.
15. Vallentine, H. R. Applied hydrodynamics. Butterworths Press, London 1967.
16. Binnie, A. M. and Hookings, G. A. Experiments on whirlpools. Proc. of the Royal Society, series A. 1948.
17. Viparelli, M. Su un particolare tipo di imbocco e sull effluso con vortice , (On a particular inlet type and its discharge characteristics for vortex flow), L' Energia Elettrica 1950.