

01172
1
2ej



FACULTAD DE INGENIERIA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO

**“ESTUDIO EXPERIMENTAL DE PLACAS
ORIFICIO INSTALADAS EN SERIE EN
UNA TUBERIA A PRESION”**

T E S I S

Presentada por:

Gad Granados Islas

Como requisito para obtener el grado de

Maestro en Ingeniería

(Aprovechamientos Hidráulicos)

Director de Tesis:

M. I. Lázaro Aguilar Moreno

CIUDAD UNIVERSITARIA
1991

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México



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 está 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.

I N D I C E

1. INTRODUCCION	1
2. ANTECEDENTES	5
2.1 Práctica actual de diseño de placas orificio para medición de gasto	16
2.2 Práctica actual de diseño de placas orificio en dispositivos de disipación de carga	22
2.3 Deficiencias en el diseño actual de placas orificio instaladas en serie	27
2.4 Antecedentes experimentales	28
3. INSTALACION EXPERIMENTAL Y PRUEBAS EFECTUADAS	49
3.1 Instalación experimental	49
3.2 Descripción de las pruebas efectuadas	52
4. ANALISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS	56
4.1 Distribución de presión sobre la placa orificio	56
4.2 Comportamiento de la pérdida de carga para placas en serie	70
4.3 Patrón de flujo en tuberías con placas orificio en serie	79

5. CONCLUSIONES	86
5.1 Diámetro del ramal, relación β y número de placas	87
5.2 Longitud del ramal	91
5.3 Espesor de la placa	95
5.4 Comentarios	99

1. INTRODUCCION

La contrastante distribución del agua superficial con respecto a la distribución de la población y sus actividades productivas en el país ha dado como resultado que se tengan grandes dificultades y un alto costo económico para satisfacer las demandas de agua potable.

En el norte y en el altiplano central, más de la mitad del territorio, se registra un 19% del escurrimiento medio anual. Sin embargo en esa misma región se asienta el 60% de la población, se tiene el 70% de la producción manufacturera y el 40% de la superficie con agricultura de temporal. Por el contrario, en el sureste, en una superficie menor al 25% del territorio nacional, escurre el 67% del volumen total y habita sólo el 24% de la población.

Por otra parte, el 25% de la población se localiza a una elevación superior a los 2000 metros sobre el nivel del mar, en donde sólo se cuenta con el 4% del escurrimiento. En cambio, por debajo de los 500 metros se asienta también un 25% de la población y se cuenta con más del 50% del escurrimiento total [1].

Lo anterior es una de las principales causas de que cada vez se tengan que construir acueductos de importancia, de gran complejidad en su diseño y costos crecientes.

Como ejemplos de estas grandes obras se pueden citar los acueductos: Cutzamala, Linares-Monterrey, Chapala-Guadalajara y Río Colorado- Tijuana.

En conducciones de agua de tal magnitud se presentan problemas de operación y funcionamiento que implican riesgos de falla en los tramos más exigidos o tramos críticos y que de ocurrir fallas graves, representan elevados costos de reparación y grandes problemas políticos y sociales.

Entre los diversos problemas que se pueden presentar en estas enormes obras para conducir agua están los fenómenos llamados transitorios hidráulicos, que consisten en grandes ascensos bruscos de presión (golpe de ariete), y alternadamente, considerables caídas de presión, que podrían eventualmente reventar o colapsar las tuberías [2].

Otro problema importante es la inclusión de aire en el flujo conducido, que en ocasiones puede representar un serio peligro para las conducciones y que, generalmente, causa diversos problemas tales como: oscilaciones de presión, inestabilidad del flujo, supersaturación de oxígeno en el agua que la vuelve químicamente agresiva y causa problemas en la industria, y en los filtros de arena de plantas potabilizadoras debido a la lenta liberación del aire en forma de burbujas [3], [4] y [5].

Es por lo anterior que se requiere diseñar estructuras y mecanismos de protección y control cuyos costos de diseño y construcción, comparados con el costo total del acueducto, resultan insignificantes si se evalúan además los costos y

problemas que implica una falla mayor en un acueducto de tal importancia.

No es objeto de este trabajo el analizar, o describir siquiera, los problemas mencionados; pero es necesario considerar su existencia, para comprender su importancia y necesidad de ser atendidos dentro del diseño y construcción de los acueductos, tomando en cuenta que estos fenómenos son afectados por la existencia del factor de escala en estos fenómenos, es decir, que mientras mayor sea el acueducto, mayores serán también los problemas involucrados.

En este trabajo se hablará de uno de los dispositivos de control que permite dar solución a algunos de los problemas de incorporación de aire al flujo. Este dispositivo es el denominado "quiebracargas", en el cual se aprovechan las cualidades de la placa orificio para producir pérdida de carga al ser instalada en serie dentro de un ramal paralelo al acueducto.

De esta manera, en el capítulo 2 se proporciona una panorámica de la evolución de los estudios experimentales y la estandarización de la placa orificio, que han permitido normar su diseño y ubicación más adecuada para usarla como medidor de gasto y de los experimentos que han permitido conocer su comportamiento como disipador de carga, así como las prácticas usuales de diseño de las placas para los dos usos mencionados.

En el capítulo 3 se hace una reseña de los experimentos efectuados para observar y medir el comportamiento de placas orificio en serie, así como una descripción de la instalación y modelo experimental utilizado, el cual fue construido e instrumentado en el Laboratorio de Hidromecánica del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

Los resultados obtenidos de las pruebas y experimentos realizados que incluyen el comportamiento de la distribución de presión sobre la placa, la pérdida de carga producida por placas instaladas en serie y del patrón de flujo que se tiene en este tipo de arreglos son presentados en el capítulo 4.

Finalmente, en el capítulo 5 se presentan las recomendaciones de diseño de placas orificio en serie como disipadoras de carga y las conclusiones y comentarios finales del trabajo.

Es deseo del autor que la información y resultados presentados en este trabajo, sirvan como un escalón en el conocimiento de los dispositivos de disipación de carga y que contribuyan para que los investigadores y estudiosos se interesen en los problemas de funcionamiento y operación de los acueductos, de manera que se llene en un futuro próximo la laguna de entendimiento que todavía existe, para los problemas que se presentan en las grandes y pequeñas conducciones de agua, a fin de que los acueductos sean proyectados y diseñados en forma cada vez más eficiente y económica.

2. ANTECEDENTES

En los acueductos se requiere efectuar diversas funciones entre las que están las de medición de gasto y las de control de flujo. La medición de gasto es una función importante tanto para distribución como para efecto de evaluación del costo del agua y verificación del buen funcionamiento de los sistemas. Para efectuar esta función existen diversos dispositivos: medidores tipo annubar, toberas, tubos venturi y placas orificio todos ellos para flujo a presión; así como vertedores y canales de flujo crítico para flujo a superficie libre, entre otros.

Algunas de las funciones de control de flujo, que involucran disipación de carga, son las efectuadas en los dispositivos de entrada y salida de flujo con pérdida diferencial a tanques unidireccionales y cámaras de aire, el control de gastos en ramales para derivación, el control de piezométrica para hacer entrar a las bombas a su intervalo de operación (este aspecto se explica con más detalle en este mismo capítulo) y para mantener los acueductos siempre a presión cuando operan con gastos menores al de diseño. Para efectuar estas funciones también se pueden usar diferentes dispositivos o combinaciones de ellos, entre los que se cuentan válvulas apropiadas, toberas y placas orificio.

Un dispositivo particularmente interesante, debido a su economía y relativa simplicidad en el diseño, es la placa orificio que permite efectuar las funciones mencionadas (e incluso otras como la mezcla de reactivos en la desinfección de agua), ya sea por si misma o combinada con otros dispositivos.

La placa orificio como dispositivo medidor de gasto de fluidos que fluyen a través de tuberías a presión, ha sido extensamente estudiada y su utilización para esa función comenzó a ser normada en 1930 por la desaparecida International Federation of National Standardizing Associations (I.S.A. 30), que en 1948 se transformó en la actual International Organization for Standardization (ISO). Los resultados de las reuniones de trabajo de los países miembros, referentes a las placas orificio, fueron publicados originalmente en la recomendación ISO R541 de 1967, titulada "Medición de gasto de fluidos por medio de placas orificio y toberas", que contenía las recomendaciones de diseño, instalación y utilización de esos dispositivos primarios [6].

El trabajo realizado a lo largo de 13 años por investigadores y estudiosos del funcionamiento de los dispositivos primarios, así como los resultados de las reuniones de trabajo de la ISO efectuadas durante ese lapso de tiempo (1967-1980), quedaron resumidos en la norma ISO 5167 de febrero de 1980 que contiene, revisadas y corregidas, las recomendaciones de diseño, instalación y utilización de los dispositivos primarios para medición de flujo de fluidos en tuberías a presión [7]. Como puede notarse el diseño de una placa orificio y sus condiciones de instalación para medición de gasto no representa mayor problema ya que se cuenta con normas, recomendaciones e información apropiada y suficiente para tal efecto.

Sin embargo, en lo que se refiere a otros usos de la placa orificio, aún resta por efectuarse investigación y experimentación debido a que en casos como los que serán descritos posteriormente, el diseño de dispositivos con base en placas orificio colocadas en serie para producir pérdida de carga resultan poco prácticos y no precisamente económicos.

Por ejemplo, en lo que se refiere a la función de control de flujo en los sistemas de conducción que tienen plantas de bombeo con bombas instaladas en paralelo, cuando requieren ser operadas con gastos menores al de diseño (es decir con un número de equipos menor al de proyecto), se puede presentar el problema de que los equipos se salgan de sus intervalos de operación y por tanto la planta esté imposibilitada de operar.

Para entender este problema se comenzará por explicar, sin pretensiones de profundidad, algunos conceptos básicos referentes al funcionamiento y operación de las bombas. La carga dinámica total (H), es la energía entregada al líquido por una bomba y es función del gasto (Q), considerando que la velocidad de rotación de la bomba es constante. En la práctica se trabaja con una gráfica que relaciona la carga con el gasto.

El rendimiento hidráulico o eficiencia de una bomba (η) es el cociente de la potencia hidráulica recibida por el fluido (P_h), entre la potencia mecánica entregada al eje de la bomba por el motor (P_m), es decir

$$\eta = P_h/P_m \quad (2.1)$$

La eficiencia de una bomba también es una función del gasto y como en el caso anterior se trabaja con una gráfica que relaciona η con Q. Al punto donde η es máxima se le llama

punto de máxima eficiencia y debe procurarse que la bomba trabaje siempre lo más cercana a dicho punto.

Se llama carga neta positiva en la succión (CNPS) a la diferencia entre la carga de presión absoluta en la succión de la bomba con referencia a su eje (p/γ), más la carga de velocidad en ese punto ($v^2/2g$), menos la carga de presión absoluta de vaporización a la temperatura de trabajo (p_v/γ). De esta forma la CNPS estará dada por

$$\text{CNPS} = \frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} - \frac{p_v}{\gamma} \quad (2.2)$$

Al proyectar una planta de bombeo se debe cuidar que la CNPS disponible sea mayor o igual que la CNPS requerida por las bombas que habrán de instalarse, de tal manera que no corran riesgo de cavitación ya que si lo anterior no se cumple, en algún punto de la máquina donde las velocidades sean altas, puede ocurrir que la presión se aproxime a la de vaporización y con ello se formarían burbujas de vapor, dando inicio al fenómeno de cavitación. Por ello, el fabricante de las bombas proporciona la gráfica de CNPS mínima requerida para el buen funcionamiento de sus máquinas.

En la figura 2.1 se muestra una gráfica conteniendo estas tres variables en función del gasto.

Para el diseño de plantas de bombeo con bombas instaladas en paralelo se requiere elaborar la gráfica carga-gasto para el número de equipos que vaya a utilizarse. Para obtener esta curva se multiplican las abscisas (gastos) de la curva de una bomba por 1, 2, 3, ..., hasta el número de equipos que serán instalados. En la figura 2.2 se muestra un ejemplo de una curva para tres bombas en paralelo calculada a partir de la figura 2.1.

En esa gráfica es conveniente dibujar la curva denominada curva característica del sistema o curva H-Q (carga-gasto), para lo cual H se obtiene de sumar el desnivel o carga estática (H_e) que hay que elevar el agua para su entrega, más la carga que se pierde por fricción (H_f) al conducir el gasto Q a lo largo de la tubería. La pérdida de carga H_f es función del gasto al cuadrado multiplicado por una constante K característica de cada conducción. De esta forma se obtiene

$$H = H_e + KQ^2 \quad (2.3)$$

La gráfica de la curva característica del acueducto se muestra en la misma figura 2.2, en ella se puede observar que, debido a que las bombas se seleccionan para que trabajando en sus puntos de máxima eficiencia proporcionen el gasto y la carga de diseño, si se requiere operar un número de equipos menor al de proyecto, se verifica un desplazamiento de los puntos de operación de las bombas haciendo que, por ejemplo, el sistema de la figura 2.2 no pueda operar con una bomba. Si se examina el efecto que este desplazamiento produce en las curvas de la CNPS y de η correspondientes a una bomba, figura 2.1, se observa que mientras la CNPS requerida aumenta, la η disminuye. Para algunos casos se podría tener que la planta de bombeo este imposibilitada de ser operada con un número de bombas menor al de proyecto, es decir, a gastos parciales.

La solución de este problema puede efectuarse de diferentes maneras, pero si después de estudiarlas todas se llega a la conclusión de que la única solución viable es castigar el rendimiento global del sistema incorporando dispositivos de disipación de carga, esto puede efectuarse mediante placas orificio o válvulas de regulación de gasto.

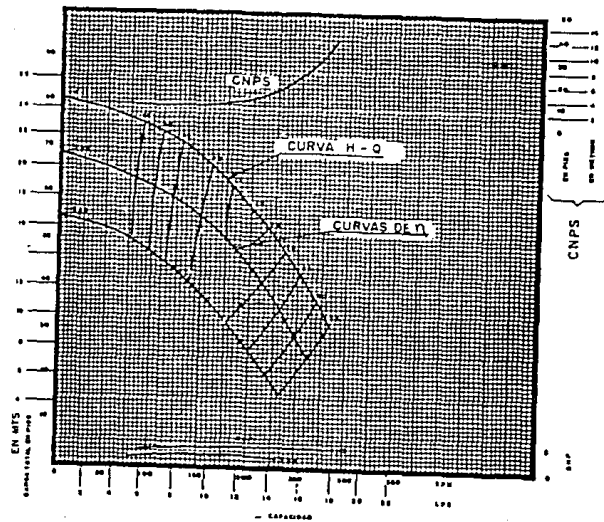


Figura 2.1 Curvas características para la selección de una bomba.

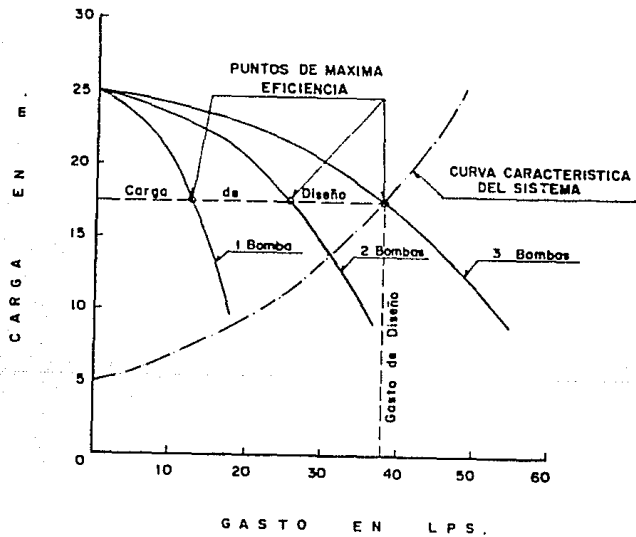


Figura 2.2 Curva carga-gasto para tres bombas en paralelo.

Otros problemas relacionados con el funcionamiento hidráulico de los acueductos que dependen además del perfil de la tubería, son los que se derivan del hecho de tener tramos a presión y tramos a superficie libre. Esto ocurre porque los acueductos se diseñan para el gasto de proyecto y al inicio de su operación se tiene la necesidad o conveniencia de operarlos con gastos menores. También ocurre cuando el acueducto incluye plantas de bombeo con bombas en paralelo; ya que el arranque de las bombas debe hacerse una por una, y de esta manera cada vez que se ponga en marcha el acueducto operará con gastos parciales durante periodos cortos de tiempo. Los problemas que se originan consisten principalmente en

1) Velocidades que pueden ser mayores que las permisibles en los tramos con flujo en canal, dependiendo del gasto y la pendiente de la plantilla del tubo en ese tramo y

2) Arrastre de aire en las secciones en las que se efectúa la transición de flujo con superficie libre a flujo a presión.

En el primer caso, velocidades mayores que las permisibles pueden provocar desprendimiento de la protección interior de la tubería e inclusive desgaste de la tubería por abrasión. En el segundo caso, el aire arrastrado por el flujo es llevado hacia aguas abajo y se puede acumular en los puntos altos no venteados del perfil de la tubería. Si el perfil es muy ondulado, existirán muchos puntos de probable acumulación de aire. En los sitios donde se acumula aire se produce estrangulamiento del área de la sección lo cual origina una disminución gradual del gasto en operación conforme crece el volumen de aire acumulado.

Al ir aumentando el volumen de aire acumulado y con ello el grado de obstrucción en la sección, se llega a un momento en que debido al incremento de la velocidad en la sección,

asociado a la disminución de área, el aire atrapado es arrastrado en forma parcial o total creando con esto un estado de flujo inestable. El problema del aire atrapado es en ocasiones muy grave, sobre todo cuando se tienen perfiles muy accidentados debido a que no resulta económico instalar un número muy grande de válvulas de eliminación continua de aire y todavía más si se considera que según la práctica en el país, el mantenimiento y revisión, no sólo de las válvulas de aire sino de todas las instalaciones de los acueductos es a menudo descuidada.

Para evitar estos problemas, recientemente se han venido utilizando unos dispositivos llamados quiebracargas cuya principal función es producir una pérdida de carga apropiada que permita, ya sea mantener la conducción funcionando a presión en toda su longitud, o bien provocar el corrimiento necesario en los puntos de operación de las bombas para que funcionen en el punto de máxima eficiencia. Este dispositivo consiste en una serie de ramales paralelos a la línea principal de conducción en las cuales son instaladas una o varias placas orificio en serie para producir la pérdida de carga necesaria. Las diferentes ramas son controladas mediante juegos de válvulas ubicadas apropiadamente (figura 2.3).

Para comprender mejor el funcionamiento de estos dispositivos se proporciona a continuación un ejemplo muy simple.

Supóngase que en un proyecto se requiere construir un acueducto para satisfacer las necesidades de agua potable de una población cuya demanda para el horizonte de proyecto es satisfecha por el gasto Q .

Al considerar su curva de oferta y demanda se observa que en el año t_1 se requerirá enviar solamente un gasto Q_1 mientras que en el año t_2 se deberá incrementar dicho gasto hasta un

valor Q_j . Finalmente, en el año de proyecto se tendrá que enviar el gasto de diseño Q .

Se tendrán así tres condiciones de operación, dos de ellas con gastos menores al de diseño y dado que el perfil de la tubería presenta zonas de rápidas para esos gastos parciales se requiere instalar un dispositivo que produzca la pérdida de carga apropiada para eliminar el funcionamiento del acueducto con rápidas. Se selecciona un quiebracargas como dispositivo de control que será diseñado con dos ramas: una para el gasto Q_i y la otra para Q_j .

El perfil de la tubería tiene la forma que se muestra en la figura 2.4 donde se pueden observar las zonas con funcionamiento a superficie libre y los puntos de posible acumulación de aire; también se muestra allí las pérdidas de carga ΔH_i y ΔH_j para los gastos Q_i y Q_j , respectivamente, que es necesario introducir para eliminar los problemas de arrastre de aire. Para cada rama, con base en la pérdida de carga necesaria ΔH_i o ΔH_j y al gasto que circulará por ella, se determina el número de placas necesarias y la geometría de las mismas. Además, en función de las características de los ramales, se seleccionan las longitudes de los tramos rectos de tubería que deberán existir aguas arriba de la primera placa, entre placa y placa, y aguas abajo de la última placa para garantizar el buen funcionamiento del dispositivo.

Debido a que se requieren válvulas de seccionamiento para el control de los ramales y considerando que su costo es función del diámetro, se busca que el diámetro de la tubería de los ramales sea el menor posible cuidando restricciones de velocidad y en forma implícita de cavitación en la placa orificio. En la figura 2.3 se muestra un croquis del quiebracargas diseñado para el ejemplo. En ella se observa la disposición de las placas orificio y la ubicación de las válvulas de control. La manera de operar es la siguiente: En

el año t_1 se mantendrá cerrada la válvula V_a de la tubería principal y las válvulas V_{a_j} del ramal j , dejando abierto al flujo únicamente el ramal i con lo cual el perfil del acueducto será el presentado en la figura 2.4 b.

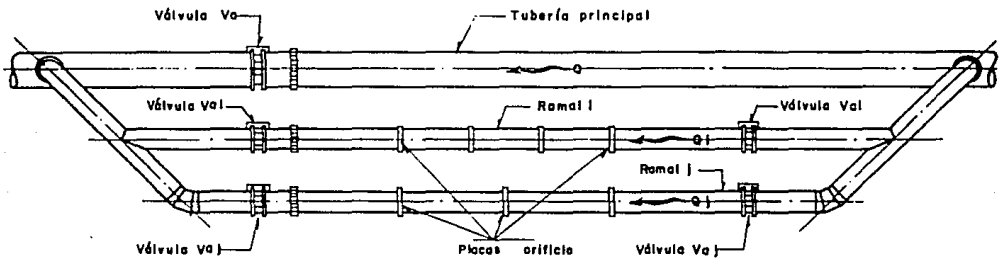
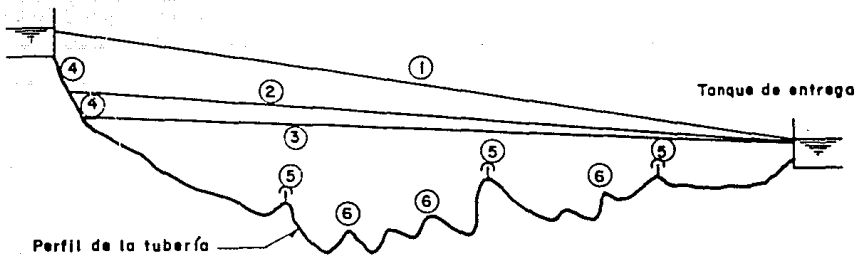
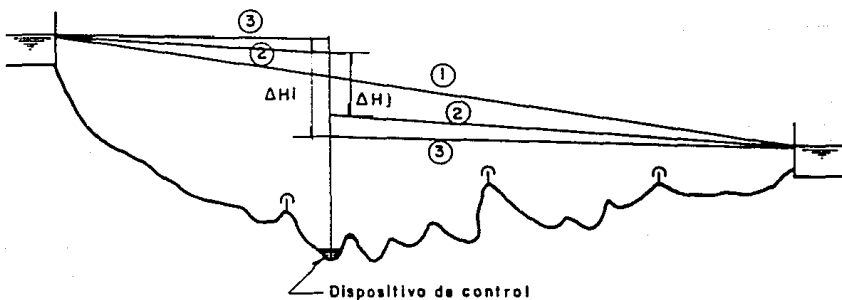


Figura 2.3 Esquema de un dispositivo de disipación de carga.



a) Problema de entrada y arrastre de aire



b) Ubicación del dispositivo de control y pérdidas que se requiere introducir para presurizar la conducción en toda su longitud.

