



ESTUDIO TEORICO-EXPERIMENTAL DE PERDIDAS DE CARGA

EN PLACAS ORIFICIO

Jorge Villavicencio Valdivia (1)

Carlos Kuhlenthal Ressler (2)

RESUMEN

En este trabajo se presenta un análisis teórico y experimental sobre el fenómeno de pérdidas de carga producidas por placas orificio de sección cualquiera colocadas en serie en una conducción en presión.

Los resultados experimentales permiten definir la sección y distribución espacial de placas orificio ubicadas en tuberías en presión con el fin de aumentar la pendiente media del plano de carga, y mantener la velocidad media del escurrimiento dentro de límites aceptables.

1) Ingeniero Civil, Profesor e Investigador del Centro de Recursos Hidráulicos de la U. de Chile.

2) Ingeniero Civil.

## 1.- INTRODUCCION

El límite de velocidad permisible en tuberías en presión, hace necesario introducir pérdidas de carga en aducciones o conductos cerrados en los cuales existe un gran gradiente de presiones en la dirección del escurrimiento, originado por grandes diferencias de cotas, situación que se puede presentar frecuentemente en Chile en instalaciones de alta montaña.

Es de uso generalizado para producir estas caídas de presión intercalar placas orificio de sección circular colocadas simétricamente en el eje de la tubería, debido a su bajo costo, facilidad de construcción y principalmente por la cantidad de información existente sobre su comportamiento.

Si bien es cierto que estas placas producen el efecto deseado, tienen el inconveniente de servir de trampas tanto para las partículas de fondo, como para las burbujas de aire que eventualmente acompañan el escurrimiento en la mayoría de los casos. Esta limitación de las placas orificios circulares, hace necesario utilizar placas orificio, que además de tener las ventajas antes citadas, su geometría permite el libre paso de las partículas de fondo y burbujas de aire arrastradas por el escurrimiento.

Revisando sin embargo, los trabajos y publicaciones existentes, éstos abordan sólo el fenómeno de la pérdida de carga producida por una placa orificio circular (Linford 1961, Streeter 1966, Domínguez 1974), no existiendo antecedentes sobre placas de geometrías distintas, y sólo uno de ellos considera el caso de placas orificio circular en serie (Djahan 1980).

La complejidad del fenómeno de la pérdida de carga producida por una placa orificio, y la falta de conocimiento del mecanismo generador que no permite un análisis teórico global del problema, con el fin de cuantificar esta pérdida de carga, ha obligado a abordarlo desde un punto de vista teórico-experimental.

El objetivo fundamental del presente estudio, es entregar un modelo gráfico o empírico que permite definir la forma,

sección y distribución espacial de placas orificio ubicadas en tuberías en presión, con el fin de aumentar la pendiente media del plano de carga.

Este estudio teórico-experimental se llevó a cabo en el Laboratorio del Centro de Recursos Hidráulicos del Departamento de Ingeniería Civil de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la U. de Chile.

## 2.- ANTECEDENTES TEORICOS

### A.- Generalidades

Se define como singularidad a la variación de la forma de una canalización, que en corto tramo produce grandes variaciones de las condiciones hidráulicas del escurrimiento.

La placa orificio es un elemento que introduce alteraciones en el escurrimiento, en las proximidades de ella, correspondiendo, por lo tanto, a una singularidad. En el presente trabajo sólo se ha abordado el caso de placa orificio de pared delgada, en la cual se cumple, que la vena del escurrimiento tiene contacto en una sola línea a lo largo de todo el contorno de ella y además se ha supuesto que el flujo es con turbulencia plenamente desarrollada, es decir, se desprecian los efectos viscosos. En la Fig. 1 se esquematiza el escurrimiento en las inmediaciones de la placa orificio circular. En ella se indican 4 secciones que permiten definir las características más importantes del escurrimiento. La primera (A) corresponde a la sección de aguas arriba de la placa orificio donde el flujo no ha sido alterado por la presencia de la singularidad; la segunda (B) es la sección donde está ubicada la placa orificio. La tercera (C) corresponde a la sección donde la vena alcanza su contracción máxima, y finalmente la cuarta sección (D) es aquella, en que el chorro se ha expandido completamente y se han restablecido las condiciones iniciales.

El tramo comprendido entre las secciones A y D se ha denominado "zona de influencia" de la placa orificio.

### B.- Ecuaciones Básicas

La pérdida de carga producida por una placa orificio se debe principalmente a la expansión brusca del chorro entre las secciones "C" y "D".

Aplicando el teorema de la cantidad de movimiento entre ambas secciones se tiene que la pérdida de carga originada por la expansión queda dada por la siguiente ecuación:

$$\delta = \frac{v^2}{2g} \left( \frac{1}{nC_c} - 1 \right)^2 \quad (1)$$

$n = \frac{A_o}{A}$  : relación de áreas, en que  $A_o$  = sección del orificio de la placa;  $A$  = sección de la tubería

$C_c$  : Coeficiente de contracción

$v$  : Velocidad media en la tubería

Entre las secciones A y C se puede aplicar el teorema de Bernouilli obteniéndose la siguiente relación:

$$h_A - h_C = \frac{v_c^2 - v^2}{2g} \quad (2)$$

siendo  $h_A$  y  $h_C$  las cotas piezométricas en las secciones A y C respectivamente.

