

VI CONGRESO NACIONAL

EFFECTOS DE ESCALA EN EL INICIO DE LA CAVITACION EN CUERPOS SUMERGIDOS

Jorge Villavicencio Valdivia

RESUMEN

El conocimiento básico del fenómeno de la cavitación, en particular los efectos de escala asociados a él, son de gran interés para el ingeniero hidráulico a fin de poder predecir su ocurrencia o controlar cualquier efecto dañino si la operación libre de cavitación no es posible.

El objetivo de este trabajo es presentar y enlazar las leyes de semejanza que aparecen como las más relevantes en la predicción del inicio de la cavitación.

Se presentan además, resultados experimentales que permiten visualizar la influencia de algunas de estas leyes de semejanza. En particular, se incluyen resultados experimentales obtenidos en el Laboratorio del Centro de Recursos Hidráulicos de la Universidad de Chile, que permiten respaldar algunas de las conclusiones presentadas en este trabajo.

Ingeniero Civil, Profesor e Investigador del Centro de Recursos Hidráulicos de la Universidad de Chile.

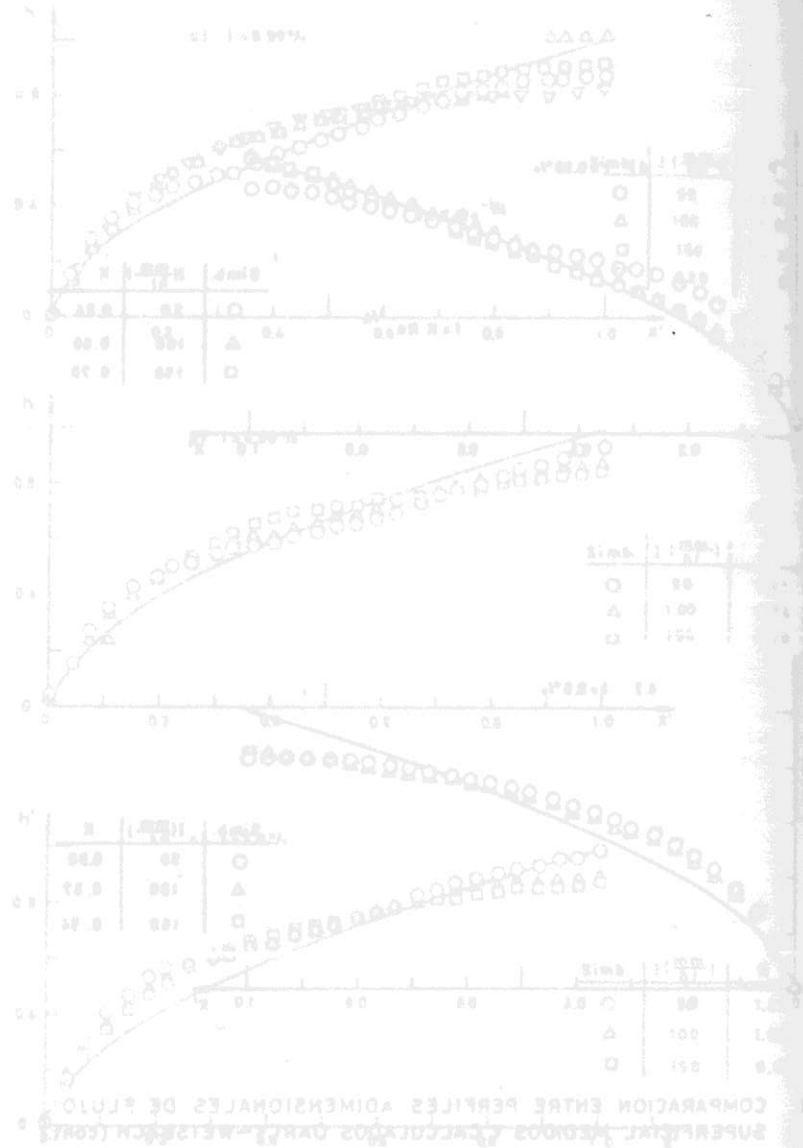


FIG. 1. COMPARACION ENTRE PERFILES ADIMENSIONALES DE FLUJO SUPERFICIAL MEDIDOS Y CALCULADOS CON DARCY-WEISSBACH

Introducción

Con el fin de predecir el funcionamiento hidrodinámico en instalaciones hidráulicas de gran envergadura, se utilizan generalmente modelos a escala. Si bien es cierto, estos modelos permiten conocer con bastante exactitud las principales características de funcionamiento del prototipo que tienen relación con las distribuciones de velocidades, presiones, y esfuerzos, no ocurre lo mismo con otros aspectos. Uno de ellos es el que tiene relación con la susceptibilidad a la cavitación.

Se denomina cavitación a la formación de burbujas de vapor en el interior de un fluido, debido a la disminución de la presión producida por efectos dinámicos. Este significado no incluye necesariamente los efectos erosivos producidos por el colapso posterior de las burbujas cuando alcanzan zonas de mayor presión.

El fenómeno de la cavitación ha sido estudiado en forma intensa, tanto experimental como teóricamente en los últimos 30 años, principalmente en relación con las turbomáquinas y hélices marinas y en menor grado, en otras instalaciones hidráulicas, como válvulas, codos, compuertas, disipadores de energía, etc., en las cuales este fenómeno se presenta con menos frecuencia, pero sin perder su importancia.

En general los resultados experimentales obtenidos por los distintos investigadores, difieren bastante aparentemente frente a una misma condición de cavitación. Estas diferencias se deben fundamentalmente a efectos de escala, producidos por uno o más del gran número de parámetros que intervienen en el fenómeno de la cavitación.