- ① LINEA PIEZOMETRICA PARA EL GASTO DE DISEÑO Q
- ② LINEA PIEZOMETRICA PARA EL GASTO DE DISEÑO Q_j
- ③ LINEA PIEZOMETRICA PARA EL GASTO DE DISEÑO Q_i
- ④ TRAMO CON FLUJO EN "RAPIDA" O NO PRESURIZADO
- ⑤ PUNTOS VENTeadOS DEL PERFIL
- ⑥ PUNTOS DE PROBABLE ACUMULACION DE AIRE

Figura 2.4 Perfiles para el problema de arrastre de aire (rápidas).

A partir del año t₁, se cerrarán las válvulas V₁ y se abrirá al flujo el ramal j para circular por allí el gasto Q_j correspondiente a esa etapa de operación. Al circular el flujo a través de las placas instaladas en ese ramal se producirá la pérdida de carga apropiada para obtener el perfil mostrado en la figura 2.4 b . Finalmente, cuando se llega a la etapa en la cual se requiere enviar el gasto de diseño, se cierran los ramales i y j y se dejan abiertas las válvulas de la tubería principal, ya que no se requiere introducir pérdida de carga.

2.1 Práctica actual de diseño de placas orificio para medición de gasto

Para diseñar una placa orificio como dispositivo aforador se utilizan las recomendaciones contenidas en la Norma ISO 5167 (E) de 1980.

Las características geométricas de una placa orificio son su diámetro de orificio (d), la relación entre éste y el diámetro del tubo en que se aloja ($\beta=d/D$), el espesor de la placa (E) y el de su borde (e), (figura 2.5). Las condiciones de instalación requeridas más importantes son la ubicación de las tomas de presión y las longitudes rectas mínimas necesarias hacia aguas arriba y aguas abajo del dispositivo. La norma acepta tres tipos de ubicación para las tomas de presión que son; en las esquinas (formadas por la placa y la pared del tubo), a D y D/2 de separación hacia aguas arriba y aguas abajo de la cara anterior de la placa, y en las bridas. Las características de estos arreglos se pueden observar en la figura 2.6.

La información requerida para diseñar una placa es el diámetro de la tubería en la que se instalará (D), el intervalo de gastos que se quiere medir y la carga que se permite perder a través del dispositivo ($\Delta\omega$). Si el orificio y las tomas de presión se construyen de acuerdo a la norma

mencionada, la ecuación que nos permite conocer el gasto en función de la diferencia de presión entre las tomas es

$$Q = \alpha A_o \sqrt{2g\Delta h} \quad (2.4)$$

donde, Q es el gasto volumétrico que pasa por el orificio (m^3/s), α es un coeficiente de flujo que depende principalmente de β y de Re , A_o es el área del orificio (m^2), g es la constante gravitacional ($9.81 m/s^2$) y Δh es la diferencia de carga de presión entre las tomas (m), que puede ser medida con un manómetro diferencial conectado a las tomas de presión. La relación que existe entre la carga de presión diferencial entre las tomas y la pérdida de carga ($\Delta\omega$) está dada por la ecuación

$$\Delta\omega = \left(\frac{1 - \alpha\beta^2}{1 + \alpha\beta^2} \right) \Delta h \quad (2.5)$$

Para obtener el valor del coeficiente α , la ISO 5167 (E) proporciona tablas para los diferentes arreglos de tomas de presión; por ejemplo, para el arreglo de tomas de presión separadas a D y $D/2$, el valor de α se obtiene de la tabla 2.1. Para usarla se requiere conocer la relación β (para inicio del cálculo se propone un valor para β y se corrige posteriormente en forma iterativa) y el número de Reynolds Re que está dado por la ecuación

$$Re = \frac{VD}{\nu} \quad (2.6)$$

donde, V es la velocidad media en el tubo (m/s), D es el diámetro del tubo (m) y ν es la viscosidad cinemática del agua (m^2/s).

TABLA 2.1

VALORES DEL COEFICIENTE α PARA TOMAS DE PRESION A D Y D/2

Re_D	$\times 10^3$	$\times 10^4$	$\times 10^4$	$\times 10^4$	$\times 10^4$	$\times 10^4$	$\times 10^5$	$\times 10^5$	$\times 10^6$	$\times 10^7$
β	5	1	2	3	5	7	1	3	1	:
.20	.6001	.5990	.5984	.5981	.5979	.5978	.5977	.5975	.5974	.5974
.22	.6013	.5999	.5991	.5987	.5984	.9583	.5982	.5980	.5979	.5978
.24	.6027	.6010	.5999	.5995	.5991	.5990	.5988	.5986	.5984	.5984
.26	.6043	.6022	.6009	.6004	.6000	.5997	.5996	.5993	.5991	.5990
.28	.6062	.6036	.6021	.6015	.6009	.6007	.6005	.6001	.5999	.5998
.30		.6052	.6034	.6027	.6021	.6018	.6015	.6011	.6008	.6007
.32		.6071	.6050	.6041	.6034	.6030	.6027	.6022	.6020	.6018
.34		.6093	.6068	.6058	.6049	.6045	.6042	.6035	.6033	.6031
.36		.6117	.6088	.6077	.6067	.6062	.6058	.6051	.6048	.6046
.38		.6145	.6111	.6098	.6087	.6081	.6077	.6069	.6065	.6063
.40		.6176	.6138	.6123	.6110	.6104	.6099	.6089	.6085	.6082
.42			.6168	.6151	.6136	.6129	.6123	.6113	.6108	.6105
.44			.6201	.6182	.6166	.6158	.6151	.6139	.6134	.6130
.46			.6239	.6218	.6199	.6190	.6183	.6169	.6163	.6159
.48			.6281	.6258	.6237	.6226	.6218	.6203	.6196	.6192
.50			.6328	.6302	.6279	.6267	.6258	.6242	.6234	.6230
.52			.6381	.6352	.6326	.6313	.6303	.6285	.6276	.6271
.54			.6439	.6407	.6379	.6365	.6354	.6333	.6324	.6318
.56			.6504	.6469	.6437	.6422	.6410	.6387	.6377	.6371
.58				.6538	.6503	.6486	.6473	.6448	.6436	.6430
.60				.6614	.6576	.6558	.6543	.6515	.6503	.6496
.62				.6700	.6658	.6638	.6621	.6591	.6577	.6569
.64				.6794	.6748	.6727	.6709	.6676	.6660	.6652
.66				.6900	.6850	.6826	.6806	.6770	.6754	.6744
.68				.7019	.6964	.6937	.6916	.6877	.6858	.6848
.70					.7091	.7063	.7039	.6996	.6976	.6965
.71					.7161	.7131	.7107	.7062	.7041	.7029
.72					.7236	.7204	.7178	.7131	.7109	.7097
.73					.7315	.7282	.7255	.7206	.7183	.7170
.74					.7399	.7365	.7337	.7285	.7261	.7248
.75					.7490	.7454	.7424	.7370	.7345	.7331

Referencia (7)

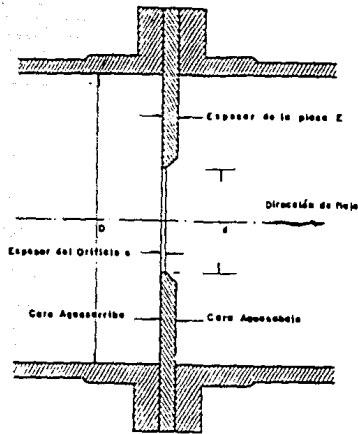
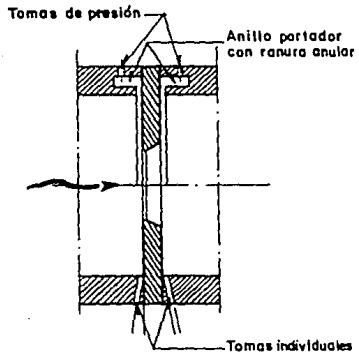
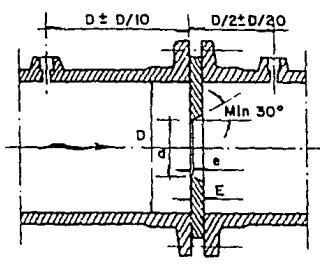


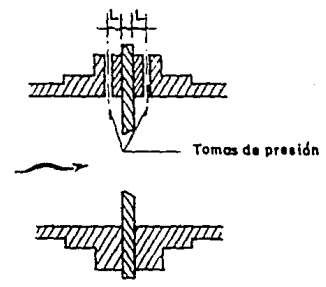
Figura 2.5 Geometría de una placa orificio para medición de flujo.



ORIFICIO CON TOMAS EN ESQUINA



ORIFICIO CON TOMAS A D Y $\frac{D}{2}$



ORIFICIO CON TOMAS EN LA BRIDA

Figura 2.6 Ubicación de las tomas de presión para una placa orificio aforadora.

De esta forma, para determinar el diámetro del orificio requerido para medir un intervalo de gastos dado, la ec. 2.4 puede expresarse como

$$A_0^2 = \left(\frac{1 - \alpha\beta^2}{1 + \alpha\beta^2} \right) \frac{Q^2}{2g\alpha^2\Delta\omega} \quad (2.7)$$

donde

$$A_0 = \frac{\pi d^2}{4} \quad (2.8)$$

Para resolver la ec 2.7 se toma el gasto máximo que se espera medir y la diferencia de carga $\Delta\omega$ que se permite perder. Como no se conoce el valor del coeficiente α , el cual depende de β y ésta a su vez depende del diámetro del orificio d , se puede suponer para inicio de cálculo un valor para β , el cual deberá ajustarse posteriormente en forma iterativa.

Por otra parte, la norma ISO indica varios requerimientos de instalación entre los que destaca que el dispositivo primario debe ser instalado en una posición tal que las condiciones de flujo inmediatamente aguas arriba tengan un perfil de velocidades totalmente desarrollado y libre de remolinos, a esto se debe que el dispositivo tenga que ser colocado entre dos tramos rectos de tubería de área constante, en el que no deberá haber obstrucciones ni conexiones de ramales.

Las longitudes rectas mínimas requeridas, tanto para aguas arriba como para aguas abajo se muestran en la tabla 2.2. En esta tabla, para los números fuera del paréntesis no es necesario agregar al coeficiente de flujo ninguna desviación por incertidumbre, mientras que para los valores dentro de paréntesis deberá agregarse ± 0.5 % de incertidumbre.

TABLA 2.2

LONGITUDES RECTAS MINIMAS REQUERIDAS PARA PLACAS ORIFICIO

β	AGUAS ARRIBA DEL PRIMER ORIFICIO (ENTRADA)							AGUAS ABAJO	
	CURVA A 90° O TEE (FLUJO DE UNA RAMA SOLAMENTE)	DOS O MAS CURVAS A 90° EN EL MISMO PLANO.	DOS O MAS CURVAS A 90° EN DIF. PLANOS	REDUCCION (2D A D) SOBRE UNA LONG. DE 1.5D A 3D	EXPANSION 0.5D A D EN UNA LONG. DE D A 2D	VALVULA DE GLOBO TOTALMENTE ABIERTA	VALVULA DE COMPUERTA TOTALMENTE ABIERTA	TOODS LOS ARREGLOS INCLUIDOS EN ESTA TABLA	
0.20	10 (6)	14 (7)	34 (17)	5	16 (8)	18 (9)	12 (6)	4 (2)	
0.25	10 (6)	14 (7)	34 (17)	5	16 (8)	18 (9)	12 (6)	4 (2)	
0.30	10 (6)	16 (8)	34 (17)	5	16 (8)	18 (9)	12 (6)	5 (2.5)	
0.35	12 (6)	16 (8)	36 (18)	5	16 (8)	18 (9)	12 (6)	5 (2.5)	
0.40	14 (7)	18 (9)	36 (18)	5	16 (8)	20 (10)	12 (6)	6 (3)	
0.45	14 (7)	18 (9)	38 (19)	5	17 (9)	20 (10)	12 (6)	6 (3)	
0.50	14 (7)	20 (10)	40 (20)	6 (5)	18 (9)	22 (11)	12 (6)	6 (3)	
0.55	16 (8)	22 (11)	44 (22)	8 (5)	20 (10)	24 (12)	14 (7)	6 (3)	
0.60	18 (9)	26 (13)	48 (24)	9 (5)	22 (11)	26 (13)	14 (7)	7 (3.5)	
0.65	22 (11)	32 (16)	54 (31)	11 (6)	25 (13)	28 (14)	16 (8)	7 (3.5)	
0.70	28 (14)	36 (18)	62 (35)	14 (7)	30 (15)	32 (16)	20 (10)	7 (3.5)	
0.75	36 (18)	42 (21)	70 (35)	22 (11)	38 (19)	36 (18)	24 (12)	8 (4)	
0.80	46 (23)	50 (25)	80 (40)	30 (15)	54 (27)	44 (22)	30 (15)	8 (4)	

PARA TODOS LOS	DISPOSITIVOS	LONGITUDES RECTAS MINIMAS REQUERIDAS HACIA AGUAS ARRIBA (ENTRADA)
VALORES DE β	REDUCCION ABRUPTA SIMETRICA CON UNA RELACION DE DIAMETROS > 0.5	30 (15)
	TUBO O ESTUCHE PARA TERMOMETRO CON DIAMETRO < 0.03 D	5 (3)
	TUBO O ESTUCHE PARA TERMOMETRO CON DIAMETRO ENTRE 0.03 D Y 0.13 D	20 (10)

LONGITUDES EXPRESADAS EN MULTIPLOS DE D QUE DEBEN SER MEDIDAS A PARTIR DE LA CARA AGUAS ARRIBA DEL DISPOSITIVO.

REFERENCIA (7)

El espesor del borde del orificio (e) deberá estar comprendido entre $0.005 D$ y $0.02 D$ mientras que el espesor de la placa (E) deberá estar entre e y $0.05 D$. Lo anteriormente descrito rige para cualquiera de los tres tipos de tomas de presión estandarizados por la ISO. Sin embargo, aquí sólo se hará referencia al tipo D y $D/2$, por ser el seleccionado para la instalación experimental (por razones económicas y de facilidad de construcción). Debe hacerse notar que lo anteriormente expuesto no libra al lector de consultar la mencionada norma cuando tenga que diseñar una placa orificio para aforo de flujo.

2.2 Práctica actual de diseño de placas orificio en serie como dispositivo de disipación de carga

Cuando se requiere diseñar una placa como parte de un dispositivo en el cual es colocada en serie para disipar carga, dentro de un quiebracargas por ejemplo, en la práctica actual se cuenta únicamente con la norma ISO cuya aplicación es inadecuada, como se verá posteriormente, por lo que el diseño puede resultar sobrado y caro.

Para el diseño de un quiebracargas se sabe de antemano la pérdida de carga total que se desea producir con el dispositivo y el gasto que deberá circular por los ramales. También se conoce el diámetro de la tubería principal, la cual ha sido diseñada para conducir el gasto de proyecto.

El diámetro de los ramales se selecciona en forma conjunta con el de los orificios, sin embargo, deberá cuidarse la restricción de velocidad máxima permisible, considerando la resistencia del tipo de material de los tubos y de la protección interior que requieran. El material de la tubería que usualmente se ha venido utilizando es acero al cual se le da protección interior por corrosión por lo que la

velocidad permisible generalmente recomendada es hasta de 5.0 m/s para que dicha protección no sea erosionada [8].

El procedimiento de cálculo para determinar el diámetro de los ramales y el diámetro y número de los orificios es iterativo y para ello se utiliza la ecuación 2.7. Para simplificar la solución de la ecuación 2.7, la práctica usual ha sido restringir la velocidad en el orificio a un valor máximo de 8 m/s, referencias [9] y [10], con lo cual resultan pérdidas de carga por orificio de alrededor de 9 metros de columna de agua (mca). Así, conocido el gasto y la velocidad máxima en el orificio, se obtienen su área y diámetro y con $\Delta\omega$ utilizando la ecuación 2.7 en forma iterativa se determina el valor de β . Con β conocido, se obtiene el diámetro del ramal el cual deberá ajustarse al diámetro comercial más cercano.

De esta manera, si se considera que por cada orificio se tiene una pérdida de $\Delta\omega = 9$ m, dividiendo ΔH entre $\Delta\omega$ se obtiene el número de placas, como éste generalmente será fraccionario, se redondea al entero inmediato superior. Establecido el número de orificios (n), se calcula la pérdida de carga por orificio mediante

$$\Delta\omega = \frac{\Delta H}{n} \quad (2.9)$$

Finalmente, utilizando nuevamente la ecuación 2.7 se ajusta el diámetro del orificio en forma iterativa haciendo variar β y manteniendo fijos D y $\Delta\omega$.

Una herramienta que puede resultar útil para efectuar el cálculo anterior es el ábaco propuesto en la referencia [10] y que se muestra en la figura 2.7. Esta gráfica se generó a partir de la ecuación 2.7, despejando de ella la relación Q/D^2 , manteniendo constante el valor de $\alpha = 0.61$, y calculando para diferentes valores de β a partir de una

pérdida de carga dada. Con esta gráfica, si se conoce $\Delta\omega$, Q y D , se determina β con buena aproximación interpolando entre las curvas con lo cual se reduce el número de iteraciones apreciablemente.

Conocido el número de orificios y el arreglo del ramal se procede a calcular las separaciones requeridas, y con esto la longitud del ramal, con el auxilio de la tabla 2.2. Por ejemplo, para un caso con $\beta=0.50$ y seis orificios, si se considera que hacia aguas arriba existe un codo de 45° (se tomó como 90° de la tabla 2.2), se requieren 14 diámetros de separación. Hacia aguas abajo de la primera placa se consideran 6 diámetros para cualquier dispositivo. Las siguientes placas requerirán entonces 20 diámetros de separación con respecto a la inmediata aguas arriba. Esta separación entre placas resulta de sumar los 6+14 diámetros mencionados anteriormente. Debido a que son 6 placas, se tendrán cinco separaciones entre placas de 20 diámetros más 14 hacia aguas arriba y 6 hacia aguas abajo; en total 120 diámetros. Considerando un diámetro del ramal de $D = 0.6$ m, se tiene una longitud de 72 m. Un dispositivo de tal magnitud es evidentemente muy grande, poco práctico y que puede resultar antieconómico comparado con lo que costaría una válvula de control. Es por ello que se pretende en este trabajo encontrar un criterio de diseño más económico.

Por otra parte, para determinar el espesor de la placa (el espesor del borde del orificio no se considera porque no se requiere medir gasto), la práctica actual es seleccionar el extremo mayor de la recomendación dada por la ISO, es decir, se toma $0.05 D$, sin considerar las características del material de fabricación de la placa (usualmente acero) ni las condiciones de presión particulares de cada caso.

Finalmente se acostumbra revisar por cavitación la última placa por ser la más exigida. En la práctica actual, este

punto no esta claramente definido y el diseñador utiliza, generalmente, el criterio de velocidad máxima permisible en el orificio, por ejemplo 8 m/s. En la referencia [11] se recomienda utilizar el criterio del indice de cavitación incipiente σ_1 para lo cual se calcula el indice de cavitación con la ecuación

$$\sigma = \frac{p_{ab} - p_v}{\Delta\omega\gamma} \quad (2.10)$$

donde p_{ab} es la presión aguas abajo de la placa, p_v es la presión de vaporización a la temperatura de trabajo, $\Delta\omega$ es la pérdida de carga y γ es el peso específico del agua. El valor obtenido con la ecuación 2.10 se compara con el valor de σ_1 (determinado en forma experimental) cuidando que se cumpla $\sigma > \sigma_1$, para las condiciones de trabajo, pues con ello se evitará el inicio de la cavitación.

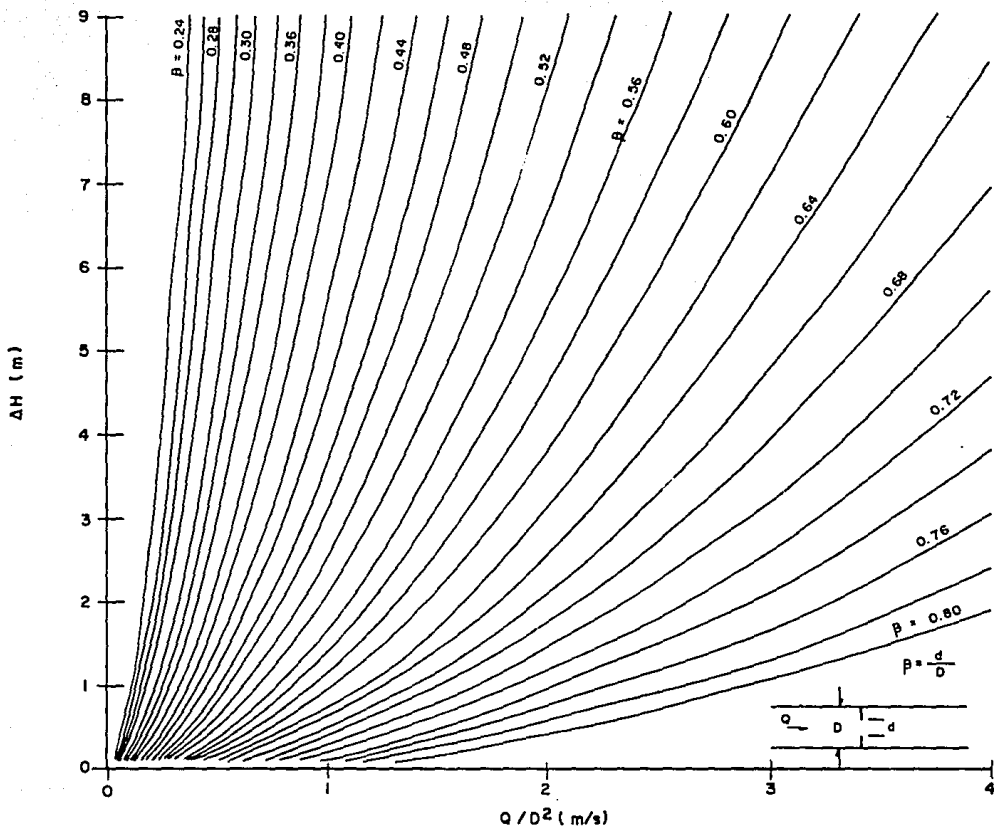


Figura 2.7 Curvas para la determinación de β en función de ΔH y Q/D^2 .

2.3 Deficiencias en el diseño actual de placas orificio instaladas en serie

Las principales deficiencias en la práctica actual de diseño de placas orificio instaladas en serie son las siguientes

a) No se tiene un criterio definido de diseño del espesor de la placa debido a que se desconoce la distribución de presión sobre sus caras expuestas al flujo y por lo tanto no se tiene forma de caracterizar las solicitaciones.

b) Para determinar la separación entre placas se utiliza la tabla 2.2 que fué elaborada para diseño de placas aforadoras y no contiene un criterio para placas en serie utilizadas para disipación de carga. Como resultado de aplicar esta tabla se obtiene que las longitudes de separación son muy grandes lo cual encarece los dispositivos. Se observa de lo anterior que se requiere establecer un criterio congruente y con apoyo en las condiciones particulares del problema.

c) No se tiene un criterio definido para establecer cuál es la velocidad máxima a la que pueden trabajar los orificios en forma segura y eficiente. Este es un punto importante, ya que la pérdida de carga es proporcional al cuadrado de la velocidad en el orificio y el hacerlos funcionar a su máxima velocidad permisible redundante en una disminución en el número de placas requeridas para una pérdida de carga dada y por lo tanto en la economía del dispositivo.

d) Por otro lado, la velocidad en el orificio (o bien la pérdida de carga) y las condiciones de presión existentes en el sitio donde se ubique el dispositivo, desempeñan un papel muy importante en la formación del fenómeno de cavitación. En este aspecto no se tiene un criterio establecido para

evaluar tanto el índice de cavitación apropiado a utilizar ni el nivel de la misma que sea permisible en el diseño, sin perjuicio de los dispositivos.