Puesto que entre las secciones A y C existen pérdidas de carga que no se han considerado, y las distribuciones de los perfiles de velocidades no son constantes para ambas secciones ( $\alpha_A \neq \alpha_C \neq 1$ ), se debe introducir un coeficiente de corrección que considere estos efectos.

$$h_A - h_C = C_1 \frac{v_c^2 - v^2}{2g} \quad (3)$$

o bien referido a la sección de la placa orificio.

$$h_A - h_C = C_2 \frac{v_o^2 - v^2}{2g} \quad (4)$$

$C_1$  y  $C_2$  son coeficientes que dependen esencialmente de la geometría de la placa orificio y de la ubicación de las secciones A y C con respecto a la placa.

Igualando (3) y (4) y definiendo  $C_1/C_2 = C_d$  se tiene que:

$$\frac{v_o^2 - v^2}{2g} = C_d \frac{v_c^2 - v^2}{2g} \quad (5)$$

ecuación que permite relacionar el coeficiente  $C_d$  así definido, con el coeficiente de contracción, sabiendo que por continuidad

$$v_o = \frac{v}{n} \quad \text{y} \quad v_c = \frac{v}{nC_c}$$

Reemplazando en la ecuación (5) y ordenando convenientemente se obtiene:

$$\frac{1}{nC_c} = \sqrt{\frac{1 - n^2}{n^2 C_d^2} + 1} \quad (6)$$

Por lo tanto, la pérdida de carga originada por la expansión brusca es

$$\delta = \frac{v^2}{2g} \left( \sqrt{\frac{1 - n^2}{n^2 C_d^2} + 1} - 1 \right)^2 \quad (7)$$

Si definimos un coeficiente adimensional de pérdida de carga singular, como el cociente entre la pérdida de carga y la altura de velocidad en la tubería se obtiene finalmente

$$K = \left( \sqrt{\frac{1 - n^2}{n^2 C_d^2} + 1} - 1 \right)^2 \quad (8)$$

Ecuación que permite calcular el coeficiente  $K$ , cualquiera sea la relación de áreas  $n = A_o/A$  y geometría de la placa

orificio, debiéndose determinar para cada caso particular el coeficiente  $C_d$ .

**C.- Análisis Dimensional**

Como complemento del planteamiento teórico del punto anterior, y con el fin de definir la metodología experimental a seguir y la presentación de los resultados de una forma racional, se realizó un análisis dimensional del fenómeno de la pérdida de carga singular, incluyendo las variables más relevantes que intervienen en él.

El fenómeno en estudio queda definido en el caso más general de 2 placas orificio colocadas en serie (Fig. 2), por la siguiente expresión adimensional:

$$f(K_s, \frac{VD}{\nu}, \frac{\epsilon}{D}, \frac{L_o}{D_o}, \frac{A_o}{A}, \frac{l}{D}, C_f) = 0 \quad (9)$$

- en que:
- $K_s$  = Coeficiente de pérdida de carga singular para dos placas orificio colocadas en serie
  - $\frac{VD}{\nu}$  = Número de Reynolds
  - $\frac{\epsilon}{D}$  = Rugosidad relativa de las paredes de la tubería
  - $\frac{L_o}{D_o}$  = Espesor relativo de la placa orificio
  - $\frac{A_o}{A}$  =  $n$  = Relación de áreas
  - $\frac{l}{D}$  = Separación relativa entre las placas orificio
  - $C_f$  = Coeficiente de forma de la placa orificio

Se verá a continuación que algunos términos de la relación anterior pueden ser eliminados.

Si se considera que la pérdida de carga singular introducida en la placa orificio se produce en un tramo relativamente corto (10 diámetros de tubería aproximadamente), la pérdida de carga friccional es despreciable, por lo tanto  $\epsilon/D$  se puede eliminar de la expresión anterior.

El parámetro  $L_o/D_o$  define el espesor de la placa, siendo de pared delgada, si toma valores inferiores a 0.5. Para los objetivos de este estudio, interesa que se verifique la contracción completa del chorro, con el fin de que la pérdida de carga sea máxima, lo que ocurre para valores de  $L_o/D_o$  cercanos a cero. (Dominguez 1974, Idel'cik 1960)

Por lo tanto la expresión anterior se reduce a

$$f(K_s, R_e, \frac{A_o}{A}, \frac{l}{D}, C_d) = 0 \quad (10)$$

o bien

$$K_s = f(R_e, \frac{A_o}{A}, \frac{l}{D}, C_d) \quad (11)$$

Finalmente, y teniendo presente los fines del estudio anteriormente señalados, el escurrimiento debe tener turbulencia plenamente desarrollada ( $R_e > 100.000$  referido a la sección del orificio), por lo tanto, la expresión adimensional que caracteriza al fenómeno de la pérdida de carga para 2 placas orificio colocadas en serie es:

$$K_s = f_2(\frac{A_o}{A}, \frac{l}{D}, C_d) \quad (12)$$

**3.- EXPERIMENTACION**

**a.- Rango de experimentación**

La relación adimensional (12) deducida en el punto an

terior, permite definir la metodología experimental a seguir y el rango de variación de los parámetros que intervienen

| Parámetros | Rango de experimentación              |
|------------|---------------------------------------|
| $A_o/A$    | 0.1 - 0.9                             |
| $l/D$      | 0 - 10                                |
| $R_e$      | 100.000 - 500.000                     |
| $C_f$      | Se estudiaron 3 geometrías diferentes |