El efecto de escala desde el punto de vista del fenómeno de la cavitación, no solo se refiere a cambios en las dimensiones geométricas del flujo, sino que a cambios en las velocidades, presiones y características físicas del fluido.

El objetivo de este trabajo, es presentar el estado actual del conocimiento sobre los efectos de escala en el fenómeno de la cavitación. Se presentan algunas relaciones de semejanza para los distintos parámetros que intervienen en el fenómeno. Se incluyen además, algunos resultados experimentales que permiten analizar la mayor o menor importancia relativa que tienen los distintos parámetros en el efecto de escala.

En particular, se incluyen datos experimentales obtenidos en una instalación construida en el Centro de Recursos Hidráulicos de la Universidad de Chile.

Si bien es cierto, esta instalación se utilizó principalmente para determinar el efecto erosivo de la cavitación, parte de los resultados obtenidos, permiten respaldar en gran medida algunas de las conclusiones y recomendaciones que aquí se exponen.

Antecedentes Teóricos Básicos

La distribución de presiones en todos los puntos de un flujo en presión queda determinada por el número de Euler :

$$E = \frac{P - P_0}{\rho \frac{V^2}{2}} = 1 - \left( \frac{V}{V_0} \right)^2 \quad (1)$$

siendo  $P_0$  y  $V_0$  la presión y velocidad de un punto de referencia,  $\rho$  la densidad del fluido y  $P$  y  $V$  la presión y velocidad en un punto cualquiera del flujo.

Este parámetro, conservará su valor en punto homólogos de instalaciones semejantes, cualesquiera sean las dimensiones absolutas de la velocidad, la presión o los contornos, para un flujo permanente irrotacional y sin viscosidad.

Mientras no intervenga en la corriente ninguna otra propiedad del fluido, este parámetro queda caracterizado por el contorno y debe mantenerse forzosamente constante.

La presión P alcanza su valor máximo en un punto de estancamiento donde la velocidad es nula, siendo este valor máximo e igual a 1. En lugares donde se tienen presiones mínimas el valor de E también alcanza su valor mínimo.

$$E_{\min} = \frac{P_{\min} - P_0}{\rho v_0^2 / 2g} \quad (2)$$

Si disminuimos el plano piezométrico dentro del fluido, la presión en el punto en que E es mínimo puede alcanzar la presión de vaporización del fluido, y se tendrá entonces teóricamente un estado de cavitación incipiente (comienzo de la cavitación). Un aumento de la velocidad o disminución de la presión por encima de la necesaria para obtener esta presión crítica de vaporización, no tiene por efecto una disminución de la presión, sino que provoca una dilatación de la zona de cavitación, ya que en las cercanías del valor E<sub>min</sub> son varios los puntos que alcanzan la presión crítica.