2.4 Antecedentes experimentales

Dentro de la literatura disponible acerca de placas orificio, se seleccionaron aquellos trabajos que tratan en alguna forma con los aspectos que se enlistan a continuación y que son de particular interés para el estudio que nos ocupa.

a) Comportamiento del coeficiente de descarga bajo diferentes condiciones de la geometría del borde y la distribución de velocidades en la proximidad del orificio.

b) Distribución de presión sobre las caras de la placa y su relación con el espesor de la misma.

c) Gradiente de presión a lo largo de la tubería, distribución de velocidad y patrón de flujo antes y después de una placa orificio como elementos fundamentales en la determinación de la separación mínima entre placas.

d) Cavitación y sus efectos en las instalaciones en relación a la placa orificio.

A continuación se describen los resultados más relevantes obtenidos en las investigaciones contenidas en los trabajos cuyas referencias se anotan y que tienen que ver con los aspectos mencionados.

a) En este inciso se comenzará por revisar algunos conceptos acerca del comportamiento del coeficiente de descarga ante diferentes condiciones de flujo.

Los resultados que se obtienen al hacer mediciones de gasto con placas orificio son satisfactorias y de aceptable precisión siempre que el flujo en la aproximación a la placa tenga un perfil de velocidades totalmente desarrollado.

Se llama perfil de velocidades totalmente desarrollado, al flujo que se obtiene después de que ha sido conducido a través de un tubo recto y libre de obstrucciones, lo suficientemente largo para que el perfil obtenido ya no cambie con la distancia. Generalmente se aceptaba, sin llegar a demostrarlo, que en longitudes rectas de 30 a 40 diámetros [12] se obtenía el establecimiento del perfil de velocidades totalmente desarrollado.

Sin embargo Klein [13], al efectuar su revisión del desarrollo del flujo turbulento en tuberías, nos muestra que las perturbaciones que se inducen al perfil de velocidades, por ejemplo, al pasar el flujo por válvulas, entradas, orificios, cambios de dirección, etc, tienen un efecto que se prolonga muchos diámetros aguas abajo y que el parámetro más apropiado para indicar el inicio y fin de la transición es el llamado factor de bloqueo (B), el cual puede definirse como

$$B = 1 - F_1 \quad (2.11)$$

En la expresión anterior F_1 es un parámetro adimensional definido por

$$F_1 = \frac{V}{V_{cen}} \quad (2.12)$$

donde V velocidad media del flujo, (m/s).
 V_{cen} velocidad en el centro de la tubería
(algunos autores toman la velocidad

máxima en la tubería en lugar de V_{cen} , (m/s).

Antes de que Bradley presentara los resultados de sus experimentos [14], se pensaba que después de una perturbación, B se incrementaba gradualmente hasta que el espesor de la capa límite alcanzaba el eje de la tubería y de acuerdo a mediciones esto parecía ocurrir después de 25 a 100 diámetros, dependiendo la longitud exacta del número de Reynolds. De allí en adelante, el flujo era considerado como totalmente desarrollado, es decir, que sus propiedades eran independientes de la condición de entrada y que permanecían constantes hacia aguas abajo.

En la realidad, el desarrollo del flujo en un tubo es mucho más complejo y Bradley parece haber sido el primero en descubrir que la convexidad del perfil de velocidades, representada por B, crece después de una perturbación hasta alcanzar un máximo en una distancia de aproximadamente 40 diámetros y posteriormente decrece hasta obtener un valor constante.

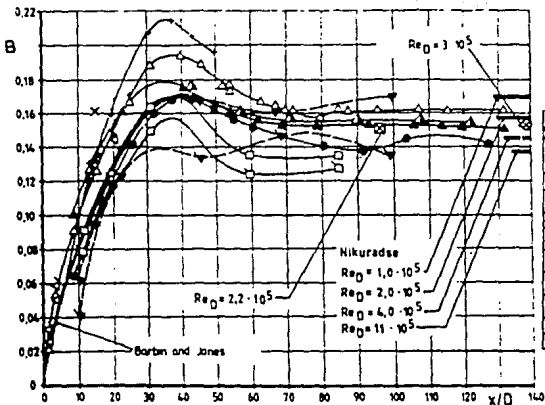
Los resultados experimentales de otros investigadores parecen confirmar los experimentos de Bradley, sin embargo, existen resultados que no muestran claramente la tendencia indicada.

En la figura 2.8 se muestra una gráfica del comportamiento del factor de bloqueo para diferentes fuentes de perturbación del perfil de velocidades y diferentes números de Reynolds contra la longitud hacia aguas abajo en forma adimensional. Esta gráfica contiene los casos en que el factor de bloqueo tiene un máximo bien definido. En la figura 2.9 se muestran los casos en que el factor de bloqueo no tiene un máximo claramente definido, mientras que en la figura 2.10 se puede observar el comportamiento de B en los

primeros 26 diámetros.

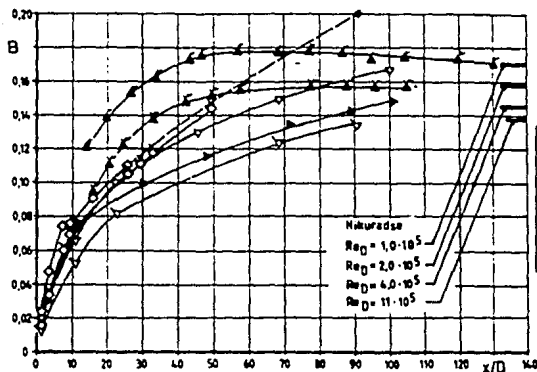
Klein concluye en su artículo que el desarrollo, tanto del perfil de velocidades, como de la turbulencia dependen en gran manera de la historia del flujo hacia aguas arriba y que la distancia requerida para obtener un perfil de velocidades totalmente desarrollado excede los 140 diámetros del tubo.

Lo anterior es muy importante debido a que el coeficiente de descarga es sensible a cambios en el perfil de velocidades [15], esto es, que cuando en la aproximación al orificio no se tiene un perfil de velocidades totalmente desarrollado, el coeficiente de descarga C_d sufre una desviación de su valor obtenido en condiciones "aceptablemente normales". Es conveniente observar que la pérdida de carga $\Delta\omega$ guarda una relación inversamente proporcional al coeficiente de descarga, como puede constatarse en los resultados obtenidos en la referencia [16].



SIM-BOL	Re _D 10 ⁻⁵	RELACION DE CONTRACCION	OBTENIDO MEDIANTE	FUENTE DE DISTURBIO
Δ	4.3	6:1	V _{max} /V ₁	DESARROLLO NATURAL COLADERA DE ALUMBE A LA ENTRADA DESARROLLO NATURAL
△	4.0	6:1		
+	1.8	?	V _{max} /V ₁	TOBERA DE 1/4 DE CIRCULO A LA ENTRADA
□	5.5 13.0	12:1		
○	?	?	V _{max} /V ₁	ENTRADA DE BORDE AGUDO O ESCUINADO
▽	1.4 5.8	7:1		
—	3.9	4:1	V _{max} /V ₁	DERIVACION A TRAVES DE UNA RUGOSIDAD FORMADO POR GRANOS DE ARENA
x	6.0	6:1		
⊗	2.5	18:1	S	DEPOSITO TURBULENTO PERTURBADOR
⊙	3.0	?	T	
⊠	2.2	?	V _{max} /V	
⊙	2.7	4:1	V _{max} /V	

Figura 2.8 Comportamiento del factor de bloqueo B. Pruebas en las que B tiene un máximo definido. (ref. 13)



SIM-BOL	Re _D 10 ⁻⁵	RELACION DE CONTRACCION	OBTENIDO MEDIANTE	FUENTE DE DISTURBIO
⊠	1.0	18:1	S/D	OBSTRUCCION ANULAR A LA ENTRADA R/D = 0.082
⊠	4.0	?		
▽	1.4	?	V _{max} /V ₁	ENTRADA DE CAMPANA DISPOSITIVO
○	5.5	?		
▷	4.0	20:1	V _{max} /V ₁	DIFUSOR DE 5° ABAS ARRIBA DE LA CONTRACCION
⊙	2.2	?		
⊙	2.6	28:1	V _{max} /V	RUGOSIDAD DE ANCHA R ₂ /D = 4 x 10 ⁻³
⊙	25.0	?		

Figura 2.9 Comportamiento del factor de bloqueo B. Pruebas en las que B no tiene un máximo definido. (ref. 13)

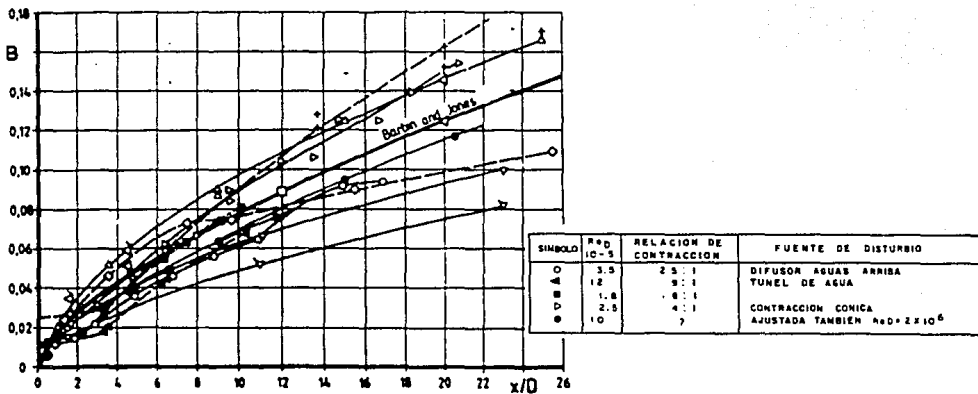


Figura 2.10 Comportamiento del factor de bloqueo B en los primeros 26 diámetros. (ref. 13)

Ghazi [17], en un intento por determinar un índice de presión para predecir el efecto del perfil de velocidades sobre el coeficiente de descarga, obtuvo los resultados que se muestran en las figuras 2.11 y 2.12, para placas con tomas de presión en esquina y en las bridas. En ellas se puede observar que al aumentar β , el orificio se vuelve más sensible a los disturbios del flujo.

La geometría del borde del orificio también tiene un efecto sobre el comportamiento del coeficiente de descarga. Por ejemplo, cuando se redondea el borde afilado de un orificio se verifica un incremento en C_d y es mayor conforme aumenta el radio de curvatura [18]. Los resultados obtenidos en la referencia [19] indican que el efecto no es importante pues muestra desviaciones de C_d menores al 2%. No obstante, cabe observar que la geometría del borde de la placa usada para los dispositivos de disipación de carga es afilado y sin el bisel recomendado por la ISO, por lo que el espesor del borde es el mismo de la placa. Esto representa evidentemente una diferencia en la pérdida de carga con respecto a las placas aforadoras que aún cuando, según los resultados experimentales que se han obtenido, no es importante, no ha sido estudiada más a fondo.

b) En cuanto a la distribución de presión sobre las caras de la placa expuestas al flujo, en 1987 Teyssandier y Husain [20], efectuaron mediciones para tres placas con β de 0.697, 0.498 y 0.299 y espesor de $1/4$ ". Utilizaron para instalar la placa un tubo de acrílico de 3.5" de diámetro, tomas de presión en esquina y aire como fluido de trabajo.

Los resultados obtenidos por estos investigadores se muestran en las figuras 2.13a y 2.13b. En ellas se graficó en forma adimensional tanto la presión sobre la cara aguas arriba como la de aguas abajo contra la distancia radial sobre la placa, también en forma adimensional. En las

figuras Δp_{car} es la diferencia entre la presión medida en un punto sobre la cara aguas arriba de la placa menos la presión medida en la toma aguas arriba, Δp es la diferencia de presión entre las tomas, Δp_{cab} es la diferencia de presión entre un punto medido sobre la cara aguas abajo de la placa y la toma aguas abajo, y es la coordenada radial dirigida de la pared interior del tubo hacia el borde de la placa y h es la diferencia de radios del tubo y del orificio.

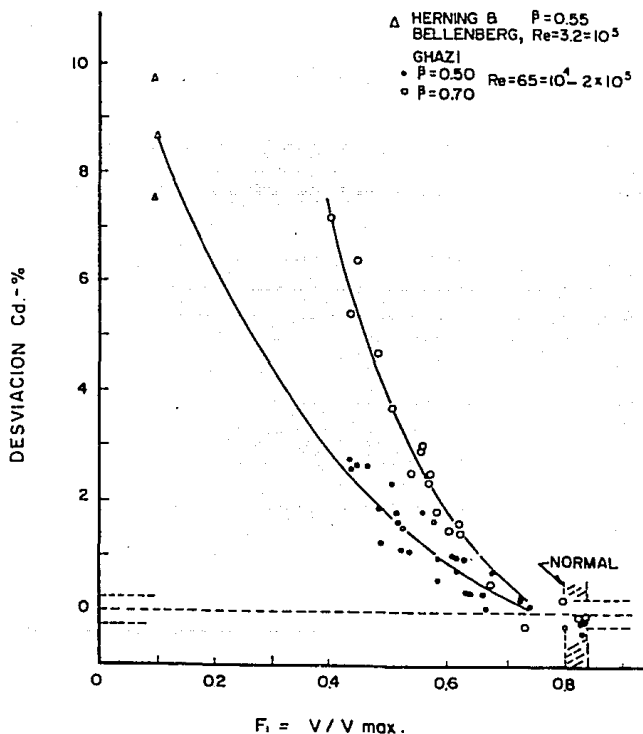


Figura 2.11 Efecto del perfil de velocidad sobre el coeficiente de descarga C_d , para orificios con tomas de presión en esquina. (ref. 17)

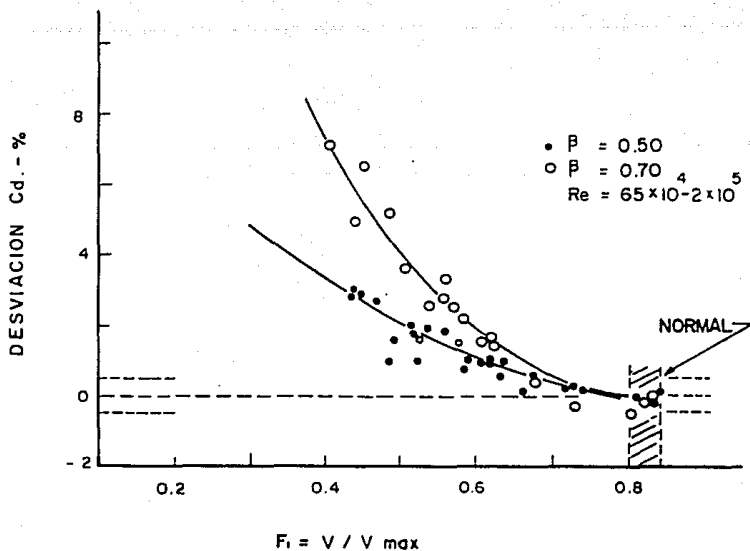
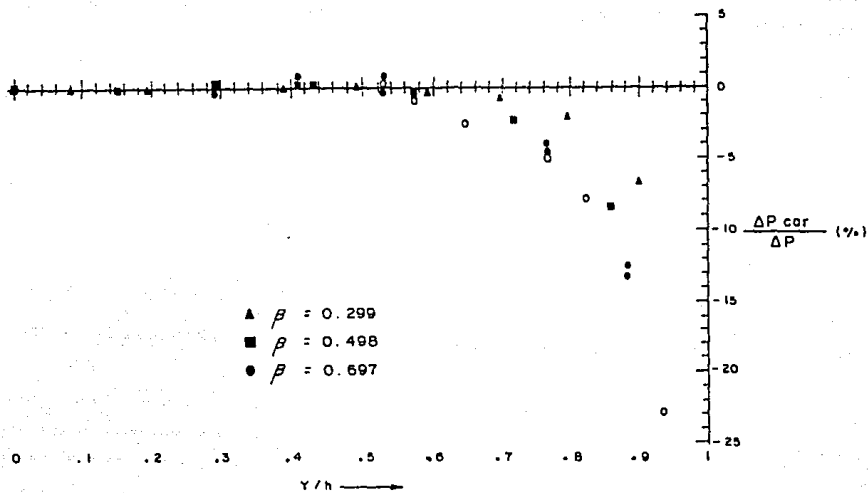


Figura 2.12 Efecto del perfil de velocidad sobre el coeficiente de descarga C_d , para orificios con tomas de presión en las bridas. (ref. 17)

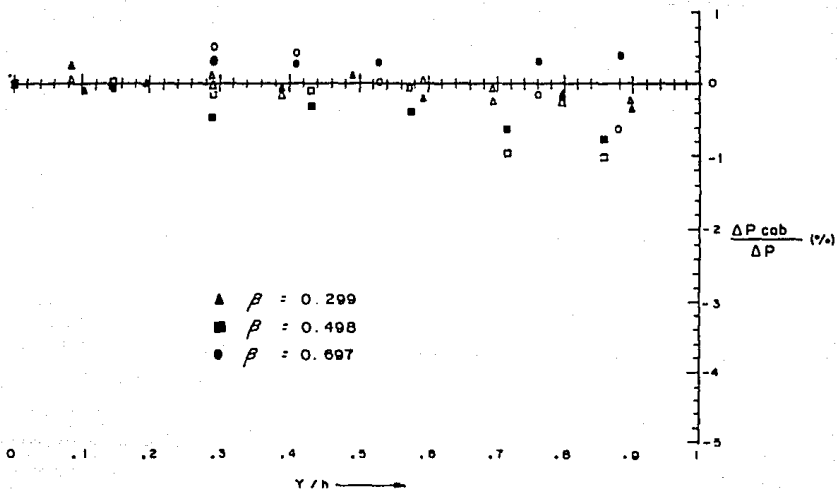
La figura 2.13a corresponde a la distribución de presión sobre la cara aguas arriba. En ella se puede observar que la presión disminuye continuamente a lo largo de la placa hasta el borde del orificio en donde inclusive se registran presiones inferiores a las de la toma en la esquina aguas abajo, notándose una disminución significativa a partir de alrededor del 50% de h .

En la figura 2.13b, se muestra el comportamiento de la distribución de presión a lo largo de la cara aguas abajo y en ella se puede observar un comportamiento similar al de la cara anterior pero menos marcado, con desviaciones menores del 1 %.



Y Posición del punto de medición sobre la placa.
 ΔP_{car} Diferencia de presión entre un punto en la cara aguas arriba y lo toma aguas arriba.
 ΔP Diferencia de presión entre las tomas.
 El símbolo lleno \bullet corresponde a un gasto menor que el vacío o

Figura 2.13 a Distribución de presión sobre la cara aguas arriba de una placa orificio. (ref. 20)



Y Posición del punto de medición sobre la placa.
 ΔP_{cab} Diferencia de presión entre un punto en la cara aguas abajo y la toma aguas abajo.
 ΔP Diferencia de presión entre las tomas.
 El símbolo lleno \bullet corresponde a un gasto menor que el vacío \circ .

Figura 2.13 b Distribución de presión sobre la cara aguas abajo de una placa orificio. (ref. 20)

c) Para la determinación de la separación mínima entre placas, fue de interés conocer los trabajos referentes a la distribución o gradiente de presión y el patrón de flujo a lo largo de un tubo antes y después de una perturbación, como puede ser una placa orificio, una válvula o cualquier otra fuente de disturbio.

En este aspecto es muy importante el trabajo realizado por Klein en su revisión del desarrollo del flujo turbulento en tuberías, del cual se habló anteriormente y del que se obtendrán conclusiones importantes en el capítulo 5.

Otros autores de los cuales también ya se habló son Teyssandier y Husain [20] quienes además de estudiar la distribución de presión sobre las caras de la placa, también midieron el gradiente de presión sobre la pared a lo largo de la tubería antes y después de una placa orificio. En su instalación utilizaron 17 tomas de presión hacia aguas arriba colocadas a partir de la placa a cada $1/2''$ y 32 tomas hacia aguas abajo colocando 16 tomas a cada $1/2''$ y las restantes a cada $1''$.

En su artículo se presentan resultados de las pruebas efectuadas con aire en un intervalo de números de Reynolds, desde 2.1×10^4 hasta 1.6×10^5 . La figura 2.14 muestra el gradiente de presión hacia aguas arriba de la placa a lo largo de la pared del tubo utilizando unidades adimensionales; en las abscisas al dividir la distancia x entre el diámetro D haciendo coincidir el origen con la cara aguas arriba de la placa y en las ordenadas expresando las unidades en $\%$ mediante la diferencia de presión (Δp_{par}) entre un punto medido sobre la pared del tubo y la presión medida en la toma en la esquina aguas arriba dividida por la diferencia de presión entre las tomas en esquina (Δp). En ella se observa que la perturbación del flujo producida por la placa está representada por un ligero incremento en la

presión que se extiende hasta 0.62 D. A este tramo se le ha llamado aquí, zona de aceleración del flujo.

En la figura 2.15 se presenta el gradiente de presión hacia aguas abajo y el aspecto más importante que puede observarse es que la recuperación de la presión se logra hasta alrededor de 4.5 a 5 D. En esta figura las unidades son en forma similar a las de la figura anterior siendo Δp_{xab} la diferencia de presión entre un punto a lo largo de la pared de la tubería y la toma en la esquina aguas abajo.

Otro trabajo considerado es el de Langren y Sparrow [21], en el cual también se trabajó con aire como fluido y se mide la distribución de presión en la zona de separación del flujo aguas abajo de una placa orificio. Los autores utilizaron tres orificios con β de 0.67, 0.50 y 0.40 . Los resultados que obtuvieron se muestran en la figura 2.16 y en ella se observa que el punto donde se completa la expansión del chorro se ubica aproximadamente a 5 diámetros lo cual fue confirmado posteriormente por Teyssandier y Husain. En esta figura p es la presión estática local, p_o es la presión de estancamiento y p_{min} es la presión mínima medida en la región de máxima contracción del chorro.

d) Con respecto a la cavitación y sus efectos en las instalaciones, los trabajos más importantes en relación a la placa orificio son los que se realizaron auspiciados por la Universidad del Estado de Colorado ver, por ejemplo las referencias [22], [23], [24] y [25]. Esta serie de trabajos acerca de la cavitación en válvulas y orificios se inició allá por 1957 y han participado en ellos los investigadores Ball, Tullis y Govindarajan entre los más destacados.

Entre los resultados más importantes que se obtuvieron están la selección y definición de diferentes niveles de cavitación y la forma de evaluarlos.

Los niveles de cavitación determinados por ese grupo de investigadores y que son de interés para este estudio son

- Cavitación incipiente (σ_i). Este nivel representa el inicio de la cavitación. Se sugiere usarlo para diseño en casos en que se desea eliminar por completo el ruido, el daño y la vibración. Este nivel ha sido usado en muchos casos y en varios de ellos ha resultado en un sobrediseño.

- Cavitación crítica (σ_c). Para este nivel las vibraciones son despreciables y el ruido generado durante el servicio continuo no es molesto. Tampoco se registra daño por picado en periodos de servicio razonablemente largos.

- Cavitación con daño incipiente (σ_{di}). Este nivel representa el inicio de daño por picado. En el se produce ruido muy molesto con alguna vibración aunque el daño generado es muy pequeño.