#### b.- Instalación experimental

La instalación experimental utilizada, se muestra en la Fig. 3 y consta básicamente de los siguientes elementos:

- Sistema de alimentación, que consiste, en una tubería horizontal de P.V.C. de 107 mm de diámetro interior y aproximadamente 10 m de longitud. En el punto medio de esta tubería se colocaron un sistema de flanches que permiten colocar e intercambiar las diferentes placas orificio, como así mismo intercalar módulos de diferentes longitudes, para separar estas placas en el caso de colocarlas en serie. A lo largo de esta tubería, se colocaron piezómetros que permiten definir la línea piezométrica en toda su extensión. Además en el extremo de aguas abajo de esta tubería se dispuso una válvula que permite controlar el plano piezométrico.
- Sistema aforador. Para medir el caudal se utilizó un vertedero triangular.

Las placas orificio utilizadas se fabricaron en acrílico de 4 mm de espesor y se eligieron tres formas geométricas distintas: placa orificio circular, cuadrada y rectangular. (Fig. 4). Si bien es cierto como se puede observar en la figura, la forma de esta última placa no corresponde a un rectángulo, y su denominación, sólo permite hacer una diferenciación apropiada con las demás placas utilizadas. Los tres tipos de placas orificio elegidas, se pueden considerar representativas de todas las placas de sección poligonal con simetría axial.

#### 4.- PRESENTACION DE LOS RESULTADOS

Se realizaron un total de 180 experiencias, considerando de placa orificio simple y en serie para las tres formas geométricas mencionadas.

En primer lugar se realizaron experiencias para el caso de una placa orificio simple, considerando las tres formas geométricas elegidas, y para relaciones de áreas comprendidas entre 0.1 - 0.9.

En la Tabla N° 1 y en la Fig. N° 5 se presentan los resultados de estas experiencias, observándose que el coeficiente de pérdida de carga, para una misma relación de áreas, es muy similar, para las tres formas de placas orificios estudiadas.

Se ha agregado en la Tabla 1 una columna con el valor de  $C_d$  obtenido a partir de la expresión teórica propuesta.

$$K = \left( \sqrt{\frac{1 - n^2}{C_d^2 n^2}} + 1 - 1 \right)^2$$

TABLA N° 1

| $A_o/A$ | Placa orif. Circ. |       | Placa orif. rect. |       | Placa orif. cuadrada |       |
|---------|-------------------|-------|-------------------|-------|----------------------|-------|
|         | K                 | $C_d$ | K                 | $C_d$ | K                    | $C_d$ |
| 0.1     | 251.57            | 0.59  | 231.23            | 0.62  | 241.57               | 0.60  |
| 0.2     | 51.90             | 0.60  | 49.74             | 0.61  | 52.96                | 0.60  |
| 0.3     | 17.79             | 0.62  | 19.39             | 0.60  | 18.42                | 0.61  |
| 0.4     | 8.94              | 0.59  | 8.81              | 0.60  | 7.41                 | 0.64  |
| 0.5     | 4.12              | 0.61  | 4.10              | 0.61  | 3.59                 | 0.64  |
| 0.6     | 1.93              | 0.61  | 1.97              | 0.61  | 1.77                 | 0.63  |
| 0.7     | 0.84              | 0.62  | 0.93              | 0.60  | -                    | -     |
| 0.8     | 0.34              | 0.61  | 0.39              | 0.59  | -                    | -     |
| 0.9     | 0.12              | 0.53  | 0.13              | 0.52  | -                    | -     |

La correlación entre el coeficiente  $C_d$  y la relación de áreas  $A_o/A$  no presenta una curvatura preferente para cada uno de los tres casos analizados (Fig. 6), sino más bien, estos valores tienen un comportamiento aleatorio en torno a un valor prome

dio. El valor correspondiente a la relación de área  $A_o/A = 0.9$  es el que presenta una mayor desviación, esto se debe a que el equipo utilizado, para este caso en particular, no tenía la precisión suficiente para cuantificar una pérdida de carga tan pequeña.

La variación del coeficiente  $C_d$ , con la relación de áreas y la forma de la placa orificio es muy pequeña, por lo tanto, para efectos prácticos y sin tomar en cuenta el valor obtenido para  $A_o/A = 0.9$ , se puede considerar un coeficiente  $C_d = 0.61$  único para todas ellas con un error menor del 3%.