La formación de la zona de cavitación cambia toda la forma del escurrimiento y con ello, la totalidad de la distribución de presiones y por lo tanto deja de tener validez la ecuación (1).

El número de Euler mínimo para la condición de cavitación incipiente vale :

$$E_{\min} = \frac{P - P_0}{\rho v^2 / 2g} = - K_i \quad (3)$$

siendo K<sub>i</sub> el índice de cavitación incipiente.

De acuerdo a lo anterior se pueden diferenciar tres casos :

- E<sub>min</sub> < K no hay cavitación
- E<sub>min</sub> = K cavitación incipiente
- E<sub>min</sub> > K cavitación generalizada

### Efectos de Escala en el Índice de Cavitación

De acuerdo a lo expuesto en el punto anterior, en un flujo ideal se tiene que :

$$K_i = - E_{\min} \quad (4)$$

Identidad que se cumple cualquiera sean las dimensiones de la instalación, por lo tanto, si llamamos p al prototipo y m al modelo, se tiene:

$$K_{ip} = K_{im} \quad (5)$$

Se ha comprobado en las experiencias hechas con modelos empleando distintas leyes de escala, que los resultados difieren en mayor o menor grado, de los resultados esperados.

Del análisis de los resultados de estas experiencias se puede concluir que :

- a) El flujo en el prototipo llega primero a un estado de cavitación que en el modelo.
- b) La longitud relativa en la zona de cavitación en probetas idénticas, es distinta para un mismo índice de cavitación, dependiendo de la velocidad o de las dimensiones absolutas.
- c) En instalaciones geoméricamente idénticas el índice de cavitación incipiente puede diferir significativamente del número de Euler mínimo.

Si para analizar estos resultados, consideramos como primera aproximación las pérdidas de carga entre el punto de referencia y el punto de presión mínima se obtiene que :

$$K_i = E_{\min} (1 + \lambda) \quad (6)$$

en que λ representa la pérdida de energía por fricción, por lo tanto, se tiene que la cavitación empieza antes de lo esperado.

Según Prandtl,  $\lambda$  es una función de la rugosidad  $r_s$ , del número de Reynolds  $R_e$  y de la relación entre dos longitudes características del modelo. En el caso de una probeta cilíndrica es la proporción entre el largo del flujo a lo largo de la probeta y del diámetro  $x/d$ .

En las experiencias de modelos la relación  $x/d$  no basta, ya que las dimensiones del túnel en ensayo, influyen en la distribución de presiones a lo largo de la probeta y por lo tanto, cambia el índice de cavitación incipiente.

En general, se pueden considerar las relaciones geométricas constantes, luego

$$\lambda = f\left(R_e, \frac{r_s}{L}\right) \quad (7)$$

y la condición de semejanza debe cumplirse a través de la siguiente expresión :

$$K_{ip} = \frac{1 + \lambda p}{1 + \lambda m} K_{im} \quad (8)$$

Esta es una de las causas principales de los efectos de escala, las otras causas están relacionadas con características del fluido como son, la naturaleza de los núcleos y su influencia sobre la tensión superficial, tamaño y densidad de estos núcleos y con el contenido de gases disueltos en el agua.

Otro efecto que influye es el relacionado con el proceso de evaporación, dado que en el núcleo actúa la presión parcial de vapor, una dilatación de la burbuja disminuye dicha presión, lo que ocasiona una evaporación hacia la cavidad a fin de equilibrar las presiones. Esta evaporación, sin embargo, sólo puede ser conseguida por un flujo de calor y de este modo aparece la influencia del tiempo, aunque despreciable, y la temperatura del fluido.