En esta serie de trabajos se definen otros niveles de cavitación que no son interesantes para los fines de este trabajo.

Para determinar el nivel de cavitación de diseño de un dispositivo, los autores recomiendan usar el parámetro σ , denominado índice de cavitación que se calcula con cualquiera de las ecuaciones siguientes

$$\sigma = \frac{p_{ab} - p_v}{p_D - p_{ab}} \quad (2.13)$$

o bien

$$\sigma = \frac{p_{ab} - p_v}{\rho V^2} \quad (2.14)$$

donde p_D y p_{ab} son la presión medida en las tomas a D y 10 D hacia aguas arriba y aguas abajo de la placa respectivamente, V es la velocidad media dentro del tubo, p_v es la presión de vaporización determinada para las condiciones de trabajo y ρ es la densidad del líquido.

El requisito más importante para determinar p_{ab} es que sea medida después de la zona de recuperación de presión que se extiende hasta aproximadamente 5 D aguas abajo de la placa. En la serie de trabajos de la Universidad del Estado de Colorado se utiliza para valuar el coeficiente de descarga la expresión

$$C_d = \frac{V}{\sqrt{\frac{2(p_D - p_{ab})}{\rho} + V^2}} \quad (2.15)$$

Los autores observan que, para los índices de cavitación definidos, no existe efecto de escala en cuanto a la presión o velocidad pero si en cuanto al diámetro del tubo y a la relación β . Para corregir dicho efecto en los índices de cavitación incipiente y crítica proponen usar las ecuaciones siguientes

$$V_c = V_{cr} \left(\frac{p_D - p_v}{p_{Dr} - p_{vr}} \right)^{0.5} * F_{aux} \quad (2.16)$$

para $\frac{D}{D_r} > 1$

o bien

$$V_c = \frac{V_{cr} \left(\frac{p_D - p_v}{p_{Dr} - p_{vr}} \right)^{0.5}}{F_{aux}} \quad (2.17)$$

para $\frac{D}{D_r} < 1$

donde

$$F_{aux} = 0.94 \left(1 - \frac{\log D/D_r}{10^{(0.4 - 0.52 \log C_d)}} \right) \quad (2.18)$$

En las expresiones anteriores el subíndice r se refiere a datos de referencia obtenidos en laboratorio y V_c es la velocidad media en el tubo para la condición de cavitación crítica y son válidas para $C_d < 0.7$. Cuando se tenga $C_d > 0.7$, se recomienda efectuar la corrección usando $C_d = 0.7$. En el caso del nivel de cavitación de daño incipiente las ecuaciones de corrección recomendadas son

$$V_{d1} = V_{dir} \left(\frac{p_D - p_v}{p_{Dr} - p_{vr}} \right)^{0.45} \left(\frac{\beta}{\beta_r} \right)^{2.18} \quad (2.19)$$

para $2 < \frac{1}{\beta^2} < 6$

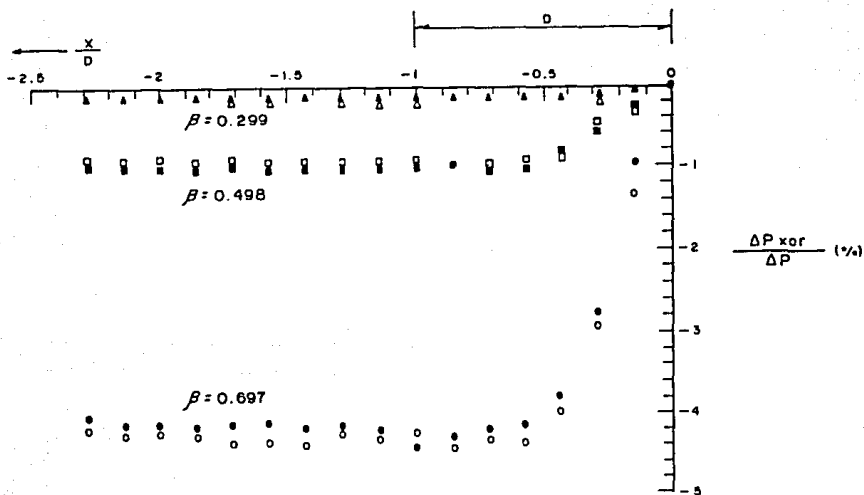
o bien

$$\sigma_{d1} = \sigma_{dir} \left(\frac{p_D - p_v}{p_{Dr} - p_{vr}} \right)^{0.24} \left(\frac{\beta}{\beta_r} \right)^{2.58} \quad (2.20)$$

para $2 < \frac{1}{\beta^2} < 6$

donde V_{d1} es la velocidad media en el tubo para la condición de cavitación con daño incipiente. En la tabla 2.3 se

proporcionan valores de referencia para V_{dir} y σ_{dir} obtenidos por los investigadores de la Universidad del Estado de Colorado, mientras que en las figuras 2.17, y 2.18 se muestran resultados para los índices de cavitación crítica e incipiente.



- X Posición del punto de medición a lo largo de la tubería.
 ΔP_{xor} Diferencia de presión entre un punto a lo largo de la tubería y la toma aguas arriba.
 ΔP Diferencia de presión entre las tomas.
 El símbolo lleno ● corresponde a un gasto menor que el vacío o .

Figura 2.14 Gradiente de presión aguas arriba de una placa orificio. (ref. 20)

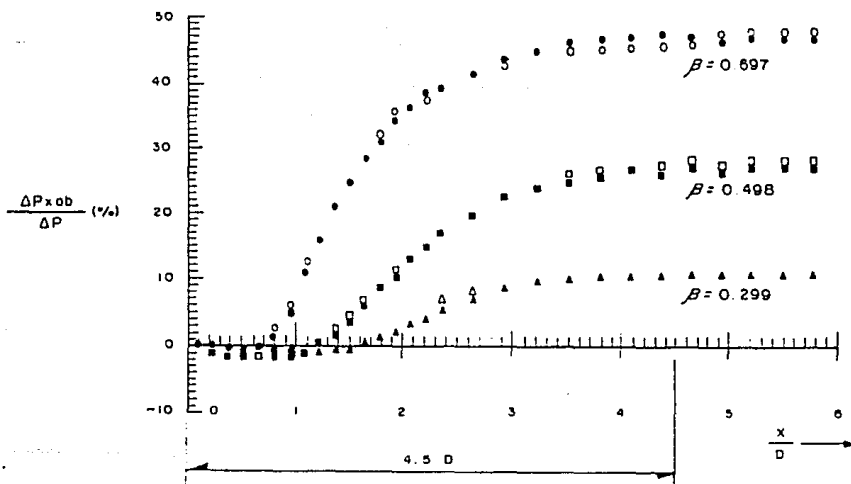
TABLA 2.3

NIVELES DE CAVITACION PARA ORIFICIOS EN TUBERIAS
(VALORES DE REFERENCIA)

β_r	$1/\beta_{r1}$	C_{dr}	CAVITACION INCIPIENTE		CAVITACION CRITICA		CAVITACION CON DAÑO INCIPIENTE	
			V_{ir} (m/s)	σ_{ir}	V_{cr} (m/s)	σ_{cr}	V_{idr} (m/s)	σ_{idr}
0.380	6.93	0.100	2.59	1.12	2.69	0.96	3.14	0.446
0.444	5.07	0.133	3.29	1.35	3.53	1.04	3.90	0.670
0.500	4.00	0.179	4.22	1.62	4.60	1.20	5.06	0.825
0.667	2.25	0.385	7.48	3.38	8.81	2.16	9.48	1.730
0.800	1.56	0.648	11.58	6.62	14.46	3.89	15.61	3.190

DATOS PARA: $D=0.076$ m , $\rho_D=6.33$ Kg/cm² , $\rho_V=0.86$ Kg/cm²

REFERENCIA [25]



- X Posición del punto de medición a lo largo de la tubería.
- ΔP_{xob} Diferencia de presión entre un punto a lo largo de la tubería y la toma aguas abajo.
- ΔP Diferencia de presión entre los tanos.
- El símbolo lleno \bullet corresponde a un gasto menor que el vacío o .

Figura 2.15 Gradiente de presión aguas abajo de una placa orificio. (ref. 20)

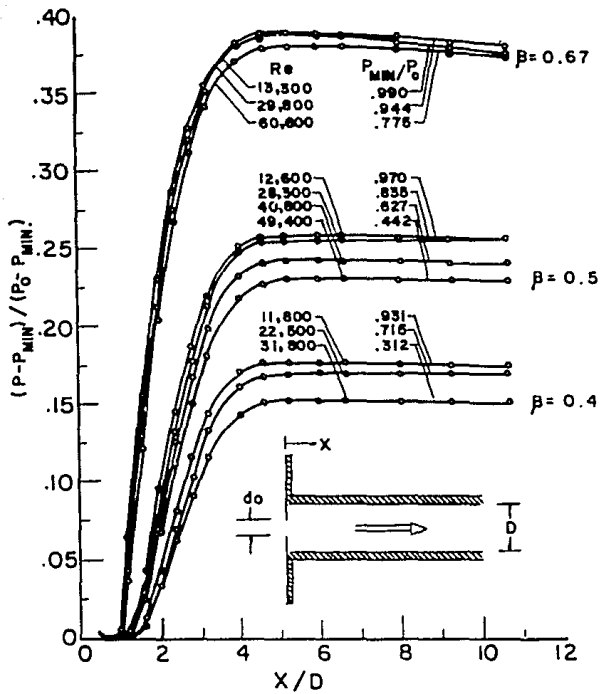


Figura 2.16 Recuperación de la presión después de una placa orificio. (ref. 21)

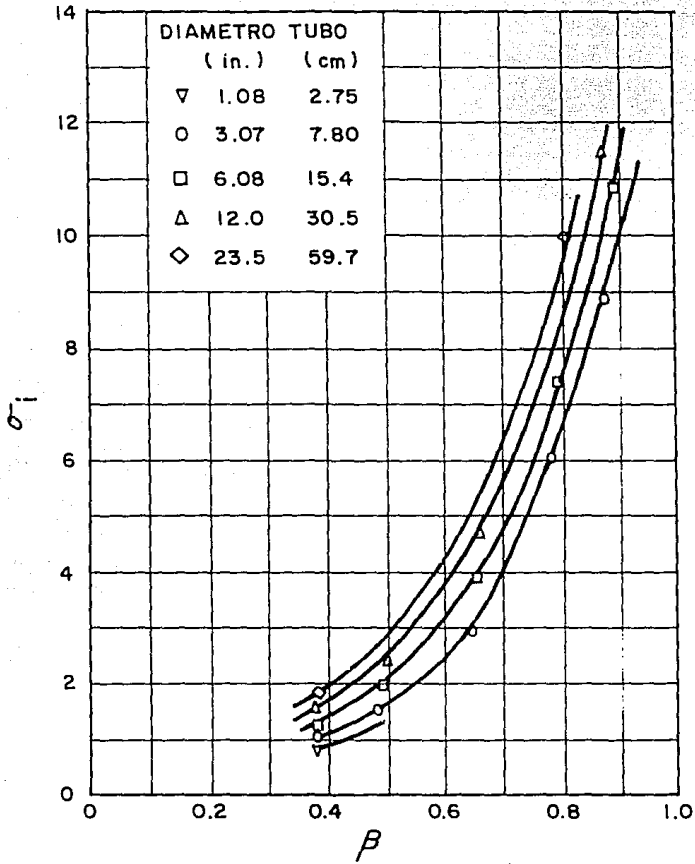


Figura 2. 17 Gráfica para determinar el índice de cavitación incipiente σ_1 . (ref. 25)

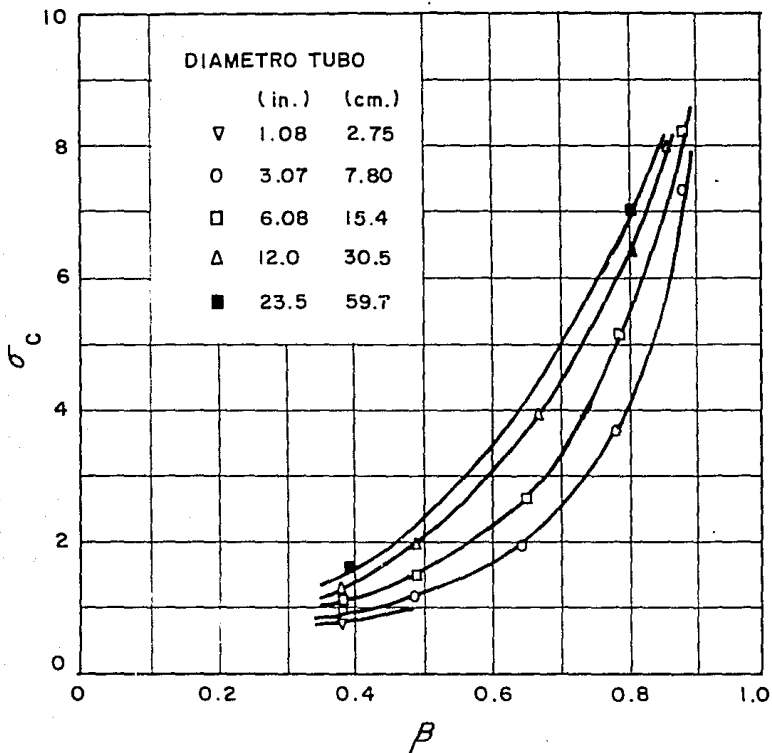


Figura 2. 18 Gráfica para determinar el índice de cavitación crítica σ_c . (ref. 25)

3. INSTALACION EXPERIMENTAL Y PRUEBAS EFECTUADAS

Para tratar de dar solución a las incógnitas planteadas en el capítulo anterior, en el Laboratorio de Hidromecánica del Instituto de Ingeniería de la UNAM se construyó una instalación para efectuar pruebas experimentales que ayudaran a definir el diseño de placas orificio instaladas en serie.

Las pruebas que se programaron fueron las siguientes

- a) Medir la distribución de presión en las dos caras de la placa expuestas al flujo y su comportamiento al variar la separación entre placas así como la relación β .
- b) Medir el comportamiento de la pérdida de carga al variar la separación entre placas.
- c) Observar el patrón de flujo y su comportamiento al variar la separación entre placas y la relación β .
- d) Comparar lo observado en el modelo con lo reportado por otros investigadores.

3.1 Instalación experimental

La instalación consiste principalmente de un circuito formado con tubería de P.V.C. de 0.15 m (6") de diámetro. Este circuito se inicia en un tanque superficial que sirve

de cárcamo de bombeo desde donde succiona una bomba (1)¹ horizontal de 50 HP de potencia. La bomba descarga a una tubería (2) de 0.10 m (4") de diámetro que se une con el circuito mediante una ampliación gradual de 0.10 m a 0.15 m. En este sitio se tiene instalada una válvula de mariposa (3) de 0.15 m de diámetro que permite controlar el gasto que fluye en el circuito. A continuación se tiene un tramo de tubería de P.V.C. (5) de 0.15 m de diámetro y 2.70 m de longitud que se une a un tramo de tubería de lucita (7) con un diámetro interior de 0.13 m (5" 1/4) y una longitud total de 6.20 m. En este tramo fueron instaladas las placas orificio (6) y está formado por seis carretes: un carrete de 2.00 m de longitud, tres de 1.40 m y dos más de 0.70 m. Estos carretes permitieron variar la separación entre placas. En seguida de la tubería de lucita continua el circuito con tubería de P.V.C. (8) en una longitud total de 28.00 m hasta llegar al sitio donde se tiene una válvula de compuerta (9) con la cual se controla la descarga de agua al tanque superficial que es el inicio de la instalación. El tanque está dividido en dos cámaras; la que sirve de cárcamo y la de descarga, separadas por un muro en donde se aloja un vertedor triangular (10). En la cámara de descarga se tiene instalado un limnómetro (11) mediante el cual se mide la carga sobre el vertedor y con ello se puede calcular el gasto que fluye por el circuito. En la figura 3.1 se muestra un croquis de la instalación.

Para efectuar las pruebas experimentales se utilizaron dos juegos de placas orificio, uno con $\beta = 0.57$ y otro con $\beta = 0.35$. Un grupo de pruebas se efectuaron instalando tres placas con $\beta = 0.57$ en un arreglo en el cual se respetaron las recomendaciones de la NORMA ISO, [6]. La separación entre placas recomendada para $\beta = 0.57$ es de 14 diámetros (2.10 m, tomando el diámetro del circuito cuyo valor es $D = 0.15$ m).

1 Los números entre parentesis se refieren al orden indicado en el esquema de la figura 2.3.

A esta separación se le llamó separación L y se formó uniendo dos carretes, uno de 1.40 m y el otro de 0.70 m, lo que permitió hacer pruebas con separaciones menores a la recomendada, a 1.40 m y 0.70 m de separación a las que se les llamó separaciones $2L/3$ y $L/3$, respectivamente. Otro grupo de pruebas se realizaron utilizando dos placas con $\beta = 0.35$ que fueron colocadas a las separaciones indicadas anteriormente. Además, se efectuó un grupo de pruebas utilizando combinaciones de placas con β diferente.

Para medir la pérdida de carga global (ΔH), introducida por las placas colocadas en serie se instalaron dos manómetros, tipo Bourdon, uno a una distancia de un diámetro (0.13 m) aguas arriba de la primera placa y el otro a un poco más de 10 diámetros (1.40 m) de la última. También se midieron las diferencias de carga en cada placa mediante manómetros diferenciales de mercurio instalados según la NORMA ISO; colocando las tomas de presión un diámetro hacia aguas arriba y medio diámetro hacia aguas abajo del plano de la placa. En la figura 3.2 se puede observar el arreglo.

Con el objeto de medir la distribución de presión sobre las caras de la placa expuestas al flujo, se utilizó una placa, denominada placa instrumentada, la cual en una de sus caras tenía perforados cuatro conductos a diferentes radios (figura 3.3), llevados hasta el exterior y conectados a manómetros diferenciales para medir la carga de presión.

En todas las pruebas se midieron las diferencias de carga de presión con un manómetro diferencial de mercurio conectado por un extremo a la toma de presión instalada a un diámetro aguas arriba (presión de referencia p_{ref}) de la placa y por el otro al punto de observación correspondiente.

Finalmente, el gasto fue determinado mediante un vertedor triangular, cuya carga se midió con un limnómetro colocado en una de las paredes del tanque de descarga.

3.2 Descripción de las pruebas efectuadas

A continuación se hará una breve descripción de una de las pruebas efectuadas.

En la instalación descrita anteriormente se instalaron tres placas orificio con $\beta = 0.57$ en serie, separadas 2.10 m de longitud (separación L). La placa instrumentada se colocó en la primera posición (de aguas arriba hacia aguas abajo) y se le llamó placa No. 1, a la siguiente placa se le llamó placa No. 2 y a la última, placa No. 3.

Para iniciar una prueba se procedió al llenado del circuito abriendo la válvula de compuerta colocada en la descarga. Una vez lleno el circuito, con la válvula de mariposa cerrada, se puso en marcha la bomba levantando una presión en la tubería de descarga de alrededor de 55 m.c.a. (5.5 Kg/cm^2) para la condición de gasto nulo. En seguida se efectuó una apertura lenta de la válvula de mariposa hasta que en el manómetro tipo Bourdon, colocado inmediatamente antes de las placas p_{ref} , registró una presión de 0.8 Kg/cm^2 . En ese momento se detuvo la apertura de la válvula y se realizó el purgado de aire de todos los manómetros diferenciales instalados y de las tomas de presión de la placa instrumentada. Una vez hecho lo anterior se procedió a efectuar las lecturas de los manómetros con lo que se obtuvo la pérdida de carga introducida por las tres placas, y de los tres manómetros diferenciales que permitieron conocer la pérdida de carga introducida por cada placa. También se tomaron lecturas de la distribución de presión sobre la cara aguas arriba de la placa instrumentada y del manómetro diferencial que mide la diferencia de carga en el borde del orificio. A continuación se leyó la carga sobre el vertedor y se calculó el gasto y finalmente se hicieron observaciones y anotaciones del comportamiento del flujo a través de las placas. Se observaron entre otros aspectos la existencia de ruido, vibración, burbujas, influencia de una placa en el comportamiento de la siguiente y se inyectó aire para

visualización del patrón de flujo. Este proceso se efectuó para tres gastos diferentes y al terminar se hizo girar la placa y se repitió el proceso cuidando tener aproximadamente los mismos gastos que para la cara anterior. El procedimiento descrito fue realizado también colocando la placa instrumentada en las posiciones No. 2 y No. 3, y con esto se completó el grupo de pruebas para $\beta=0.57$ con la separación de 2.10 m entre placas.

El grupo de pruebas descrito para $\beta=0.57$ y 2.10 m de separación fué repetido para separaciones de 1.40 m y 0.70 m y al finalizar se cambiaron las placas por las de $\beta=0.35$ repitiendo todas las pruebas, pero colocando únicamente dos placas debido a que la resistencia de las bridas de la tubería de lucita no permitieron operar la instalación a una presión mayor a 2.2 Kg/cm^2 . Con lo anterior se dió por concluida la etapa básica de laboratorio.

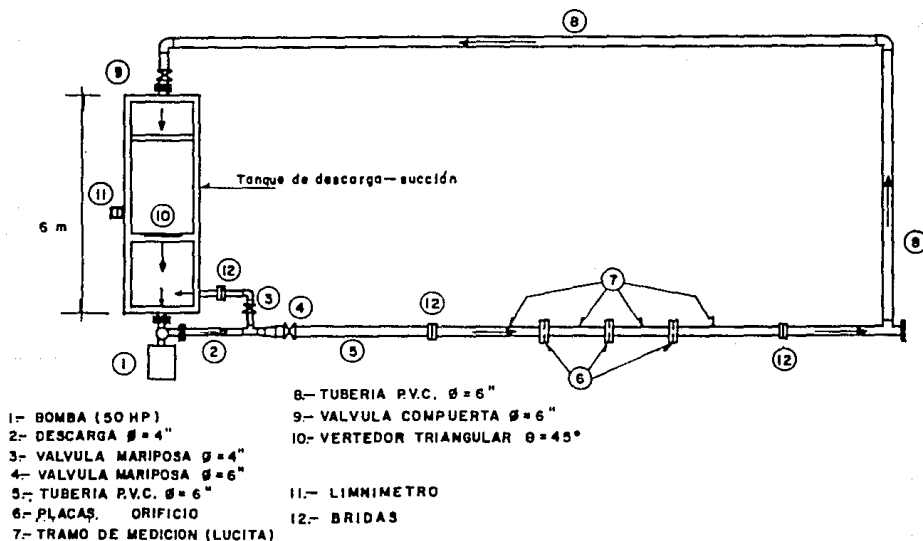


Figura 3.1 Instalación experimental.