Teniendo presente lo anterior, se puede concluir que la pérdida de carga producida por las placas orificios estudiadas, queda definida por la siguiente ecuación:

$$K = \left( \sqrt{\frac{1 - n^2}{0.37 n^2} + 1} - 1 \right)^2$$

para valores de  $R_e > 80.000$  y  $0.1 < n < 0.8$

En las Figs. 7 y 8 se muestra la variación del plano piezométrico en las proximidades de la placa orificio circular y cuadrada respectivamente, para diferentes relaciones de área. Se puede observar que los planos piezométricos para ambas placas es muy semejante.

En la Fig. 9 se presenta el plano piezométrico para la placa orificio rectangular, según el plano vertical y horizontal, ya que, dada la asimetría que tiene dicha placa orificio, estos planos piezométricos resultan ser significativamente distintos inmediatamente aguas abajo de la placa. Sin embargo, para una distancia máxima de 3 diámetros de tubería, los ejes piezométricos horizontales y verticales coinciden, siendo muy semejante como se puede observar al caso de las placas orificios circulares y cuadradas.

Estos planos piezométricos permiten definir la zona de influencia de las placas orificio, y por lo tanto, determinar la distancia mínima para la cual se han restablecido las condiciones del flujo de aguas arriba de la placa, y por lo tanto, una segunda placa similar a la primera, ubicada aguas abajo de esta zona, duplicará la pérdida de carga singular producida.

Con el fin de determinar la variación del coeficiente de pérdida de carga  $K_s$  con la separación relativa ( $l/D$ ) para el caso de placas colocadas en serie, se realizaron experiencias con placas circulares de relaciones de área  $A_o/A = 0.5$  y  $A_o/A = 0.7$ , y con placas rectangulares de relación de área  $A_o/A = 0.5$ . Los resultados de estas experiencias se muestran en la Fig. 10. En ella se puede observar que el coeficiente  $K_s$  aumenta desde el valor  $K$ , correspondiente al caso de placa orificio simple, hasta tender asintóticamente al valor  $2K$ . El punto donde la pérdida de carga se duplica corresponde aproximadamente a la zona de influencia, y permanece constante para una separación mayor entre placas.

## 5.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las principales conclusiones que puede extraerse del presente trabajo son las siguientes:

- 1.- Coeficiente de pérdida de carga para una placa orificio colocada en una tubería en presión, se puede expresar por la siguiente relación:

$$K = \left( \sqrt{\frac{1 - n^2}{n^2 C_d^2} + 1} - 1 \right)^2$$

en que:

$$n = A_o/A$$

$A_o$  = Sección del orificio de la placa

$A$  = Sección de la tubería

$C_d$  = Coeficiente que depende de la geometría de la placa y de la ubicación de las tomas piezométricas

- 2.- El coeficiente  $C_d$  es aproximadamente constante e igual a 0.61 con un error en el promedio menor al 3% para las tres formas de placas orificio estudiadas y para una relación de áreas comprendido entre  $0.1 < A_o/A < 0.8$ , y un Reynolds superior a 80.000 (referido al orificio de la placa).
- 3.- La "zona de influencia" (longitud de la zona de escurrimiento perturbada por la placa orificio) aumenta con la disminución de la relación de áreas ( $A_o/A$ ), alcanzando un valor máximo aproximado de 9.0 diámetros para la relación  $A_o/A = 0.1$  (Figs. 7, 8 y 9).
- 4.- El coeficiente de pérdida de carga " $K_s$ " para dos placas orificio colocadas en serie crece con la separación, alcanzando un valor máximo e igual a dos veces el coeficiente de pérdida de carga simple, cuando dicha separación es aproximadamente igual a la longitud de la zona de influencia (Fig. 10).
- 5.- La forma de las placas orificio estudiadas permite generalizar los resultados anteriores, a placas orificios de sección poligonal cualquiera, que cumpla que los ángulos de sus aristas sean mayores o iguales a  $90^\circ$  y colocados simétricamente con respecto al eje de la tubería.

#### BIBLIOGRAFIA

- DJAHAN GUIRF, M.G.- Recherches sur l'évolution de la perte de charge a la traversée de deux diaphragme places en série dans une conduite. Teherán, 1980
- DOMINGUEZ F.J.- Hidráulica, Universidad de Chile, 1974
- IDEL'CIK, I.E.- Memento de Pertes de Charge - Edición Eyrolles, 1960 (Traducción del ruso por M. Meury)
- LINFORD, A.- Flow Measurement and Meters - London, 1961
- STREETER, VICTOR L.- Mecánica de Fluidos - México, 1966