La influencia del tiempo, también se hace presente en el hecho de que algunos núcleos son retenidos mayor o menor tiempo en la superficie de los materiales con que se construyen el modelo y prototipo y que constituyen los límites del flujo.

Si un núcleo de gas, está sometido a bajas presiones por un largo período de tiempo, el crecimiento de la burbuja es un proceso relativamente lento de difusión gaseosa, y muy diferente al crecimiento explosivo característico del fenómeno de la cavitación. Muchas de las observaciones realizadas para determinar  $K_i$  pueden estar distorsionadas por este efecto.

En resumen, los efectos de escala originados por el proceso de evaporación se pueden resumir en lo siguiente : si el tiempo de exposición de la burbuja a bajas presiones es corto, puede esperarse que la presión crítica sea menor que la presión de vapor, ocurriendo lo contrario si el tiempo de exposición es largo. Este efecto justifica el hecho que en el prototipo la cavitación se manifieste antes que en un modelo de menor tamaño.

Los efectos de escala en los procesos de cavitación o evaporación han sido analizados extensamente por Holl (1960) y posteriormente por Arndt (1974).

Según Holl, los efectos de escala relacionados con la naturaleza de los núcleos, se pueden dividir en dos grupos, i) efectos en la presión de vapor originados por los cambios de temperatura debido a los procesos de vaporización y ii) efectos de la tensión superficial sobre las cavidades de vapor formadas dentro del fluido.

Los efectos de escala provocados por la presión de vapor, vaporización y transferencia de calor, son despreciables si la relación entre la presión de vapor y la presión del fluido es muy pequeña, lo cual ocurre para bajas temperaturas del agua.

Los efectos de escala debidos a la tensión superficial

sobre los núcleos de gas, están estrechamente ligados con el inicio de la cavitación. Teóricamente en un fluido libre de núcleos gaseosos, la tensión a que debe someterse el fluido para producir cavitación tiende a  $\infty$  (Arndt & Ippen, 1967). Se han realizado experiencias con agua muy pura y libre de núcleos, lográndose producir cavitación con presiones menores de 150 atmósferas. Presiones negativas tan grandes no se producen normalmente en estructuras o ensayos realizados en modelo, por lo tanto la susceptibilidad a la cavitación en una instalación está estrechamente relacionada con la existencia de estos núcleos en el fluido.

Los efectos de escala relacionados con la existencia y tamaño de los núcleos, en el fenómeno de la cavitación, queda determinado por el número de Weber:

$$W = \frac{\rho V_0^2 L}{\sigma} = \text{cte} \quad (9)$$

donde  $\sigma$  es la tensión superficial,  $V_0$  la velocidad de referencia y L una dimensión.

Dado que los efectos de la tensión superficial están relacionados con el tamaño de los núcleos, más que con el número de ellos, la condición de semejanza puede ponerse como :

$$\rho \frac{V_0^2 R}{\sigma} = \text{cte} \quad (10)$$

donde R es una longitud representativa del tamaño de los núcleos.

Otros efectos de escala, que tienen relativamente menor importancia en el inicio de la cavitación, que los ya citados son:

a)  $F = \frac{V_0}{\sqrt{gL}}$  número de Froude (11)

Tiene importancia en instalaciones de gran tamaño, produciendo una gran influencia en la cavitación en el plano vertical.

b)  $M = \frac{V_0}{a}$  número de Mach (12)

donde a es la celeridad de la onda de presión en el fluido. Tiene importancia sólo cuando existe cavitación generalizada y el fluido es una mezcla de líquido y vapor.

Por último, la cavitación puede ser ocasionada por el movimiento fluctuante de las turbulencias que producen rápidos cambios en la velocidad y presión y que dependen del tamaño del modelo y del número de Reynolds.

Dado que el verdadero mecanismo de la cavitación no está aún bien definido, el conjunto de relaciones de semejanza mencionadas anteriormente puede estar incompleto. Sin embargo, estas relaciones pueden considerarse como representativas del estado actual del conocimiento del fenómeno de la cavitación.