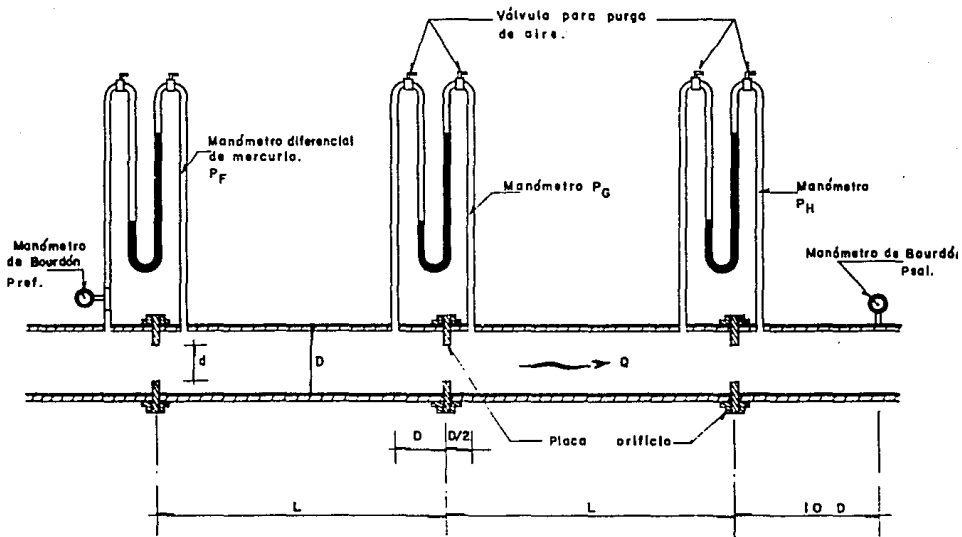


Figura 3.2 Arreglo de manómetros para medición de pérdida de carga.

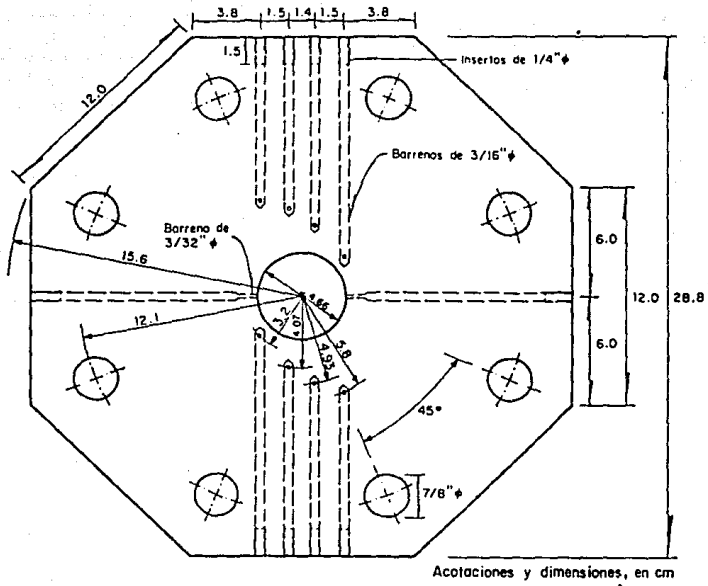


Figura 3.3 Placa instrumentada para la medición de distribución de presión para $\beta = 0.35$.

4. ANALISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

A continuación se hará una exposición de los resultados que se obtuvieron de las pruebas efectuadas en el modelo experimental cuyos principales objetivos fueron: la determinación de la distribución de presión sobre las caras de la placa expuestas al flujo utilizando agua como fluido de trabajo, el comportamiento de la pérdida de carga producida por placas instaladas en serie, en forma individual y en conjunto, y la observación del patrón de flujo en instalaciones de esta naturaleza.

4.1 Distribución de presión sobre la placa orificio

Como ya se mencionó, la determinación de la distribución de presión dinámica sobre la placa se obtuvo con apoyo en las mediciones efectuadas sobre las dos caras de la placa instrumentada, denominadas aquí cara aguas arriba y cara aguas abajo.

a) Cara aguas arriba

En la figura 4.1, tomada de la referencia [26], se muestra el comportamiento típico de la distribución de presión sobre

la cara aguas arriba de una placa orificio. En dicha figura se tiene sobre las abscisas la posición de los puntos de medición, medida en forma radial a partir de la pared interior del tubo hacia el borde del orificio y expresada en forma adimensional mediante la división de la ordenada (y) por la semialtura (h). En las ordenadas se tiene la presión diferencial entre el punto sobre la cara de la placa (p_1) y la presión medida en la toma situada en D expresada en $\%$ con respecto a la diferencia de presión entre las tomas en D y $D/2$. En esta figura se puede observar un descenso continuo en la presión desde la pared del tubo hacia el borde del orificio, haciéndose más brusco a partir de $h/2$. Lo anterior se debe a la aceleración que experimenta el flujo conforme se aproxima al orificio [26]. Se puede observar también que en la región entre $h/2$ y la pared del tubo se verifica un ligero incremento de la presión con respecto a la medida en D . Sin embargo, cabe aclarar que la magnitud de estas desviaciones de la presión es pequeña, del orden del 2 % de la presión diferencial medida sobre la placa.

En la figura 4.2 se ha dibujado en las mismas unidades que la anterior, la distribución de presión sobre la cara aguas arriba de la placa No. 2 con $\beta=0.57$ y tres diferentes separaciones (las separaciones L y fracciones de L que se usaron fueron definidas en el capítulo anterior), con el fin de hacer notar que la presión sobre la cara aguas arriba de las placas posteriores a la primera, sufre un incremento en la presión al disminuir la separación entre placas, al grado que para separaciones de $L/6$ se presentan fuertes vibraciones en el sentido longitudinal del tubo debidas al impacto del chorro de la placa anterior sobre la cara de la posterior. Este comportamiento se puede constatar también en las figuras 4.3 y 4.4.

Por otra parte, se puede afirmar que la presión medida sobre la cara aguas arriba es prácticamente igual a la que se mide en la toma ubicada en D , si se desprecia el ligero incremento que se presenta hacia la zona de estancamiento y

la caída de presión hacia el borde, ya que dichas desviaciones son pequeñas (menores al 2% de la presión en D). Lo anterior se puede verificar en la figura 4.5 en la cual se compara la presión medida en los cuatro puntos sobre la placa (no se considera la presión medida en el borde) contra la medida en D, expresadas, tal como fueron leídas en los manómetros diferenciales, en mm Hg. Como puede apreciarse en esta figura, las diferencias oscilan dentro de la región $\pm 2\%$.

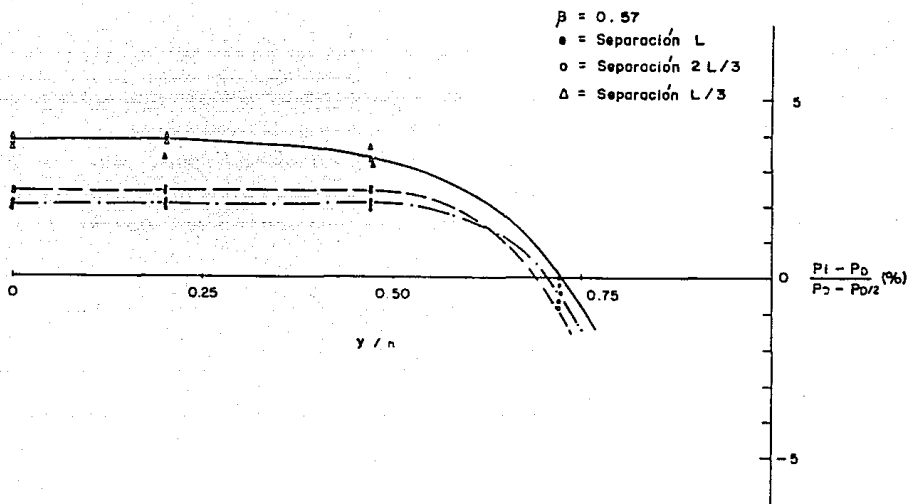


Figura 4.1 Distribución de presión sobre la cara aguas arriba de la placa No. 1.

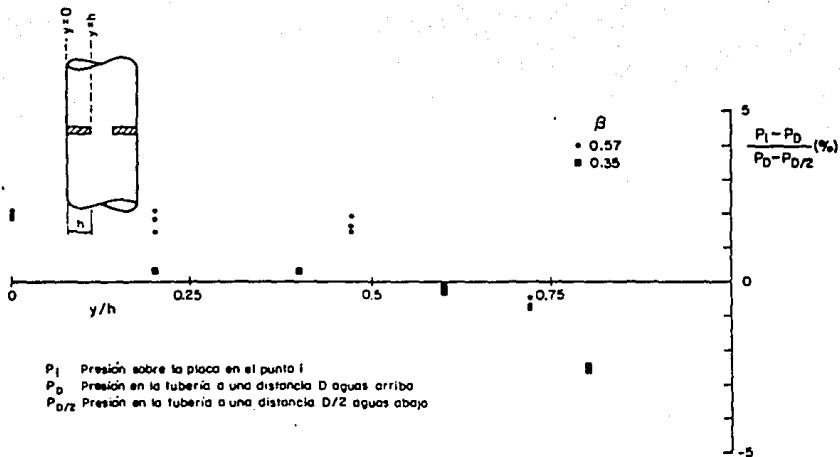


Figura 4.2 Distribución de presión sobre la cara aguas arriba de la placa No. 2.

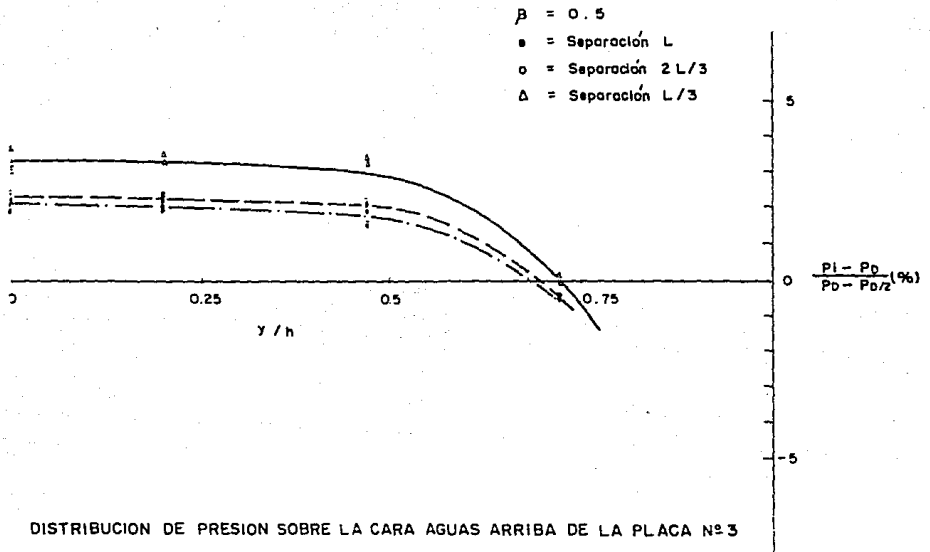


Figura 4.3 Distribución de presión sobre la cara aguas arriba de la placa No. 3.

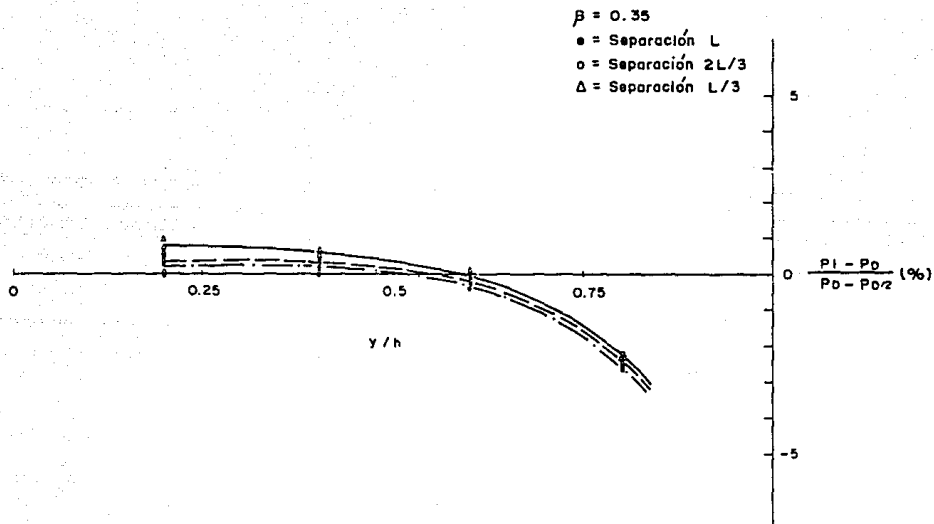


Figura 4.4 Distribución de presión sobre la cara aguas arriba de la placa No. 2.

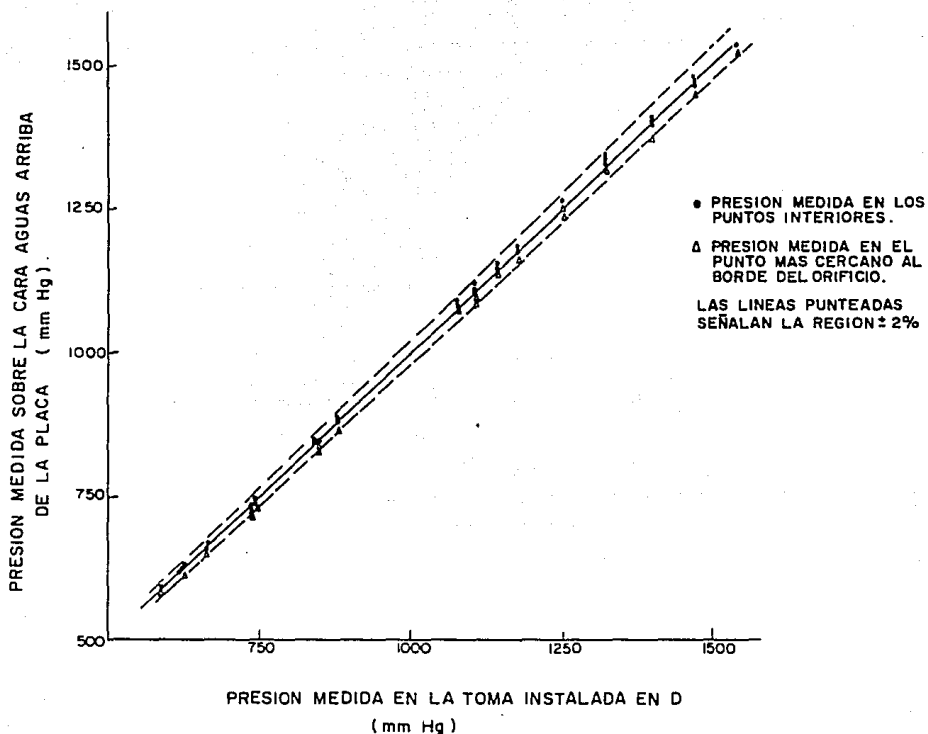


Figura 4.5 Comparación de la presión medida en los cuatro puntos sobre la cara aguas arriba contra la medida en la toma en D.

b) Cara aguas abajo

A continuación se describen los resultados obtenidos acerca del comportamiento de la distribución de presión sobre la cara aguas abajo.

En la figura 4.6, tomada de la referencia [26], se dibujó en las ordenadas la diferencia de presión medida sobre esta cara (p_i) con respecto a la medida en la toma ubicada en $D/2$, expresada en % con respecto a la diferencia de presión entre las tomas. En esta figura se muestra el comportamiento típico del gradiente de presión sobre la cara aguas abajo y se observa que es decreciente en forma apenas perceptible en el sentido radial, partiendo de la pared interior del tubo hacia el borde de la placa.

En la figura 4.7 se dibujaron los resultados obtenidos para la placa No. 1 con $\beta=0.35$ para cinco diferentes separaciones entre placas. Esto se hizo buscando encontrar alguna tendencia en el comportamiento de la presión sobre esta cara cuando se hace variar la separación entre placas. Aunque sin éxito, ya que no se pudo apreciar alguna tendencia definida para separaciones hasta de $L/2$. Sin embargo, es conveniente observar que para las separaciones $L/3$ y $L/6$ los manómetros diferenciales oscilaban debido a la turbulencia presente haciendo poco confiables las lecturas para detectar desviaciones tan pequeñas.

No obstante lo anterior, se puede afirmar, como en el caso de la cara aguas arriba, que la presión medida sobre la cara aguas abajo es prácticamente igual a la presión medida en la toma situada en $D/2$, tal como se observa en la figura 4.8, en la cual se dibujaron las presiones medidas sobre la placa, incluyendo la del borde, contra la medida en la toma en $D/2$, expresadas en mm Hg. En esta figura se puede observar que los resultados obtenidos caen dentro de la región $\pm 2\%$ de la presión en $D/2$.

Por otra parte, en las figuras 4.9 y 4.10 se presentan en forma esquemática las distribuciones de presión sobre la placa, tanto aguas arriba como aguas abajo, utilizando de manera ilustrativa los resultados de una de las pruebas efectuadas. De estas figuras se puede concluir que la distribución de presión efectiva sobre la placa se puede aceptar como uniformemente repartida, ya que la diferencia entre este esquema y el real es, aunque pequeña, conservadora. De lo anteriormente expuesto se desprende que el valor de la presión efectiva sobre la placa se puede obtener, sin caer en un grave error, mediante la diferencia entre las tomas en D y D/2, es decir, $p_{ef} = p_D - p_{D/2}$ y según lo señala la ref. [7] se tiene que

$$p_{ef} = \Delta p = \frac{\rho Q^2}{2\alpha^2 A_0^2} \quad (4.1)$$

donde p_{ef} es la presión efectiva sobre la placa en kg/m^2 , la cual puede convertirse fácilmente a kg/cm^2 que son las unidades que normalmente manejan los estructuristas. Para que lo anterior sea cierto las unidades de las variables deben ser: ρ en kg*s/m^4 , Q en m^3/s y A_0 en m^2 .

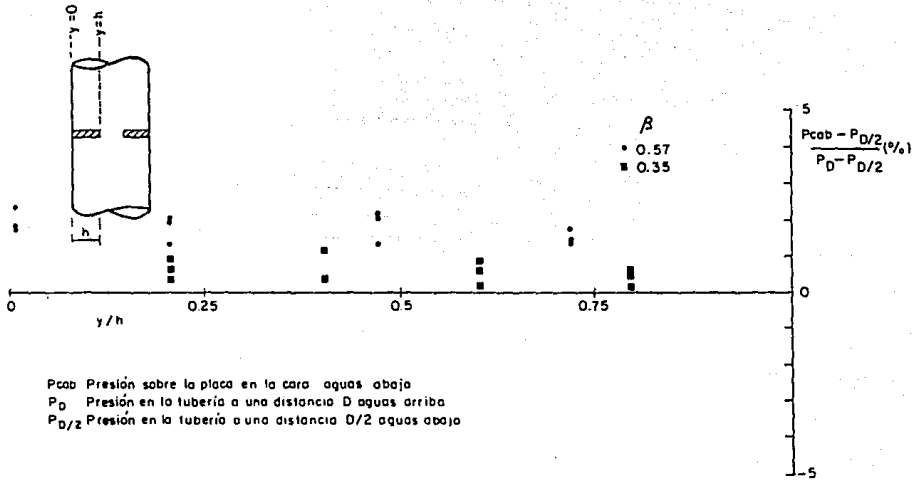


Figura 4.6 Distribución de presión sobre la cara aguas abajo de la placa No. 1 con separacion 2L/3.

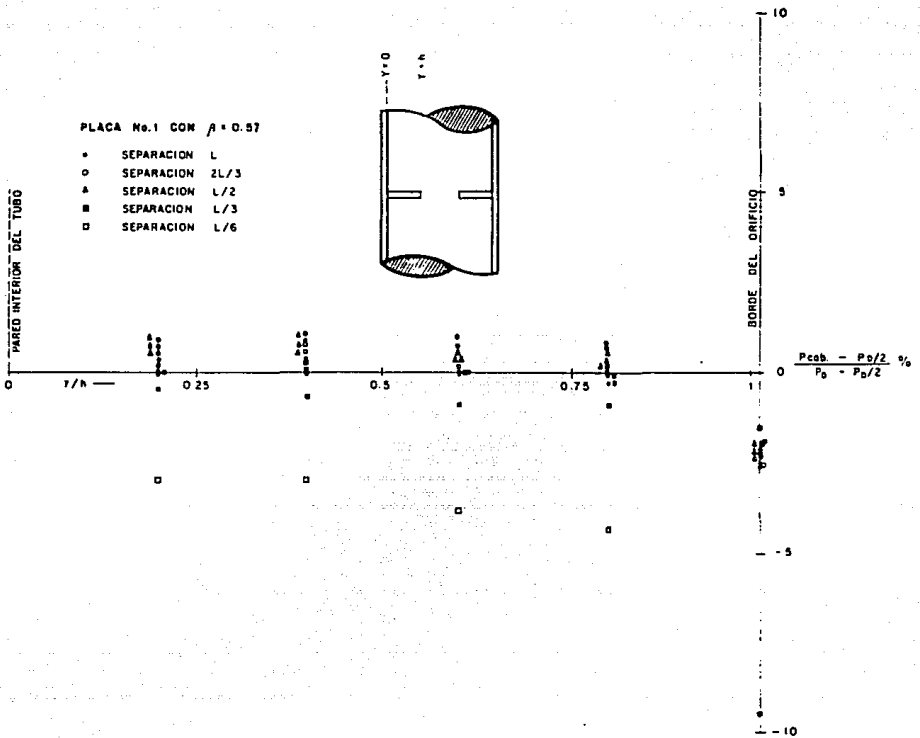


Figura 4.7 Distribución de presión sobre la cara aguas abajo de la placa No. 1.

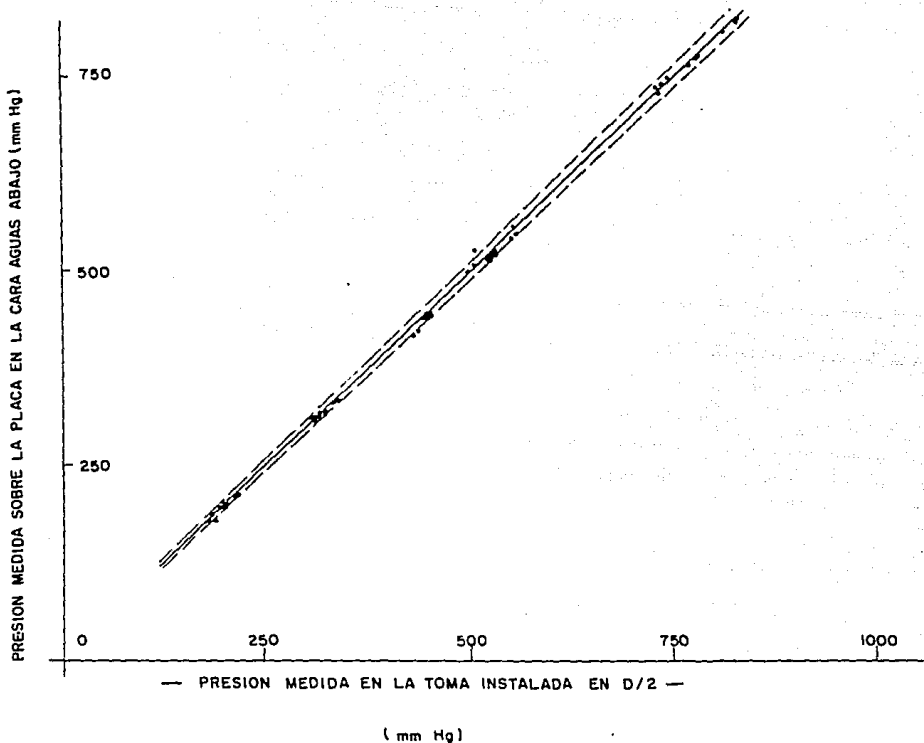


Figura 4.8 Comparación de la presión medida en los cuatro puntos sobre la cara aguas abajo contra la medida en la toma en D.