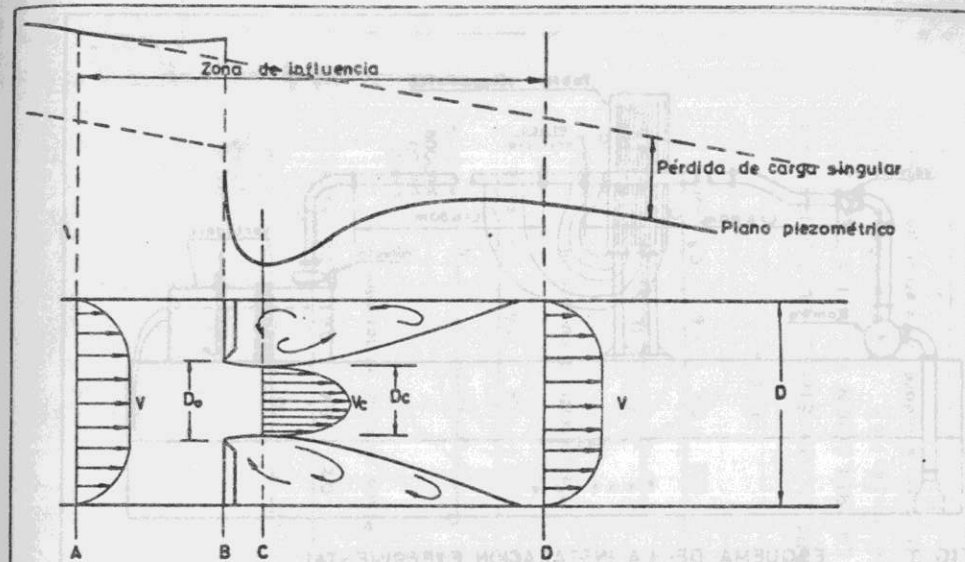


FIG. 1

ESQUEMA DE LAS CARACTERISTICAS HIDRAULICAS DEL ESCURRIMIENTO EN LAS INMEDIACIONES DE LA PLACA ORIFICIO

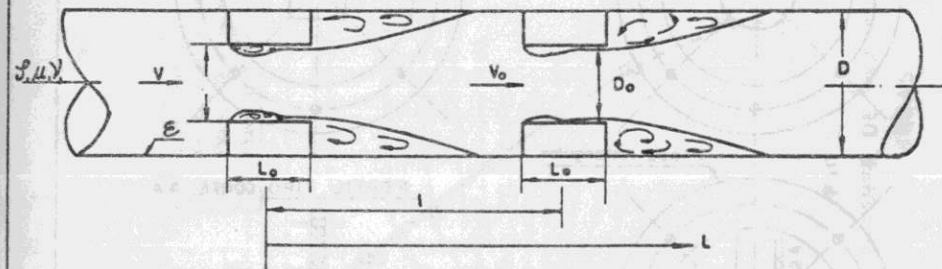


FIG. 2

PARAMETROS CARACTERISTICOS DEL FLUIDO, DEL ESCURRIMIENTO Y DE LA GEOMETRIA DE LA SINGULARIDAD (CASO GENERAL)