Se presenta en la Tabla N° 1 un resumen de las relaciones de semejanza que se consideran más importantes. Sólo se consideran efectos de escala relacionados con la semejanza geométrica y cinemática. Las propiedades del fluido se mantienen constantes como son presión de vapor, temperatura, viscosidad, compresibilidad y tensión superficial.

Se puede observar en dicha tabla, que todos los efectos de escala considerados como los más importantes, aumentan la susceptibilidad a la cavitación al aumentar el tamaño de la instalación, excepto el efecto de la rugosidad, ya que en general la relación  $r_s/L$  en el modelo es mayor que en el prototipo.

Instalación Experimental

Un esquema de la instalación experimental diseñada y construida en el Centro de Recursos Hidráulicos, con el fin de producir, controlar y medir la cavitación, se presenta en la Fig. 1a.

TABLA N° 1

RELACIONES DE SEMEJANZA

Fuerzas Preponderantes	Relación de semejanza	Condiciones de semejanza para un mismo fluido	Efectos de escala en $K_i$ por cambios de $v_0$
1 Presiones y Fuerzas de Inercia (Teoría clásica)	$K_i = \frac{P - P_v}{v_0^2} = \text{cte}$	$P - P_v \sim v_0^2$	Ningún efecto $K_i = \text{cte}$
2 Fuerzas viscosas y fuerzas de inercia	$R_e = \frac{v_0 L}{\nu} = \text{cte}$	$v_0 L = \text{cte}$	$K_i$ aumenta con $v_0 L$ .
3 Fuerzas gravitacionales y fuerzas de inercia	$F = \frac{v_0}{\sqrt{g L}}$	$v_0 = \text{cte}$	Variación de $K_i$ en el eje vertical con $v_0/\sqrt{L}$
4 Efecto de la rugosidad superficial	$\frac{r_s}{\delta} = \text{cte}$ $r_s$ : altura rug. $\delta$ : altura capa lím.	$\frac{r_s}{\delta} = \text{cte}$ si $R_e = \text{cte}$	$K_i$ aumenta con $r_s/\delta$
5 Fuerzas elásticas y fuerzas de inercia	$M = \frac{v_0}{a} = \text{cte}$	$v_0 = \text{cte}$	Solo importante para cavitación generalizada
6 Fuerzas de Tensión Superficial y fuerzas de inercia	$W = \frac{\rho v_0^2 r}{\sigma} = \text{cte}$	$v_0^2 r = \text{cte}$ o $r = \text{cte}$ y $v_0$ -cte	$K_i$ aumenta con $v_0^2 r$

Consta básicamente de los siguientes elementos : una tubería de acrílico de 15 cm de diámetro, una sección de control en la garganta del venturi, un grupo motobomba, un tanque aforador dotado de un vertedero triangular y dos válvulas en ambos extremos de la tubería, que permiten controlar la presión y velocidad dentro de ella.

Las presiones se midieron mediante piezómetros conectados a un manómetro de mercurio tipo "U" con uno de sus extremos abierto a la presión atmosférica.

La sección de ensayo propiamente tal está ubicada en la garganta de un venturi de 56 mm de diámetro y 100 mm de largo donde se ubican las probetas cilíndricas de 19 mm de diámetro y cabeza semiesférica mediante un porta probetas colocado en el eje del venturi. El detalle del venturi, porta probetas y probeta se muestra en la Fig. 1b.

Resultados Experimentales

Parte de los resultados experimentales obtenidos en la instalación descrita en el punto anterior, se presentan en las Figs. 2, 3 y 4.

En la Fig. 2 se presenta la distribución de presiones representada por E, alrededor de una probeta de cabeza semiesférica de bronce. Se compara con la distribución obtenida por Rouse y Mc Nown para una probeta de acero geoméricamente similar.