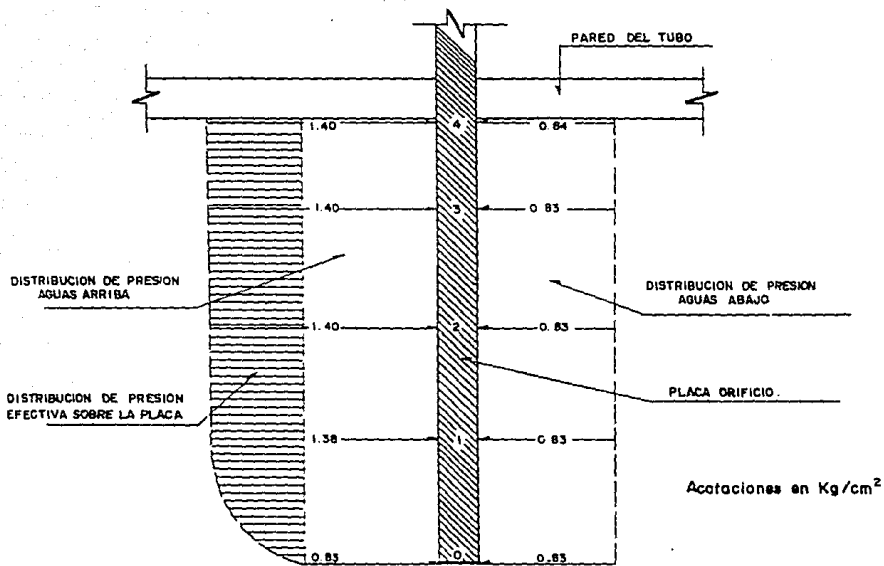


Figura 4.9 Distribución de presión sobre una placa orificio. Caso para la placa No. 2 con $\beta = 0.57$ y separación $2L/3$.

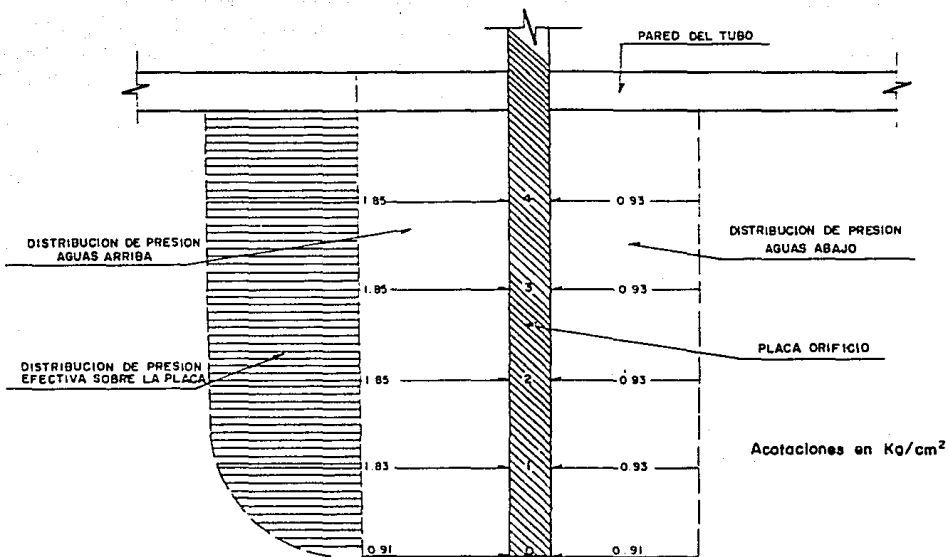


Figura 4.10 Distribución de presión sobre una placa orificio. Caso para la placa No. 2 con $\beta = 0.35$ y separación $2L/3$.

4.2 Comportamiento de la pérdida de carga para placas en serie

En este subcapítulo se presentan los resultados obtenidos de las mediciones efectuadas para tratar de describir el comportamiento de la pérdida de carga producida por las placas orificio, en forma individual y en conjunto cuando son instaladas en serie.

Si se recuerda que el objetivo principal de este estudio es la optimización y racionalización del diseño de los dispositivos de disipación de carga con base en placas orificio, se comprende el interés en observar si la pérdida producida por una placa instalada en forma aislada se conserva constante al ser colocada con otras placas en serie y/o al modificarse la separación entre placas.

Los resultados obtenidos de las pruebas efectuadas han sido dibujados en varias figuras con el fin de poder visualizar mejor el comportamiento de la pérdida producida por las placas bajo diferentes condiciones.

Con los resultados de las pruebas realizadas utilizando placas con $\beta = 0.57$, en la figura 4.11, se ha dibujado en las ordenadas la pérdida de carga producida por la placa No. 1 y en las abscisas la producida por la No. 2. Esta figura se construyó con las presiones diferenciales medidas directamente en los manómetros de mercurio y en ella se puede observar que la pérdida de carga es mayor en la placa No. 2 que en la No. 1, excepto para la separación $L/3$, para la cual aparecen algunos valores del otro lado de la recta a 45° que representa la igualdad de pérdida para las dos placas. Se puede observar también que para las separaciones L y $2L/3$ los valores se agrupan en regiones definidas, lo que no ocurre para la separación $L/3$ para la cual existe mayor dispersión. Esto se debe a que al reducir la separación entre placas aumenta la turbulencia afectando a la toma en $D/2$, lo cual hace oscilar los manómetros

diferenciales haciendo imprecisas las lecturas.

Sin embargo, a pesar de que existe una tendencia manifiesta en la placa No.2 a incrementar la pérdida de carga producida, en comparación con la placa No.1, esta desviación se conserva dentro de la región $\pm 5\%$, lo cual para dispositivos de disipación de carga se considera aceptable.

La figura 4.12 es similar a la anterior pero en las abscisas se graficó la pérdida de carga medida en la placa No.3. En esta figura se puede constatar lo dicho anteriormente para la pérdida de carga.

Los resultados de las pruebas efectuadas utilizando placas con $\beta=0.35$ se dibujaron en la figura 4.13 y aun cuando la tendencia es similar a la de las figuras anteriores ya no es tan clara debido a que existe una mayor dispersión de los valores. Esto se debe, como ya se mencionó, a que la toma de presión en D/2 es muy sensible a la turbulencia generada por el orificio y eso origina que el manómetro diferencial oscile, lo cual provoca errores en las lecturas que son del orden de las desviaciones mostradas y por ello ya no se observa claramente el comportamiento descrito. Por esta razón parece ser que los valores obtenidos son aleatorios y no guardan una tendencia definida.

Tratando de encontrar una evidencia que confirmara lo anterior se dibujó en la figura 4.14 la carga de velocidad en el orificio contra la diferencia de presión en el borde, medida directamente en el manómetro y transformada a metros de columna de agua, utilizando todos los valores obtenidos en las pruebas realizadas. En esta figura se observa que los valores obtenidos se ubican a lo largo de una recta para cada valor de β . Esto significa que la toma de presión instalada en el borde del orificio no es afectada por la turbulencia que genera la expansión del chorro y la cercanía de las placas posteriores, pues de lo contrario, existiría una dispersión apreciable en los puntos dibujados.

En esta figura también se puede observar que la diferencia de presión producida por la placa y medida en la toma localizada en el borde del orificio se mantiene constante para todas las pruebas, manteniendo una relación directa con la carga de velocidad en el orificio.

Finalmente, en las figuras 4.15 y 4.16, tomadas de la referencia [26], se puede observar que la pérdida de carga es prácticamente igual para los tres espaciamentos ensayados. En esas figuras se dibujó la pérdida de carga producida por el orificio en función del gasto para los valores de β utilizados. La pérdida de carga ($\Delta\omega$) fue calculada mediante la ecuación 2.5 y los valores de α considerados para $\beta=0.35$ y $\beta= 0.57$ son 0.6 y 0.64, respectivamente.

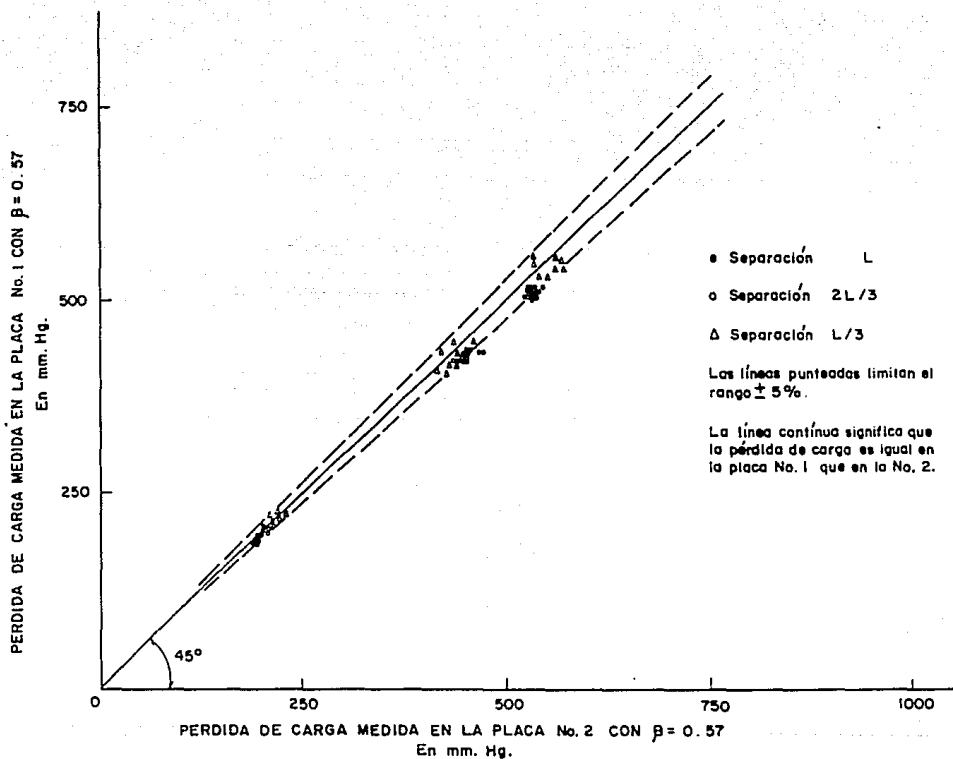


Figura 4.11 Comparación de las pérdidas de carga producidas por la placa No. 1 contra la No. 2 para $\beta = 0.57$.

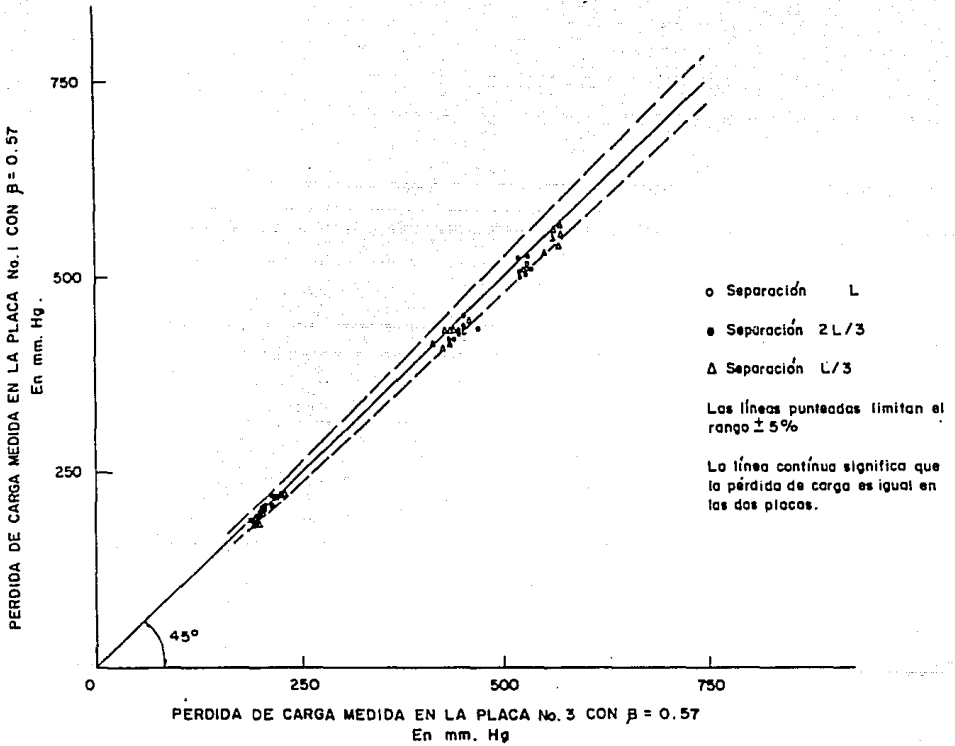


Figura 4.12 Comparación de las pérdidas de carga producidas por la placa No. 1 contra la No. 3 para $\beta = 0.57$.

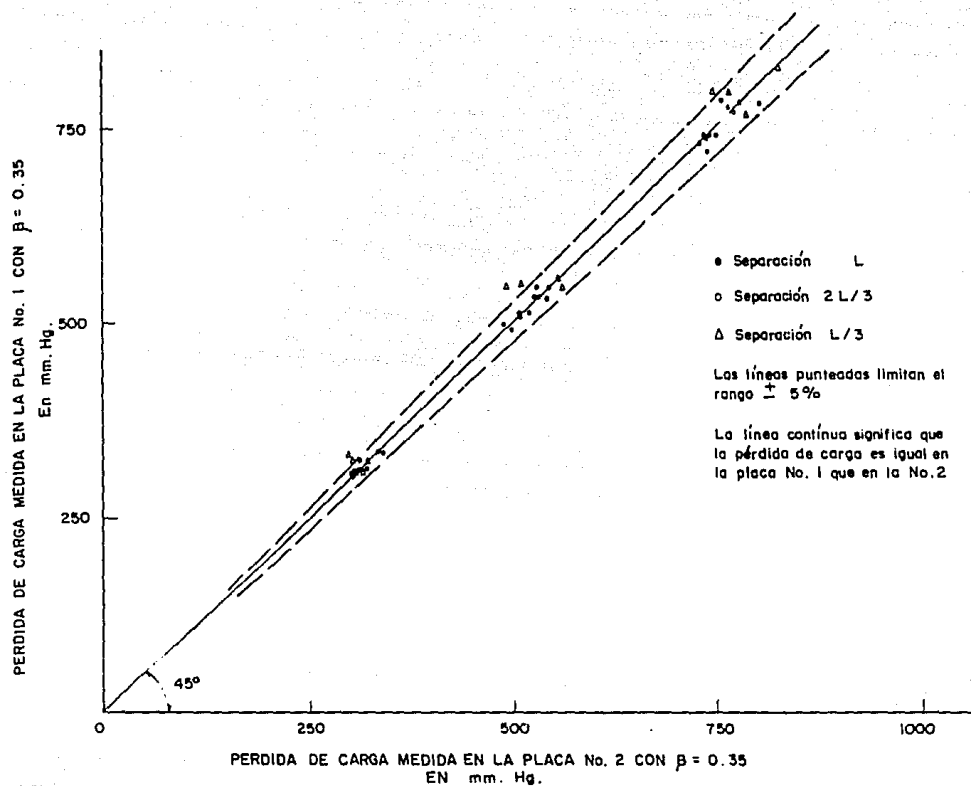


Figura 4.13 Comparación de las pérdidas de carga producidas por la placa No. 1 contra la No. 3 para $\beta = 0.35$.

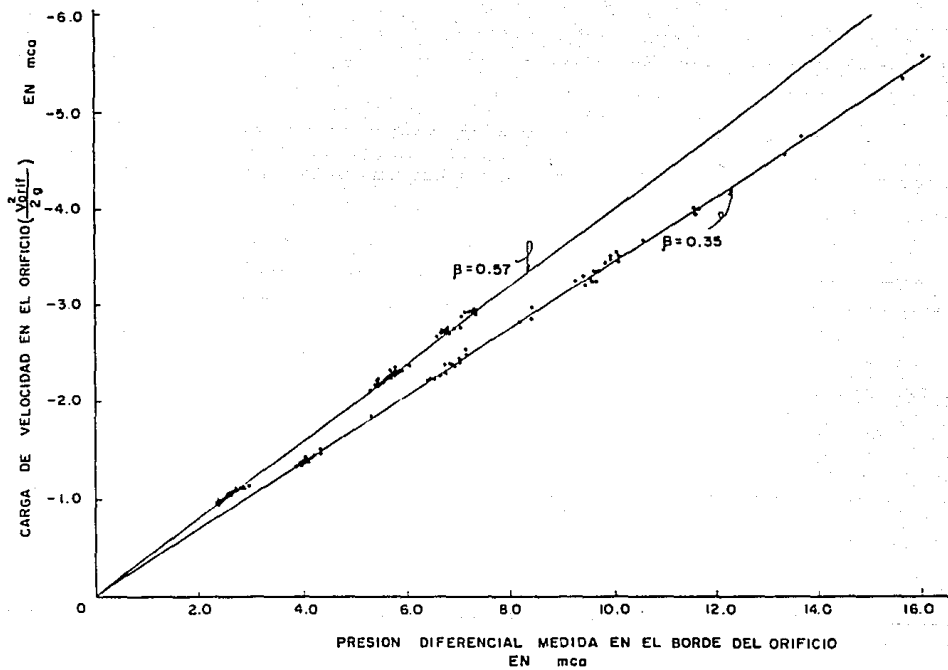


Figura 4.14 Comparación de la diferencia de presión en el borde contra la carga de velocidad en el orificio.

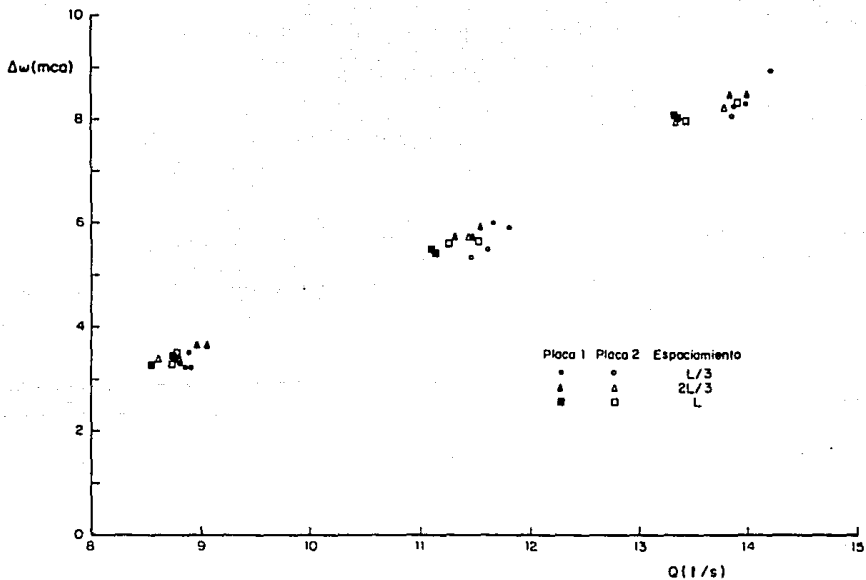


Figura 4.15 Pérdida de carga introducida por un orificio para $\beta = 0.35$.

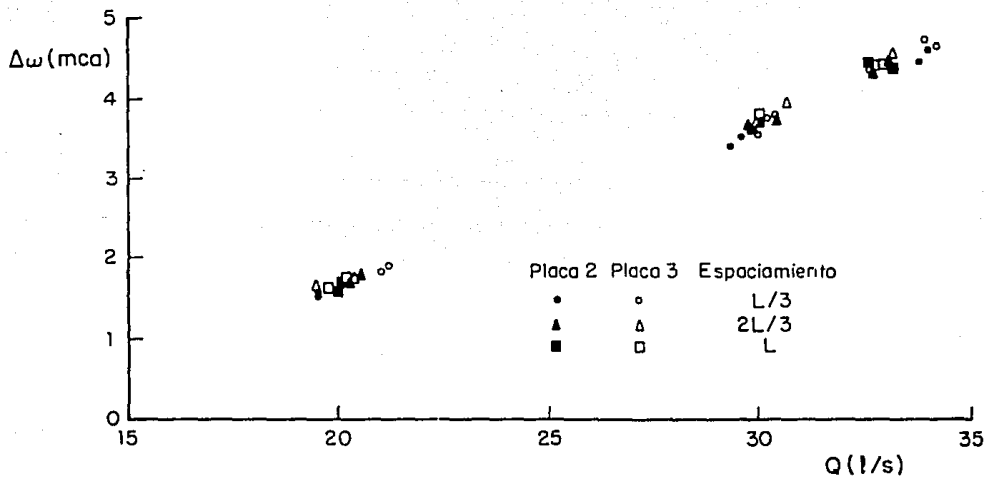


Figura 4.16 Pérdida de carga introducida por un orificio para $\beta = 0.57$.

4.3 Patrón de flujo en tuberías con placas orificio en serie

Con la finalidad de observar el patrón de flujo que se presenta dentro de un tubo con placas orificio en serie, se inyectó aire al modelo experimental en un punto situado aguas arriba de la primera placa. Lo anterior permitió apreciar con bastante aproximación las trayectorias que toman las líneas de corriente al acercarse a una placa orificio, al cruzar a través de ella y al pasar por la zona de expansión del chorro que sale del orificio. También se observó la zona de mayor turbulencia generada por el orificio y la distancia aproximada de restablecimiento del flujo (cuando las burbujas de aire trazan trayectorias uniformes y tienden a ascender y desplazarse por la parte superior de la sección) y los disturbios en el flujo que pudieran generarse por la influencia de la proximidad de las placas.

Régimen de flujo durante las pruebas

En los acueductos el régimen de flujo que, generalmente, se maneja es con números de Reynolds superiores a 10^4 mientras que en las pruebas efectuadas en el modelo se trabajó siempre con números de Reynolds entre 10^5 y 10^6 , lo cual en el diagrama de Moody corresponde a la región de flujo de transición a turbulento. Según la clasificación del flujo dada por White [27], el intervalo $10^4 < Re < 10^5$, corresponde a flujo turbulento con moderada influencia del número de Reynolds dentro del cual cae el régimen utilizado en los experimentos y que normalmente se tiene en los acueductos.

Características del flujo turbulento

Las características más importantes y representativas del flujo turbulento o de la turbulencia misma según Lelievre [28], son el aspecto irregular, desordenado e imprevisible o aleatorio del flujo y sus propiedades de difusión y

disipación. En esta última propiedad, la energía cinética de agitación es disipada en forma de calor dentro del fluido y para mantener el movimiento se requiere un aporte continuo de energía.

Esta descripción de las características de la turbulencia es importante para intentar entender los fenómenos que se describen a continuación.

a) Patrón de flujo para las separaciones L y 2L/3

En las pruebas efectuadas con separaciones entre placas de L y 2L/3, al inyectar aire en el flujo el comportamiento observado es como se muestra en la figura 4.17; en ella se observa que la zona de aceleración del flujo se localiza a menos de un diámetro D hacia aguas arriba de la placa, la sección de máxima contracción del chorro se presenta inmediatamente después de que el flujo pasa a través del orificio. A partir de este punto comienza la zona de recuperación de presión o de expansión del chorro, la cual se extiende hasta una distancia de aproximadamente L/3, es decir de unos 5 diámetros si se recuerda que $L = 16 D$, lo cual concuerda con los resultados obtenidos por otros investigadores.

Otro aspecto que se observó es el de la cavitación. Esta ocurría cuando, al ir aumentando la velocidad del flujo, el índice de cavitación resultaba menor que el índice de cavitación incipiente. Se formaba entonces una estela de burbujas a partir del borde del orificio lo cual es explicable porque allí se localiza el punto de menor presión debido a la separación de las líneas de corriente durante la contracción del chorro. La última placa es siempre la primera que comienza a cavitarse, después la penúltima y así sucesivamente. Lo anterior se debe a que la presión cae abruptamente después de una placa y al tener menor presión interior y mantenerse la velocidad, el índice de cavitación disminuye como puede observarse en las ecuaciones 2.15 y

2.16. Las burbujas que se forman en el borde del orificio viajan hacia aguas abajo hasta aproximadamente 3 o 4 diámetros y posteriormente desaparecen, generalmente en la vecindad del eje de la tubería, es decir lejos de las paredes del tubo. Lo anterior significa que las burbujas, para este nivel de cavitación, existen únicamente dentro de la zona de expansión y desaparecen al restablecerse la presión.