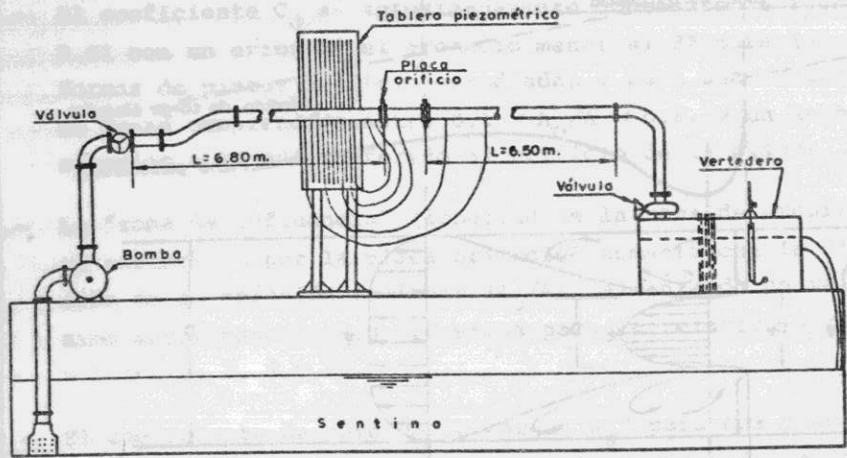


FIG. 3 ESQUEMA DE LA INSTALACION EXPERIMENTAL

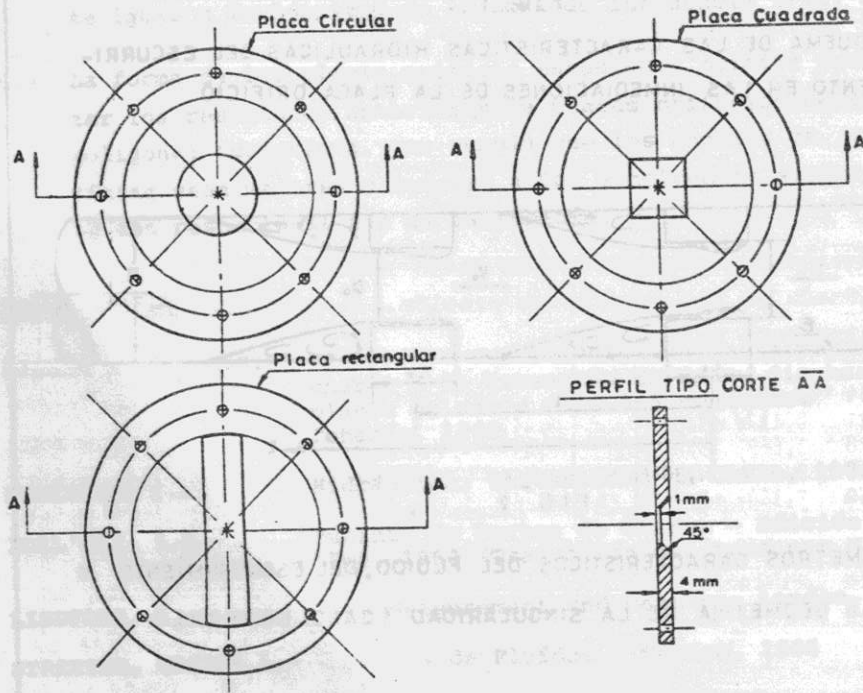


FIG. 4 TIPOS DE PLACAS ORIFICIOS EXPERIMENTADAS

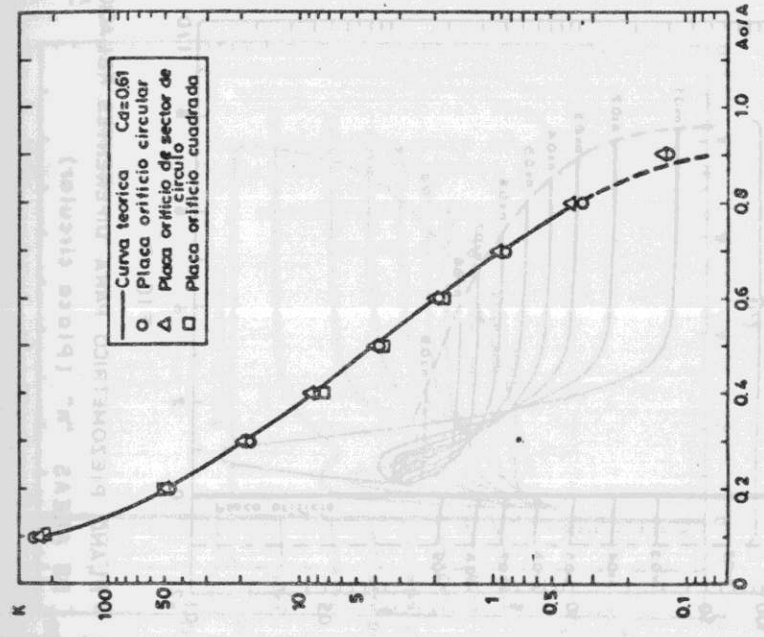


FIG. 5 VARIACION DEL COEFICIENTE DE PERDIDA DE CARGA "K" CON LA RELACION DE AREAS

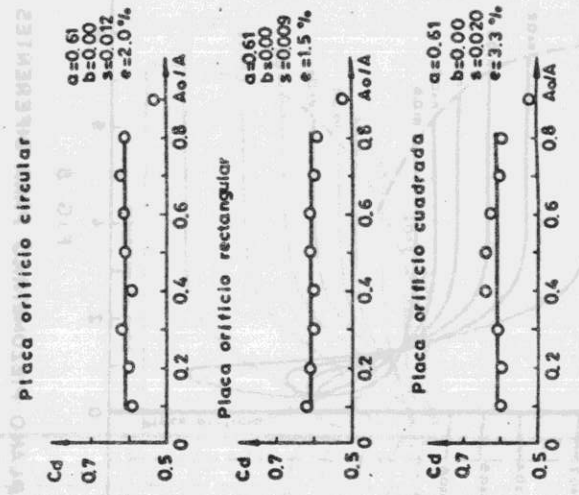


FIG. 6 CORRELACION ENTRE EL COEFICIENTE  $C_d$  Y LA RELACION DE AREA  $A_o/A$   
 $C_d = a \cdot b \cdot (A_o/A)$      $a, b = Ctes$   
 $s =$  desviación standard ;  $e =$  error porcentual