Se puede observar, que si bien es cierto existe una gran semejanza geométrica entre ambas distribuciones de presión, surgen significativas diferencias en el valor del número de Reynolds crítico (comienzo de la cavitación), el valor que toma el número de Euler mínimo y el valor de la cavitación incipiente y generalizada. Los valores obtenidos en cada caso son los siguientes :

	Rouse y Mc Nown	J. Rehnfeldt
Cavitación incipiente $K_i$	0.80	0.76
Cavitación generalizada K	0.20	0.48
Reynolds crítico $R_{er}$	$2.0 \times 10^5$	$1.8 \times 10^5$
Euler mínimo $E_{min}$	0.76	0.69

Estas diferencias se deben principalmente a la distinta relación entre el diámetro de la garganta del venturi y el diámetro de la probeta, siendo igual a 11.0 en la instalación utilizada por Rouse y Mc Nown y 3.0 para la utilizada por J. Rehnfeldt. Existiendo en consecuencia para este último caso, un efecto de pared que disminuye el valor de  $E_{min}$  y con ella el valor de la cavitación incipiente  $K_i$ , siendo menos susceptible a la cavitación (Fig. 3c).

En la Fig. 3a se muestra la distribución de presiones relativas a lo largo de la probeta para distintos caudales. Se puede observar que la presión decrece con el caudal, en todos los puntos aguas abajo del punto de separación  $P_3$ , hasta alcanzar una presión mínima igual a -9.4 m.c.a., muy próxima a la presión de vapor (-9.56 m.c.a.). Este valor se mantiene constante para caudales mayores y representa la presión dentro de la cavidad de vapor.

Finalmente se incluye en la Fig. 4 los valores obtenidos por Van der Meulen para la cavitación incipiente  $K_i$  y su dependencia del número de Reynolds y del contenido de aire disuelto en el agua, para tres tamaños de probetas semiesféricas de teflón.

Se ha incluido además los valores obtenidos por J. Rehnfeldt para un valor muy similar del contenido de oxígeno disuelto.

En estas figuras se puede observar que el índice de cavitación incipiente, o la susceptibilidad a la cavitación, crece fuertemente con el número de Reynolds, y débilmente con el contenido de aire disuelto. El aumento del contenido de aire disuelto en el fluido, produce además un aumento en la dispersión de los resultados, lo cual indica que la visibilidad de los núcleos puede de-

berse en algunos casos a un proceso de difusión gaseosa.

### Conclusiones

Las principales conclusiones del presente estudio son:

- Los efectos de escala sobre el inicio del fenómeno de la cavitación, dependen de un gran número de relaciones de semejanza, siendo las más importantes las incluidas en la Tabla N° 1.  
En general:  $K_i = f(E, R_e, W, \frac{r_s}{\delta}, F)$
- No existe una evidencia experimental que indique a priori una menor influencia de alguna de ellas, que permita simplificar la expresión anterior, sin incurrir en grandes diferencias.
- De lo anterior se puede concluir, que la relación clásica de semejanza, utilizada para predecir la susceptibilidad a la cavitación no reproduce todos los efectos de escala.
- Si bien es cierto, para iniciar la cavitación es necesaria la existencia de núcleos gaseosos en el fluido, el número de ellos no influye notoriamente en el índice de cavitación (Fig. 4).
- Dado que, todas las relaciones de semejanza que intervienen en el fenómeno, aumentan la susceptibilidad a la cavitación del prototipo a medida que aumenta la relación de escala geométrica entre modelo y prototipo, sería razonable usar modelos distorsionados utilizando un líquido más susceptible a cavitación, de manera que los resultados obtenidos en el modelo en relación con la cavitación, coloquen al prototipo por el lado de la seguridad.
- Finalmente, la conclusión general más evidente que resulta del estudio bibliográfico y experimental realizado, es que las características del fenómeno de la cavitación y los efectos de escala asociados a él no están aún claramente establecidos. Es de gran importancia en consecuencia, continuar realizando ensayos en modelos con distintas velocidades, dimensiones y propiedades del fluido a fin de determinar una relación de semejanza que presente mejor los efectos de escala.