En dispositivos de disipación de carga la magnitud de la presión dentro del tubo juega un papel importante en la formación de la cavitación, ya que mientras menor sea dicha presión, mayor es la posibilidad de que se genere cavitación.

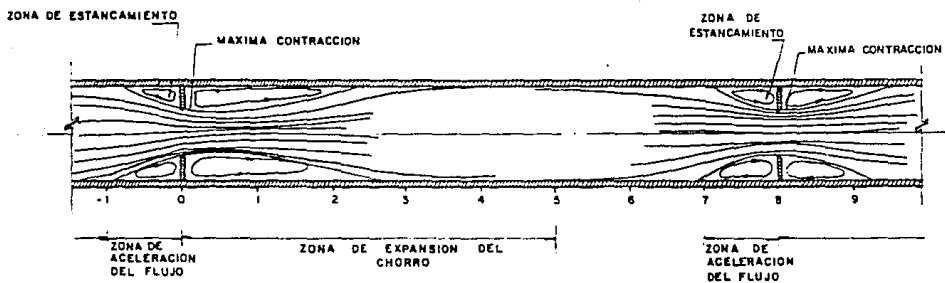


Figura 4.17 Patrón de flujo para las separaciones L y 2L/3.

b) Patrón de flujo para la separación L/3

El comportamiento del patrón de flujo para esta separación es similar al descrito anteriormente. Sin embargo, aún para condiciones que son consideradas como de no cavitación, existe generación de burbujas de "aire-vapor". La zona de generación de las burbujas se localiza sobre la pared del tubo aproximadamente a un diámetro aguas arriba de las placas posteriores a la primera. El origen de este tipo de cavitación se debe, aparentemente, a que el chorro que sale del orificio anterior no se ha expandido completamente cuando ingresa a la zona de aceleración de flujo de la placa siguiente. Lo anterior hace que se generen zonas de baja presión y un incremento considerable en el rotacional de las velocidades produciendo remolinos y vorticidad.

La formación de estas burbujas es aleatoria, con ruido y vibración moderados. Este fenómeno tiene dependencia con la relación de diámetros β pues para velocidades similares en el orificio (ver cuadro 4.1), con $\beta = 0.57$ se forman burbujas pequeñas y esféricas, mientras que para $\beta=0.35$ el tamaño de las burbujas aumenta notablemente y su forma se modifica haciéndose alargada siguiendo la trayectoria de las líneas de corriente de la zona de aproximación al orificio y emitiendo un sonido parecido a un "chiflido" al pasar por él. Este tipo de cavitación afecta el coeficiente de descarga haciéndolo inestable debido a que al pasar las burbujas por el orificio producen extrangulación del área de paso haciendo oscilar los manómetros diferenciales. En cambio, la cavitación generada en el borde del orificio realmente no afecta al coeficiente de descarga, sino más bien afecta las lecturas de los manómetros debido a la turbulencia que generan al implotar las burbujas en la zona de recuperación de presión dentro de la cual se localiza la toma ubicada en $D/2$. En la figura 4.18 se muestra el esquema del patrón de flujo para esta separación.

TABLA 4.1

COMPARACION DE LAS VELOCIDADES EN EL TUBO Y ORIFICIO PARA LAS PRUEBAS CON CAVITACION EN LA ZONA DE APROXIMACION DEL FLUJO

$\beta = 0.35$		$\beta = 0.57$	
V_t (m/s)	V_o (m/s)	V_t (m/s)	V_o (m/s)
0.649	5.304	1.532	4.716
0.853	6.965	2.173	6.689
1.039	8.485	2.482	7.641
0.646	5.275	1.547	4.760
0.864	7.053	2.208	6.797
1.022	8.351	2.465	7.588

SEPARACION ENTRE PLACAS $L/3$ (5.3 D)

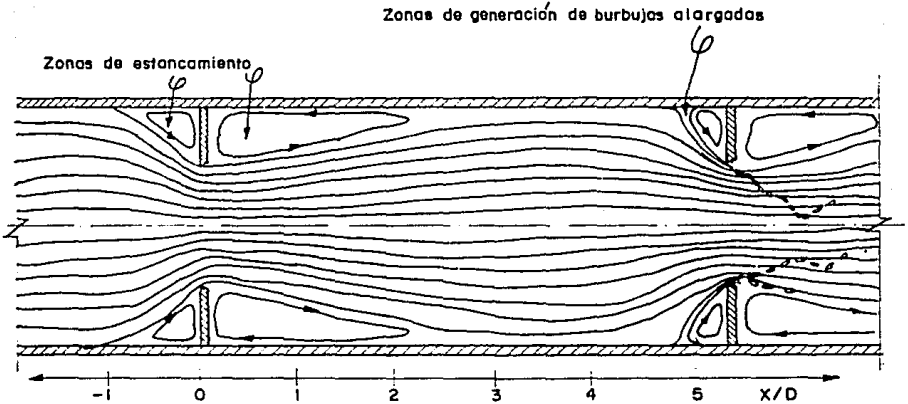


Figura 4. 18 Patrón de flujo para la separación $L/3$.

c) Patrón de flujo para la separación L/6

Al acercar las placas a una separación de L/6 el fenómeno descrito arriba se hace más intenso y desordenado pues ya no es posible delimitar una zona de generación de las burbujas y sus trayectorias se hacen aleatorias.

La pérdida de carga producida, para esta separación, por las placas posteriores a la primera se reduce del orden de un 10% comparándola con la que producen las mismas placas con separaciones mayores debido a que el chorro que sale del orificio anterior no se expande completamente y el flujo llega acelerado a la placa siguiente. Este efecto produce también un impacto sobre la placa posterior provocando fuertes vibraciones en el sentido longitudinal del tubo. En la figura 4.19 se muestra el esquema correspondiente a esta separación.

Finalmente en la figura 4.20 se muestra la distribución o gradiente de presión media sobre la pared interior del tubo antes y después de una placa orificio así como el esquema de algunos perfiles de velocidad.

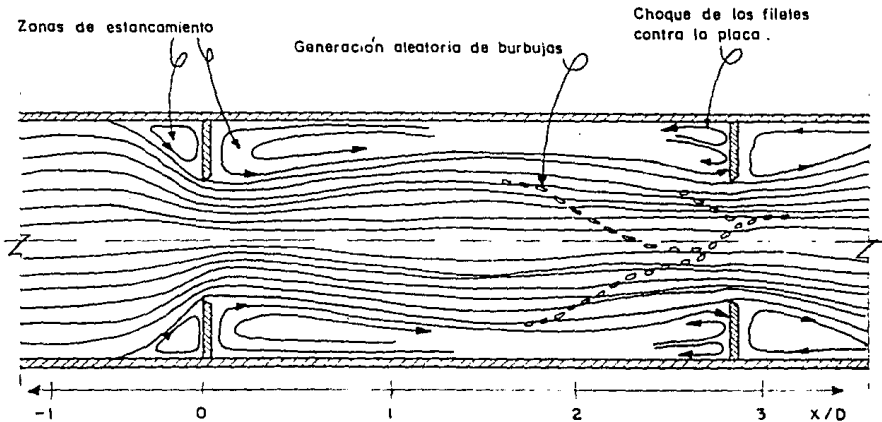
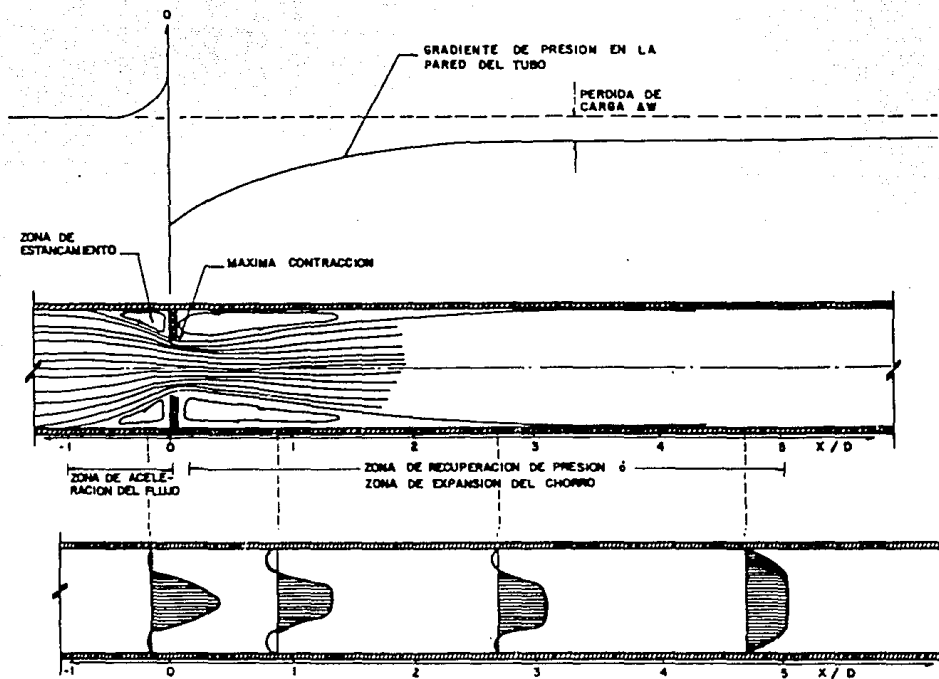


Figura 4.19 Patrón de flujo para la separación L/6.



PERFILES DE VELOCIDAD

Figura 4.20. Gradiente de presión media sobre la pared interior de un tubo antes y después de un placa orificio.

5. CONCLUSIONES

Un capítulo destinado a contener las conclusiones de un estudio en el que se pretende optimizar el diseño de los dispositivos de disipación de carga con base en placas orificio, debe incluir la determinación de los elementos de diseño de tales dispositivos.

Entre los elementos de diseño más importantes se pueden mencionar la selección del diámetro del ramal y de las válvulas de control, la determinación de la relación β y del número de placas, la recomendación de la separación mínima entre placas funcionalmente adecuada y segura, el cálculo del espesor de la placa y la recomendación de la forma de instalación.

Es por ello que a continuación se proporcionan las recomendaciones de diseño e instalación de los dispositivos ya mencionados a manera de conclusiones.

5.1 Diámetro del ramal, relación β y número de placas

Como ya se mencionó, la determinación del diámetro del ramal, la relación de diámetros β y el número de placas es simultánea y no se pueden calcular por separado pues están estrechamente relacionados.

Para el diseño de un dispositivo con placas orificio en serie se propone en este trabajo seguir la metodología siguiente:

1) Se conocen de antemano el gasto, la carga de presión total que es necesario perder o disipar y la presión interior del tubo inmediatamente antes del dispositivo, es decir, se conocen Q , ΔH y p .

2) Para los ramales, se proponen diámetros comerciales para velocidades de 2 a 5 m/s y con esto se conoce D y R_0 .

3) Partiendo de una pérdida por orificio de alrededor de 10 mca, se conoce el número de orificios tomando $n = \Delta H / 10$. Para tener elementos de selección se proponen números de orificios mayores y menores al calculado inicialmente. Con esto se tienen varias parejas de n y $\Delta \omega$ para cada diámetro comercial escogido.

4) Conocidos p , n , y $\Delta \omega$ se aplica el criterio de cavitación calculando el parámetro σ para la última placa con la ecuación 2.13 escrita como

$$\sigma = \frac{p_o - p_v}{\gamma \Delta \omega} \quad (5.1)$$

donde p_0 se calcula mediante

$$p_0 = p - \gamma \Delta \omega n \quad (5.2)$$

5) Con el ábaco de Velázquez, figura 2.7, entrando con Q/D^2 y $\Delta \omega$ se obtiene el valor de β en forma aproximada, interpolando entre las curvas, y con β y R_0 se obtiene α mediante la tabla 2.1.

6) Con la información obtenida se resuelve la ecuación 2.7 para d en forma iterativa, corrigiendo α y β en cada iteración.

7) Una vez conocida β , con D y el nivel de cavitación seleccionado (incipiente, crítica o de daño incipiente), se obtiene de resultados experimentales (figuras 2.17 o 2.18, o bien de la tabla 2.3) el valor correspondiente para σ_1 , σ_c o bien σ_{id} . Este valor se compara con σ y se determina cuales arreglos son no cavitantes o funcionalmente aceptables.

8) Proponiendo las separaciones adecuadas entre placas y las dimensiones necesarias para cambios de dirección, válvulas y juntas flexibles, tomando en cuenta las recomendaciones al respecto, se determina la longitud de los diferentes arreglos seleccionados.

9) Una vez definidos los arreglos, se evalúan económicamente y se escoge el más conveniente.

Este criterio de diseño está basado en el índice de cavitación y con él se busca obtener el menor diámetro de ramal, ya que con ello se reducirá el costo de la tubería, válvulas y demás accesorios y al mismo tiempo el menor número de placas, ya que así se tendrá un ramal más corto lo

cual incide también en la economía del dispositivo. Se puede observar que en este criterio no se mantiene una velocidad máxima permisible en los orificios y que la velocidad resultante del método puede ser mayor o menor que los 8 m/s mencionados en el capítulo 2. El resultado depende de las condiciones de presión interior del acueducto en el sitio donde se vaya a ubicar el dispositivo, particulares de cada problema.

En la tabla 5.1 se muestra un ejemplo de aplicación del criterio. En este ejemplo se desea diseñar el ramal de un quiebracargas para un gasto $Q = 0.25 \text{ m}^3/\text{s}$ que produzca una pérdida $\Delta H = 32 \text{ m}$. La presión interior del tubo en el lugar donde será instalado el quiebracargas es $p = 8 \text{ Kg/cm}^2$ y la presión de vaporización del lugar es $p_v = -1 \text{ Kg/cm}^2$. Para el diseño se aplicará el criterio propuesto:

1.- Se conocen $Q = 0.25 \text{ m}^3/\text{s}$, $\Delta H = 32 \text{ m}$, $p_v = -1 \text{ Kg/cm}^2$ y $p = 8 \text{ Kg/cm}^2$.

2.- Se proponen diámetros para el ramal que den velocidades entre 2 y 5 m/s. El cálculo da como resultado los valores anotados en las columnas 3 y 4. Los diámetros calculados deberán ajustarse a los comerciales más próximos. Con D se calcula R_e utilizando la ec. 2.6 y con esto se obtienen los valores de la columna 5.

3.- Se calcula el número de orificios requeridos mediante

$$n = \frac{32}{10} = 3.2$$

Como el número de orificios puede ser 3 o 4, se proponen además dos valores mayores que 4 y dos menores que 3. Con esto se forma la columna 1 y dividiendo ΔH entre cada número de orificios se obtienen los valores de la columna 9.

4.- Con los valores de p , n , $\Delta\omega$ y p_v se aplican las ecs. 5.2 y 5.1 y con ello se obtienen los valores de la columna 7. Por ejemplo, para $D = 0.356$ m y $n = 4$, aplicando la ec. 5.2 se tiene

$$p_e = 8 \text{ Kg/cm}^2 - (.001 \text{ Kg/cm}^3) * (800 \text{ cm}) * (4) = 4.8 \text{ Kg/cm}^2$$

Aplicando ahora la ec. 5.1 se obtiene

$$\sigma = \frac{4.8 - (-1)}{0.8} = 7.25$$

5.- Con la figura 2.7 se obtiene el valor de β para inicio de las iteraciones. Para el mismo caso, entrando con $\Delta\omega = 8$ m y con

$$Q/D^2 = \frac{0.25}{(0.356)^2} = 1.97 \approx 2$$

se obtiene $\beta = 0.52$ y con $Re = 9 \times 10^4$ de la tabla 2.1 se determina $\alpha = 0.61$

6.- Con lo anterior se está en posibilidad de aplicar la ec. 2.7 para obtener d en forma iterativa, ajustando α y β en cada iteración. Para el caso en estudio, despejando d de la ec. 2.7, se tendrá

$$d = \left[\left[\frac{(1 - 0.6100 (0.52)^2)}{(1 + 0.6100 (0.52)^2)} \right] \left[\frac{16 (0.25)^2}{2 * 9.81 * \pi^2 (0.6100)^2 * 8} \right] \right]^{1/4}$$

$$= 0.1878 \text{ m}$$

Con d obtenido se recalcula β

$$\beta = \frac{0.1878}{0.356} = 0.527$$

y con esta utilizando nuevamente la tabla 2.1 se obtiene otro valor de α y se vuelve a calcular d . Las iteraciones se detienen cuando el d calculado ya no cambia con respecto al anterior. Con lo anterior se obtienen los valores de las columnas 6 y 10.

7.- Se selecciona un nivel de cavitación, por ejemplo el de cavitación incipiente, entonces con β y D se obtiene de la figura 2.17 el valor de $\sigma_1 = 2.8$ (extrapolando) y se anota en la columna 8. Este valor se compara con el de σ calculado. Como $\sigma > \sigma_1$, no se tiene cavitación para este caso.

El cálculo anterior se realiza para todos los casos anotados en la tabla 5.1 y una vez que se termina el cálculo se determinan las longitudes de los ramales y se evalúan económicamente.

Finalmente se seleccionará el arreglo más económico sin sacrificar funcionalidad y seguridad.

5.2 Longitud del ramal

El parámetro más relevante en la obtención de la longitud del ramal es la separación entre placas.

Para determinar la separación mínima se considera en este trabajo que los aspectos funcionales más importantes son el que no se altere la pérdida de carga producida por la placa al ser instalada en serie con otras, y el que las

condiciones de flujo no provoquen el fenómeno de cavitación.

En cuanto al primer aspecto, como se apuntó en el capítulo 2, el coeficiente de descarga y por tanto la pérdida producida por la placa es sensible a cambios en el perfil de velocidades que incide en el orificio [15]. Debido a la relación inversa que guarda la pérdida de carga con el coeficiente de descarga, dicha pérdida es mayor conforme el grado de achatamiento del perfil aumenta y viceversa [16]. Lo anterior se puede también verificar mediante la observación del comportamiento del parámetro F_1 (e indirectamente de B a través de la ec. 2.11), ver figuras 2.11 y 2.12. En estas figuras se observa que al aumentar F_1 disminuye el coeficiente de descarga C_d y, por tanto, la pérdida de carga aumenta.

Considerando la relación que existe entre F_1 y B a través de la ec. 2.11 se puede afirmar que el comportamiento anteriormente descrito se verifica cuando B disminuye, es decir, en forma inversa al parámetro F_1 .

Si se recuerda la conclusión de Kline de que para obtener el establecimiento de un perfil de velocidades totalmente desarrollado se requieren más de $140 D$, se desprende que en la proximidad de los orificios siempre se tendrán perfiles perturbados, ya sea por cambios de dirección del flujo, por válvulas o por las mismas placas ya que no resulta económico ni recomendable dar separaciones tan grandes.

Por otra parte, si se revisa la figura 2.8 para separaciones como las recomendadas en el ISO, de alrededor de $30 D$, B tiende a ser máxima, lo que implica que se tendría un valor mínimo para $\Delta\omega$ y al ir disminuyendo la separación, el valor de B disminuye también con lo cual aumenta la pérdida de carga. La variación de B entre los 2 y $20 D$, si se observa por ejemplo la curva de Barbin y Jones la cual muestra una

tendencia media, va desde $B = 0.03$ para $x = 2 D$ hasta $B = 0.125$ para $x = 20 D$, mientras que para el parámetro F_1 calculando su valor con la ec. 2.11, a los valores anteriores corresponden $F_1 = 0.97$ y $F_1 = 0.875$, respectivamente.

Si se observa ahora a las figuras 2.11 y 2.12, la variación anterior de valores de F_1 representan desviaciones en el coeficiente de descarga menores al 1%. Si se considera únicamente lo anterior, se podría afirmar que para cualquier separación propuesta el valor de la pérdida de carga no se altera sustancialmente. Sin embargo, las pruebas efectuadas en el laboratorio con separaciones del orden de $3 D$ ($L/6$), muestran que la pérdida producida por un orificio disminuye apreciablemente (del orden de un 10%) debido principalmente a que no permite la expansión plena del chorro que sale de la primera placa ya que esta expansión produce la mayor parte de la pérdida.

En cambio, en las pruebas realizadas con separaciones del orden de $5 D$ ($L/3$), la pérdida de carga ya no cambia apreciablemente por lo cual se podría concluir, considerando únicamente este aspecto, que la separación adecuada fuera de $5 D$. Sin embargo, se deberá revisar el segundo aspecto considerado, es decir, la condición de cavitación.

La generación de cavitación es favorecida por variaciones locales de la presión producidas por separación de las líneas de corriente, correspondientes a cambios bruscos en la dirección del flujo.

Como se anotó anteriormente, el patrón de flujo a través de una placa orificio produce efectos que favorecen la cavitación y este fenómeno, como resultado de las pruebas efectuadas, tiene dos zonas de generación. La zona más común es en el borde del orificio y es favorecida por altas velocidades a través del orificio y baja presión interior de

la rama. Este tipo de cavitación no afecta a la placa que la produce pues las burbujas que se generan desaparecen dentro de la zona de recuperación de presión, y en el supuesto caso de que se tuviera cavitación en alguna placa, si se respeta una separación mayor a la requerida para la recuperación de presión se evita afectar a las placas posteriores. Con lo expuesto se deduce que la separación mínima entre placas debe ser mayor a los 5 D requeridos para la recuperación de la presión.

La cavitación que se produce dentro de la zona de aproximación a los orificios posteriores al primero origina alteraciones intermitentes y aleatorias en el coeficiente de descarga, produciendo oscilaciones de gasto y presión así como ruido muy molesto y fuertes vibraciones. Este tipo de cavitación, como ya se mencionó, es debida al acercamiento de las placas a separaciones menores a $L/2$ (8 D), ya que para separaciones de $L/3$ y $L/6$ los efectos que se producen son definitivamente indeseables y originan mal funcionamiento y riesgo para el dispositivo.

Por otra parte, en la figura 2.14 y en las de patrón de flujo se observa que la alteración de las líneas de corriente, y por tanto de la presión y velocidad, en la zona de aproximación al orificio, tiene un efecto que se verifica dentro de una longitud menor a un diámetro. Esta longitud, aunque es pequeña, debe ser considerada en la determinación de la separación entre placas.

Como conclusión de todo lo anteriormente expuesto, se desprende que las condiciones de mejor funcionamiento de los dispositivos de disipación de carga es con separaciones mayores a 8 D.

Es necesario observar que para esta separación se tienen perfiles de velocidades chatos que producen disminución del coeficiente de descarga y por ende un aumento en la pérdida

de carga producida por el orificio. Sin embargo, en esta condición el coeficiente de descarga es más estable que con separaciones de 30 a 40 D y las desviaciones de su valor con respecto al obtenido con perfiles de velocidades totalmente desarrollados son despreciables.

5.3 Espesor de la placa

Como se mostró en el capítulo 4, la presión efectiva sobre una placa orificio es prácticamente uniformemente repartida y su valor es aproximadamente igual a la diferencia de presión entre las tomas de presión ubicadas a distancias de D y D/2 de la cara aguas arriba y aguas abajo de la placa respectivamente, es decir

$$q = \Delta p = \frac{\rho Q^2}{2\alpha^2 A_0^2} \quad (5.3)$$

donde q es una carga uniformemente repartida por unidad de área (kg/m^2).