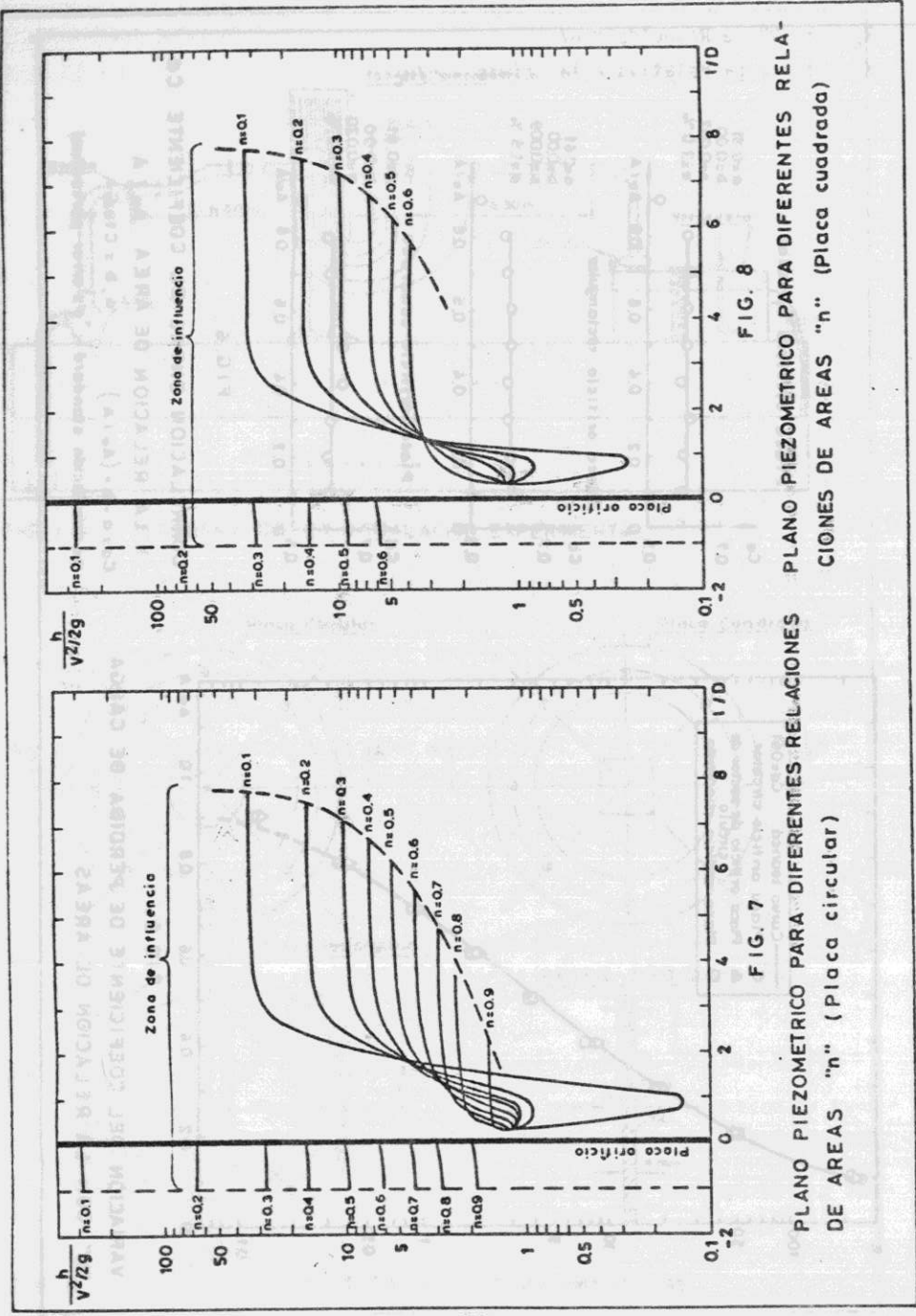


FIG. 7

FIG. 8

PLANO PIEZOMETRICO PARA DIFERENTES RELACIONES DE AREAS "n" (Placa circular) PLANO PIEZOMETRICO PARA DIFERENTES RELACIONES DE AREAS "n" (Placa cuadrada)