Existen dos formas para instalación de las placas. En la forma más común cada placa se coloca entre dos bridas y en la otra, usada en menos ocasiones recientemente, cada placa es soldada al tubo. Las dos condiciones anteriores, al ser consideradas en el cálculo estructural, no pueden ser tomadas ni como empotrada ni como libremente apoyada, sino más bien como una condición intermedia, pues forman lo que los estructuristas llaman un nudo elástico.

En este trabajo no se pretende resolver el problema estructural anterior y únicamente se expondrá la aplicación de la teoría elástica de placas desarrollada en las referencias [29] y [30], la cual fue propuesta y mostrada con mayor detalle en la referencia [26].

En la figura 5.1 se muestran los elementos mecánicos para las condiciones correspondientes a placas libremente apoyadas y empotradas. Como puede observarse en ella, para el primer caso el momento máximo es el flexionante ($M\phi$), mientras que para el empotramiento el más importante es el momento flexionante radial por unidad de longitud (Mr).

Las expresiones para cuantificar el momento flexionante predominante en la placa son

Placa libremente apoyada

$$M\phi = \frac{q D^2}{64} \left[2(1 - \mu) (1 - 2\beta^2) + (1 + 3\mu) (1 - \rho_R^2) + k_2 \left(1 + \frac{1}{\rho_R^2}\right) + 4(1 + \mu)\beta^2 \text{Ln } \rho_R \right] \quad (5.4)$$

Placa empotrada

$$Mr = \frac{q D^2}{64} \left[(1 + \mu) (1 - k_7) + 4\beta^2 - (3 + \mu) \rho_R^2 - (1 - \mu) \frac{k_7}{\rho_R^2} + 4(1 + \mu)\beta^2 \text{Ln } \rho_R \right] \quad (5.5)$$

donde μ es la relación de Poisson, ρ_R es la distancia relativa al punto estudiado a partir del centro de la placa (r/D) y las demás variables ya han sido descritas a excepción de las constantes k_2 y k_7 que se evalúan mediante

$$k_2 = \beta^2 \left[3 + \mu + 4(1 + \mu) \frac{\beta^2}{1 - \beta^2} \text{Ln } \beta \right] \quad (5.6)$$

$$k_7 = \frac{(1 - \mu)\beta^2 + (1 + \mu)(1 + 4\beta^2 \text{Ln } \beta)}{(1 - \mu) + (1 + \mu)\beta^2} \beta^2 \quad (5.7)$$

El espesor de la placa se calcula a partir del momento flexionante máximo y posteriormente se revisa por cortante. Como puede verse en la figura 5.1, los momentos máximos se tienen para $r = d/2$, ($\rho_R = d/D = \beta$), en el caso de la placa libremente apoyada y para $r = D/2$, ($\rho_R = 1$), cuando está empotrada. En la tabla 5.2 se presentan valores de los momentos máximos flexionantes para diferentes valores de β y en la figura 5.2 sus respectivas gráficas.

De esta forma se obtiene una expresión para cuantificar el espesor de la placa con apoyo en la fórmula de la escuadría, resolviendo para la fibra sujeta a tensión más alejada del eje neutro, asociada a un ancho unitario

$$E = \sqrt{\frac{6M}{f}} \quad (5.8)$$

donde f es el esfuerzo de trabajo del material de la placa y M el momento flexionante unitario.

Para tomar en cuenta la posible fatiga del material debida a vibraciones inducidas por el flujo a través del orificio, se debe tomar sólomente 0.8 del esfuerzo de trabajo.

El espesor obtenido deberá ajustarse a uno comercial y revisarse por esfuerzo cortante. Para determinar la fuerza cortante unitaria para ambas condiciones de apoyo se utiliza la expresión

$$Tr = \frac{qD}{4} \left(\rho_R - \frac{\beta^2}{\rho_R} \right) \quad (5.9)$$

En la expresión anterior T_r es la fuerza cortante radial por unidad de longitud de la circunferencia y cuyo valor es máximo cuando $r = D/2$, ($\rho_R = 1$), con lo cual la ecuación 1.1 queda

$$T_r = - \frac{qD}{4} (1 - \beta^2) \quad (5.10)$$

El esfuerzo cortante actuante f_v está dado por la expresión

$$f_v = \frac{T_r}{A_s} \quad (5.11)$$

donde A_s es el área de la sección transversal de la placa en el sentido de aplicación de la fuerza cortante.

Si se considera una sección de ancho unitario y espesor E se obtiene de la ec. 5.11

$$f_v = \frac{T_r}{E} \quad (5.12)$$

El esfuerzo cortante permisible es según la referencia [31]

$$F_v = 0.4 F_y$$

Sin embargo, considerando fatiga debido a vibraciones del flujo se debe afectar el valor anterior por el factor 0.8, por lo que finalmente el esfuerzo permisible será $F_v = 0.32 F_y$, siendo F_y el esfuerzo de fluencia del material utilizado en la fabricación de la placa.

Para efectuar la revisión por cortante se compara el esfuerzo cortante actuante con el permisible cuidando que aquél no sea mayor que éste, es decir

$$f_v \leq F_v$$

5.4 Comentarios

En este apartado se harán observaciones acerca de algunos aspectos que merecen una aclaración adicional dada su importancia.

a) Forma de instalación de la placa

La placa es junto con las válvulas de control el elemento más importante en los quiebracargas, por ello, en caso de que los orificios sufran desgaste y por lo tanto se tenga mal funcionamiento, es necesario que el dispositivo este diseñado para permitir su remoción con el fin de cambiar las placas defectuosas por otras en buen estado. Por esta razón, en los quiebracargas existentes generalmente han sido instaladas entre bridas y se ha dotado a la rama de una junta flexible para permitir su desmonte para inspección y remoción si es necesario. La forma en que puede detectarse la ineficiencia del dispositivo es colocando manómetros al inicio y al final de cada rama para observar cualquier cambio en las presiones antes y después de la rama y en la pérdida producida para determinados gastos.

Sin embargo, argumentando que se conduce agua limpia y que el material con que se fabrican las placas es acero, se ha

pensado que es innecesario utilizar bridas para la instalación de las placas e inclusive juntas flexibles, debido a que estos accesorios encarecen notablemente el dispositivo. Además, se considera que la vida útil de las placas es mayor a 15 años y que por lo tanto es más económico instalarlas mediante junta soldada y, cuando se requiera, se puede cortar la tubería para removerlas y volverla a soldar.

Desafortunadamente no se tiene información acerca del comportamiento y vida útil de las placas que permita discriminar entre una y otra forma de instalación por lo que se recomienda tomar como elemento de decisión la calidad del agua que habrá de conducirse, particularmente en cuanto al contenido de sólidos y principalmente arena, debido a que en el orificio se trabaja con velocidades de alrededor de 10 m/s, lo cual puede disminuir notablemente la vida útil de la placa y reducir gradualmente su eficiencia al deformar su borde con los consiguientes problemas de operación.

Por lo anterior, cuando se tome la decisión de instalar las placas soldándolas, se recomienda instalar cuando menos una placa entre bridas de manera que pueda inspeccionarse para verificar la evolución de su deformación.

b) Velocidad máxima en la rama

Se ha hablado aquí de cuidar la velocidad máxima en la tubería de la rama, sin embargo deben hacerse algunas observaciones al respecto pues este aspecto no es muy claro, ya que en la zona de recuperación de presión se tiene gran turbulencia y altas velocidades locales si se comparan con la velocidad media en la rama. Además, como puede observarse en la tabla 5.1, si se pretende economizar el dispositivo de disipación de carga aumentando la velocidad en la rama al reducir su diámetro, se verifica un incremento en el índice

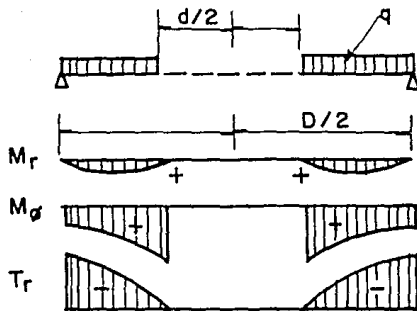
TABLA 5.1

DISEÑO DE UN DISPOSITIVO DE PERDIDA DE CARGA

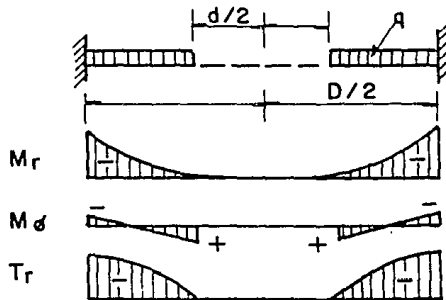
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
NUMERO DE ORIFICIOS n	RELACION β	DIAMETRO COMERCIAL D (m)	VELOCIDAD EN EL TUBO V_t (m/s)	NUMERO DE REYNOLDS Re	DIAMETRO DEL ORIFICIO d (m)	INDICE DE CAVITACION σ	IND.DE CAV. INCIPIENTE σ_i	PERDIDA DE CARGA (MCA)	VELOCIDAD EN EL ORIFICIO V_o (m/s)
6	0.560	0.356 14"	2.51	9×10^4	0.200	10.89	3.30	5.33	7.96
5	0.542				0.193	9.06	3.20	6.40	8.55
4	0.519				0.185	7.25	2.80	8.00	9.30
3	0.490				0.175	5.43	2.60	10.67	10.39
2	0.451				0.161	3.63	2.10	16.00	12.28
1	0.388				0.138	1.81	1.70	32.00	16.71
6	0.620	0.305 12"	3.43	1×10^5	0.190	10.89	4.00	5.35	8.02
5	0.607				0.185	9.06	3.90	6.40	9.30
4	0.584				0.178	7.25	3.50	8.00	10.05
3	0.556				0.170	5.43	3.10	10.67	11.01
2	0.512				0.156	3.63	2.70	16.00	13.08
1	0.445				0.136	1.81	1.90	32.00	17.21
6	0.694	0.254 10"	4.93	1.3×10^5	0.176	10.89	5.10	5.33	10.28
5	0.679				0.172	9.06	4.80	6.40	10.76
4	0.656				0.167	7.25	4.40	8.00	11.41
3	0.628				0.160	5.43	3.90	10.67	12.43
2	0.587				0.149	3.63	3.20	16.00	14.34
1	0.516				0.131	1.81	2.50	32.00	18.55

DATOS DE DISEÑO: $Q=0.25 \text{ m}^3/\text{s}$, $p=80 \text{ MCA}$, $H=32 \text{ MCA}$ (40%)

$$e < \frac{2}{3}$$



CASO DE LA PLACA LIBREMENTE APOYADA



CASO DE LA PLACA EMPOTRADA

Figura 5.1 Diagrama de los elementos mecánicos de una placa

TABLA 5.2

VALORES DE LOS MOMENTOS MAXIMOS FLEXIONANTES

β	Γ_{ϕ} *	Γ_r **
0.3	5.24	-1.82
0.35	4.90	-1.71
0.4	4.56	-1.59
0.5	3.85	-1.28
0.57	3.33	-1.04
0.6	3.11	-0.93
0.7	2.35	-0.58

PARA LOS VALORES DE LA TABLA $\mu = 0.3$

* $M_{\phi \text{ max}} = \Gamma_{\phi} qD^2/64$

** $M_r \text{ max} = \Gamma_r qD^2/64$

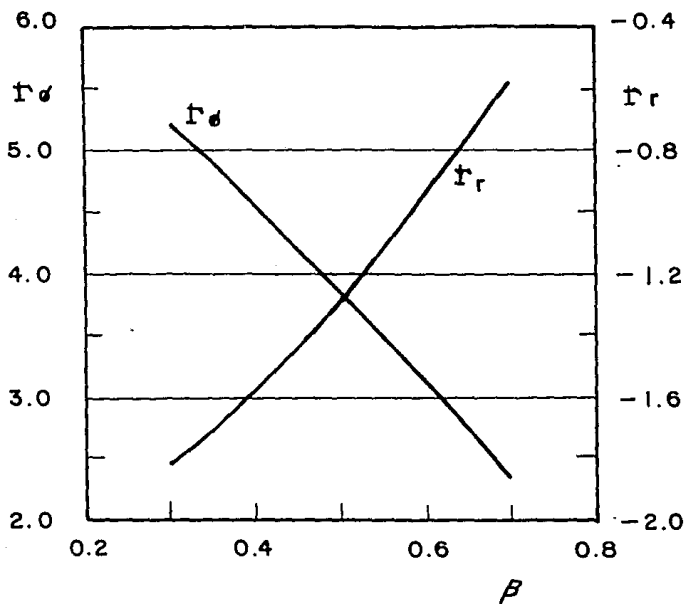


Figura 5.2 Relaciones $\beta - \Gamma_\phi$ y $\beta - \Gamma_r$ para cuantificar los momentos flexionantes máximos

A G R A D E C I M I E N T O S

Lo que un hombre es a lo largo de su existencia es producto en gran medida de su circunstancia. Con esta idea quiero decir que el haber llevado a buen término mis estudios correspondientes a la maestría en ingeniería (aprovechamientos hidráulicos) y en particular este trabajo, se debe principalmente al apoyo e impulso pleno y desinteresado que me dieron tantas personas que formaron parte de mi circunstancia.

Por ello, aún cuando al hacer una lista siempre se cometen omisiones, quiero agradecer profundamente al M. en I. Lázaro Aguilar Moreno, por las oportunidades recibidas, todas ellas importantes en su momento y cuyo valor no puedo expresar. Agradezco también a los M.en I. Rafael Carmona Paredes y José Luis Sánchez Bribiesca de quienes siempre recibí atención, orientación y apoyo a lo largo de nuestra relación, al Ing. Eduardo Rodal y en general a todo el grupo de Fluidos del Instituto de Ingeniería de la UNAM del cual fui becario, a los ingenieros Enrique Mejía Maravilla, Raul Carranza Eslava y Martín Castillo Castro de la Subdirección General de Infraestructura Hidráulica Urbana e industrial de la CNA así como a esta institución en la cual colaboro.

NOTACION

H	Carga dinámica total (m)
Q	Gasto o caudal (m^3/s)
η	Eficiencia o rendimiento de una bomba
p_v/γ	Carga de presión de vaporización (m)
p/γ	Carga de presión (m)
P_h	Potencia hidráulica (Kg.m/s)
P_m	Potencia mecánica (Kg.m/s)
$V^2/2g$	Carga de velocidad (m)
CNPS	Carga neta positiva en la succión (m)
p	Presión (Kg/cm^2)
γ	Peso específico del agua (Kg/m^3)
p_v	Presión de vaporización (Kg/cm^2)
H_e	Carga estática (m)
H_f	Pérdida de carga por fricción (m)
K	Constante global de pérdida de un sistema de conducción
t_1	Tiempo o año
d	Diámetro del orificio (m)
D	Diámetro del tubo o rama (m)
$\Delta H_1, \Delta H_2$	Pérdida de carga total (m)

β	Relación del diámetro del orificio entre el diámetro del tubo, ($\beta = d/D$)
V_a	Válvula de control
E	Espesor de la placa del orificio (m)
e	Espesor del borde del orificio (m)
α	Coefficiente de flujo que depende de β y Re
A_o	Area del orificio (m^2)
A_t	Area interior de la sección del tubo o rama (m^2)
A	Relación de áreas ($A = A_o/A_t$)
g	Aceleración de la gravedad (m/s^2)
$\Delta\omega$	Pérdida de carga diferencial producida por una placa orificio (m)
Δh	Carga de presión diferencial entre las tomas de presión de una placa orificio (m)
Re	Número de Reynolds ($Re = DV/\nu$)
V	Velocidad media en el tubo o rama (m/s)
V_c	Velocidad en la rama para la condición de cavitación crítica (m/s)
V_{cr}	Velocidad en la rama para la condición de cavitación crítica (datos de referencia obtenidos experimentalmente en m/s)
V_{d1}	Velocidad en la rama para la condición de cavitación con daño incipiente (m/s)
V_{d1r}	Velocidad en la rama para la condición de cavitación con daño incipiente (datos de referencia obtenidos experimentalmente en m/s)
ν	Viscosidad cinemática del fluido (m^2/s)
π	Constante matemática cuyo valor es 3.141596...

n	Número de placas orificio
p _{oab}	Presión en la toma de la esquina aguas abajo de una placa orificio (Kg/cm ²)
p _{oar}	Presión en la toma de la esquina aguas arriba de una placa orificio (Kg/cm ²)
p _x	Presión en un punto x a lo largo de la tubería hacia aguas arriba o aguas abajo de la placa (Kg/cm ²)
p _D	Presión medida en la toma situada un diámetro aguas arriba de la placa (Kg/cm ²)
p _{D/2}	Presión medida en la toma situada medio diámetro aguas abajo de la placa (Kg/cm ²)
p _o	Presión de estancamiento (Kg/cm ²)
p _{min}	Presión mínima medida en la región de máxima contracción del chorro (Kg/cm ²)
p _{ab}	Presión medida 10 D aguas abajo de la placa (Kg/cm ²)
p _{oar}	Presión medida sobre la cara aguas arriba de la placa (Kg/cm ²)
p _{oab}	Presión medida sobre la cara aguas abajo de la placa (Kg/cm ²)
Δp	Diferencia de presión entre las tomas (Kg/cm ²)
Δr	Diferencia entre los radios del tubo y del orificio (m)
σ	Índice de cavitación
σ _i	Índice de cavitación incipiente
σ _c	Índice de cavitación crítica

σ_{di}	Indice de cavitación con daño incipiente
B	Factor de bloqueo
R	Radio de la tubería o rama (m)
F_1	Parámetro adimensional ($F_1 = V/V_c$)
V_{cen}	Velocidad en el centro de la tubería (m/s)
r	Coordenada en la dirección radial (m)
C_d	Coefficiente de descarga para un orificio
ΔH	Pérdida de carga total introducida por un dispositivo de disipación (m)
ρ	Densidad de masa del fluido ($Kg \cdot s^2/m^4$)
F_{aux}	Factor auxiliar para reducir expresiones
y	Ordenada radial (m)

SUBINDICES

i	Incipiente o inicial
j	J-ésimo
c	Crítica
cab	Cara aguas abajo de la placa orificio
car	Cara aguas arriba de la placa orificio
cen	Al centro
r	De referencia
ar	Aguas arriba
ab	Aguas abajo o descarga
v	De vaporización
o	Orificio
aux	Auxiliar

dl Daño incipiente

d Descarga

t Tubo o rama

ref Referencia

ef Efectiva

BIBLIOGRAFIA

1.-AGUA Y SOCIEDAD.- Una Historia de las Obras Hidráulicas en México.-SARH 1988.

2.- Diseño y Operación Hidráulicos de Conducciones de Agua a Presión.-Facículo I.- Rafael Guarga, José L. Sánchez B., Rafael Carmona y Lázaro Aguilar.- Instituto de Ingeniería- UNAM (elaborado para la SARH),1989.

3.- Control of Flow in Closed Conduits.- Proceedings of the Institute Held at Colorado State University.- J. Paul Tullis, 1970.

4.- Bedding and Backfilling Methods Save Reinforcing in San Diego Aqueduct.- Robert E. Ailer.- CIVIL ENGINEERING.- May 1955.

5.- Self-Aerated Flow in Steep Partially Filled Pipes.- Peter V. Valkart.- Journal of the Hidraulics Division ASCE, Sep 1982.

6.- Etat Actuel de la Normalisation des Diaphragmes, Tuyeres et Venturis.- G. Thibessard / La Houille Blanche / No.5-1969.

7.- Measurement of Fluid Flow by Means of Orifice Plates, Nozzles and Venturi Tubes Inserted in Cross Section Conduits Running Full.- ISO 5167-1980 E, International Organization for Standardization, 1980.

8.- Normas de Proyecto para Obras de Aprovechamiento de Agua Potable en Localidades Urbanas de la República Mexicana.- SAHOP-1979.

9.- Informe técnico del diseño del quiebracargas para el Acueducto Yurivia - Coatzacoalcos.- Elaborado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM para la SARH.- 1986.

10.- Grandes Acueductos por Gravedad.- L. Ontañón, G. Granados, J. Velázquez y R. Larios.- 9° Congreso Nacional de Hidráulica 1986.

11.- Diseño y Operación Hidráulicos de Conducciones de Agua a Presión, Fascículo II.- Rafael Guarga, José L. Sánchez B., Rafael Carmona y Lázaro Aguilar.- Instituto de Ingeniería- UNAM (elaborado para la SARH), 1989.

12.- Quadrant-Edge Orifice Performance-Effect of Upstream Velocity Distribution.- M. Bogema, B. Spring and M.V. Ramamoorthy.- Journal of Basic Engineering-ASME, Dec. 1962.

13.- REVIEW: Turbulent Developing Pipe Flow.- A. Klein.- Journal of Fluids Engineering-ASME, Jun. 1981.

14.- Effect of Inlet and Outlet Conditions on Pipe and Duct Components.- Cockrell D.J.-The British Hidromecanics Research Asociation.- Sep 1967.

15.- Velocity Profile Effects on the Discharge Coefficient of Pressure-Differential Meters.- A.G. Ferron.- Journal of Basic Engineering-ASME, Sep. 1963.

16.- Losses in Quadrant-Edge Orifice Meters.- M.V. Ramamoorthy and K. Seetharamaiah.- La Houille Blanche / No.2 - 1965.

17.- A Pressure Index for Predicting the Effect of Flow Profiles on Orifice Meters Performance.- H.S. Ghazi.- Journal of Basic Engineering-ASME, Mar. 1966.

18.- Quadrant-Edge Orifice Modification for Better Performance.- M.V. Ramamoorthy and K. Seetharamaiah.- La Houille Blanche / No.3 - 1966.

19.- The Measurement and Effects of Edge Sharpness on the Flow Coefficients of Standard Orifices.- K.A. Crocket and E.L. Upp.- Journal of Fluids Engineering-ASME, Jun. 1973.

20.- Experimental Investigation of an Orifice Meter Pressure Gradient.- R.G. Teyssandier and Z.D. Husain.- Journal of Fluids Engineering-ASME, Jun. 1987.

21.- Flow Separation and Redevelopment Downstream of an End-Cap Orifice in a Tube.- D.D. Langren and E.M. Sparrow.- Journal of Basic Engineering-ASME, Mar. 1967.

22.- Choking and Supercavitating Valves.- J.P. Tullis.- Journal of the Hydraulics Division-ASCE, Dec. 1971.

23.- Cavitation and Size Scale Effects for Orifices.- J.P. Tullis and R. Govindarajan.- Journal of the Hydraulics Division-ASCE, Mar. 1973.

24.- Cavitation Scale Effects for Valves.- J.P. Tullis.- Journal of the Hydraulics Division-ASCE, Jul. 1973.

25.- Predicting Cavitation in Sudden Enlargements.- J.W. Ball and J.P. Tullis.- Journal of the Hydraulics Division-ASCE, Jul. 1975.

26.- Optimización del Diseño Hidráulico de los Controladores de Gasto con Placas Orificio para Acueductos.- L. Aguilar, E. Rodal y G. Granados.- Instituto de Ingenieria-UNAM (elaborado para la SARH), 1989.

27.- Mecánica de Fluidos.- F.M. White.- Mc. Graw-Hill 1983

28.- Une Introduction a la Phisique de la Turbulence.- J.C. Lelievre.- La Houille Blanche / No.6 1981.

29.- Tablas para el cálculo de placas y vigas pared.-Richard Bares.- Gustavo Gili 1970.

30.- Resistencia de materiales.- S. Timoshenko.- Espasa-Calpe 1975.

31.- Manual para constructores.- Compañía Fundidora de Fierro y Acero de Monterrey, S.A., 1965.