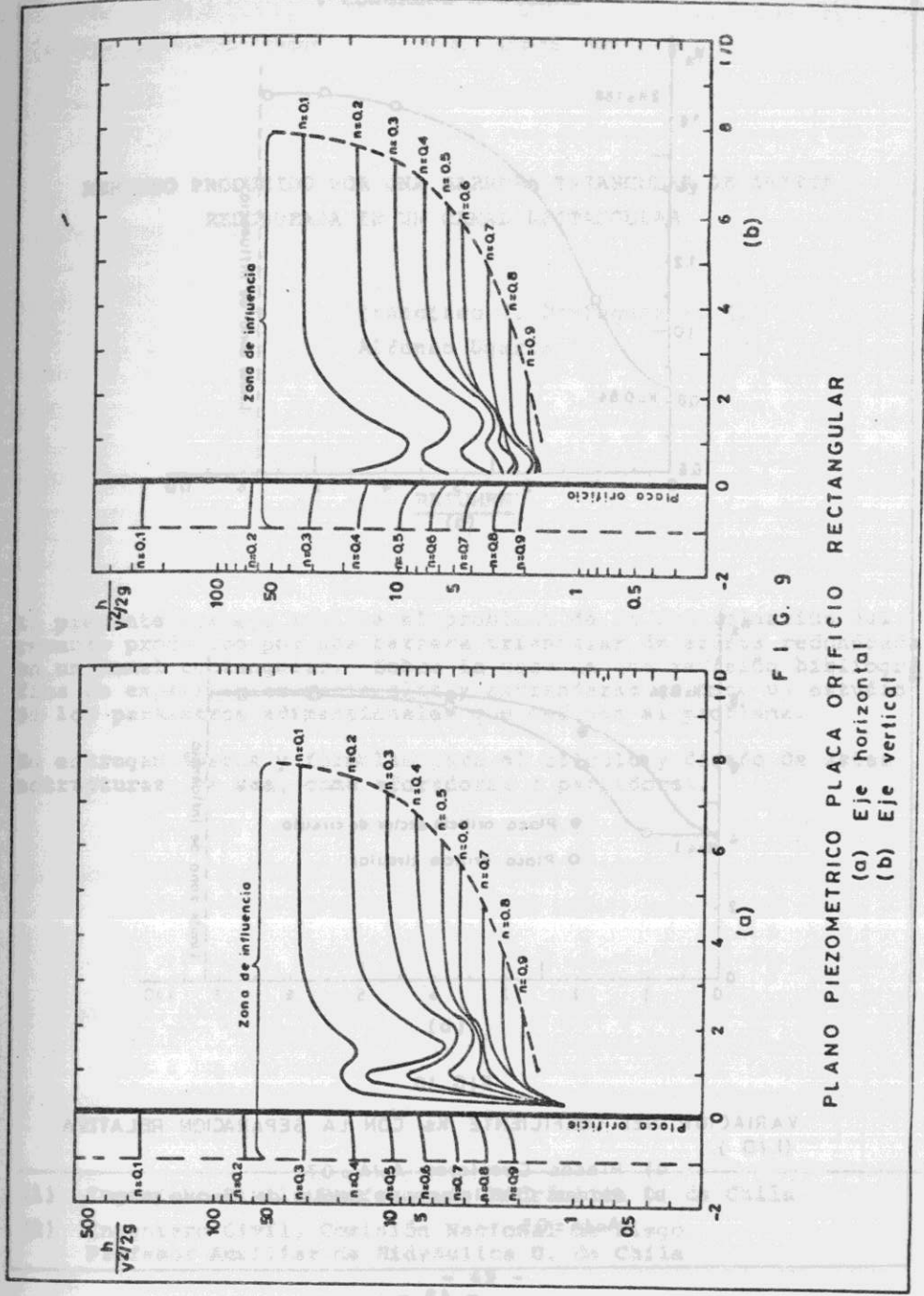
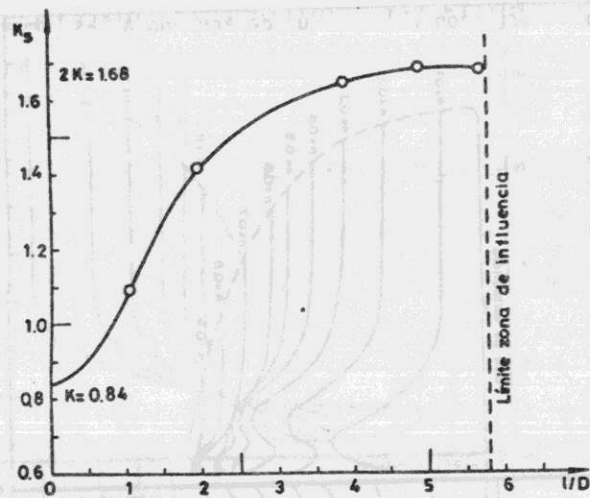
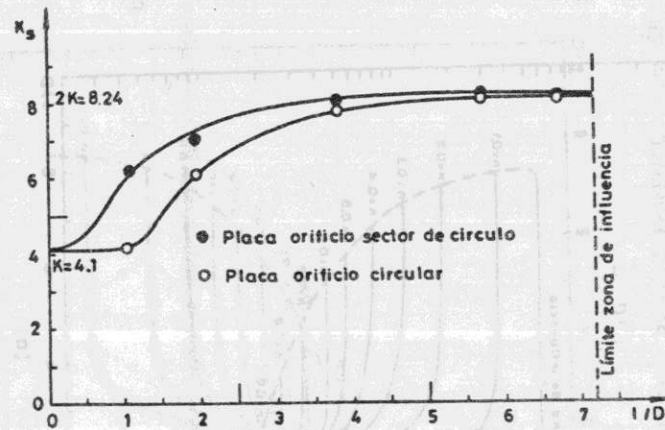


FIG. 9

PLANO PIEZOMETRICO PLACA ORIFICIO RECTANGULAR (a) Eje horizontal (b) Eje vertical



(a)



(b)

FIG. 10

VARIACION DEL COEFICIENTE  $K_s$  CON LA SEPARACION RELATIVA ( $l/D$ ).

- a) Placas Circulares  $A_0/A = 0.7$   
b) Placas Circulares y de Sector de Circulo para  $A_0/A = 0.5$

REMANSO PRODUCIDO POR UNA BARRERA TRIANGULAR DE ARISTA REDONDEADA EN UN CANAL RECTANGULAR

Francisco J. Domínguez S. (1)

Alfonso Ugarte S. (2)

RESUMEN

El presente trabajo analiza el problema de la determinación del remanso producido por una barrera triangular de arista redondeada en un canal rectangular. Sobre la base de una revisión bibliográfica de experiencias nacionales y extranjeras se hace un estudio de los parámetros adimensionales que definen el problema.

Se entregan ábacos y fórmulas para el cálculo y diseño de estas estructuras, ya sea, como aforadores o partidores.

- (1) Ingeniero Civil, Profesor de Hidráulica U. de Chile  
(2) Ingeniero Civil, Comisión Nacional de Riego. Profesor Auxiliar de Hidráulica U. de Chile