Bibliografía

- Arndt R. & Ippen A., 1967. Cavitation near surfaces of distributed roughness, MIT Report N° 104.
- Arndt R. & Ippen A., 1968. Rought surface effects on cavitation inception, MIT Report N° 157.
- Holl W. & Wisleceus G., 1960. Scale effects on cavitation, Journal Basi Eng. ASME, Paper N° 60.
- Kato Hiroharu, 1975. A consideration on sealing Iowa of cavitation erosion, International Shipbuilding Progress N° 253.
- Knapp R.T., 1958. Cavitation and Nuclei, ASME.
- Meulen J. Van der, 1972. Incipient and desiment cavitation on hemispherical nosed bodies, International Shipbuilding Progres N° 209.
- Meulen J. Van der, 1972. Cavitation on hemispherical nosed teflon bodies, International Shipbuilding Progress N° 218.
- Rehnfeldt J., 1980. Estudio teórico experimental del fenómeno de la cavitación, Universidad de Chile, Fac. de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- Rouse H. & Mc Nown J., 1948. Cavitation and presure distribu-tion, State University of Iowa Studies in Engineering, Bulletin 32.

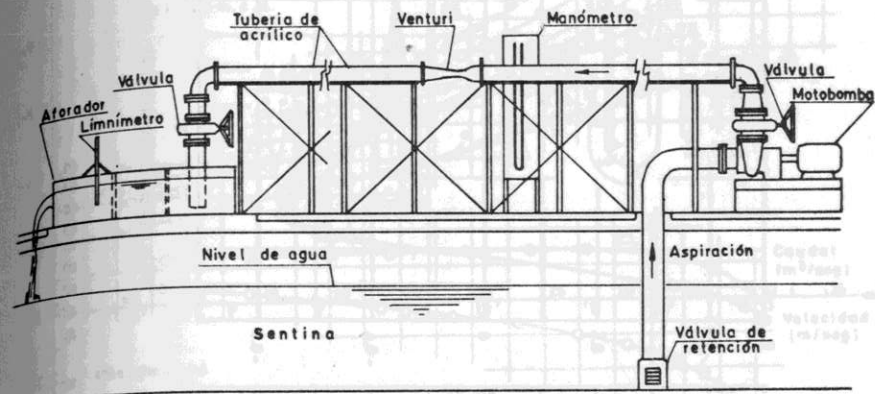


FIG. 1-a

INSTALACION EXPERIMENTAL

Detalle venturi y probeta utilizada

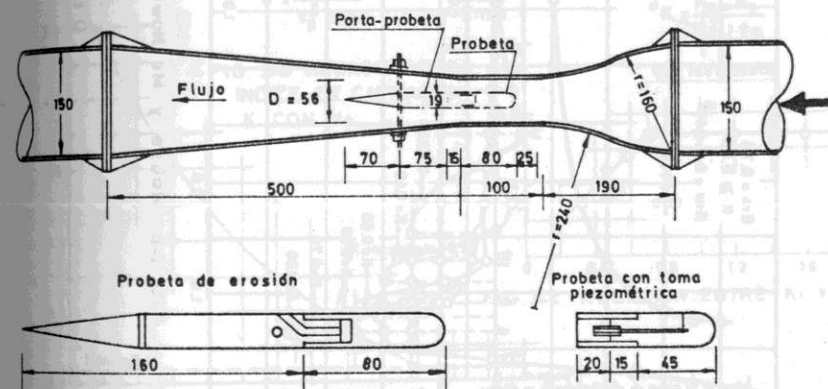


FIG. 1-b

VENTURI Y PROBETA

EXPERIMENTALES OBTENIDOS POR REHNFELDT, CRM 1580



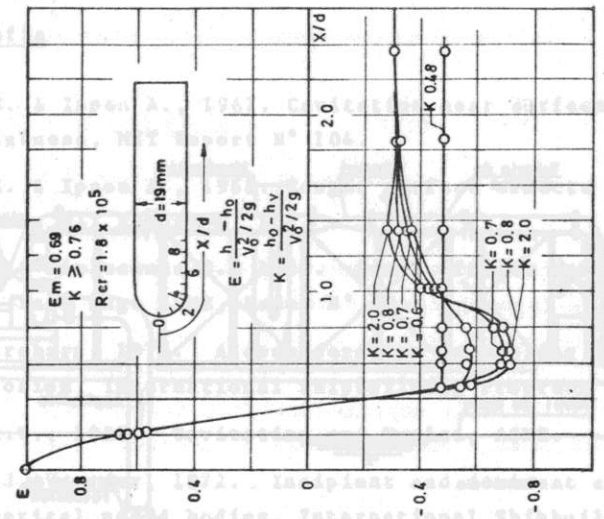


Fig. 2-b J.Rehnfeldt CRH-1980

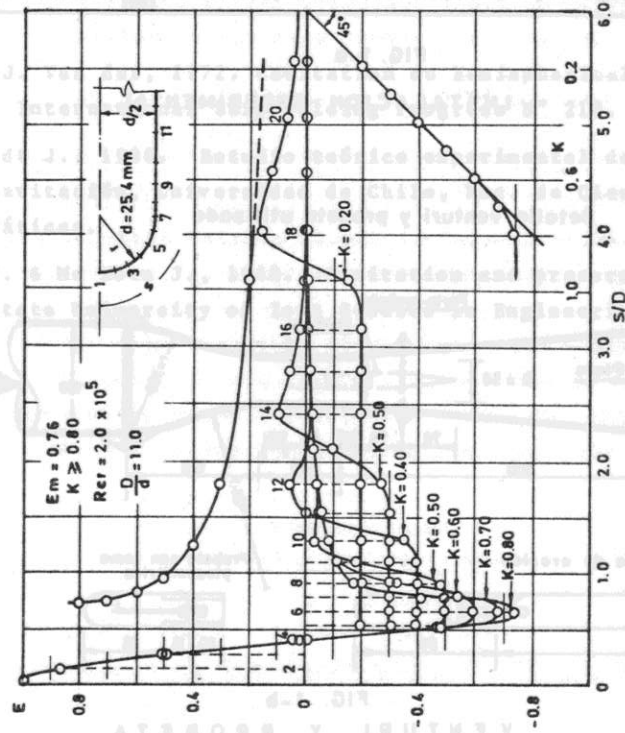


FIG. 2-a Rouse y Mc Nown 1948

FIG. 2 DISTRIBUCION DE PRESIONES

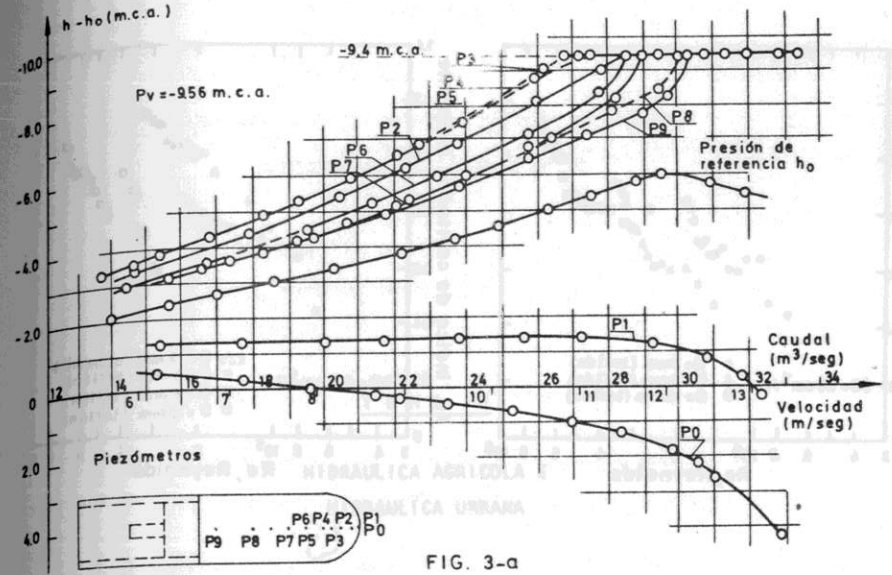


FIG. 3-a PRESIONES RELATIVAS SOBRE LA PROBETA

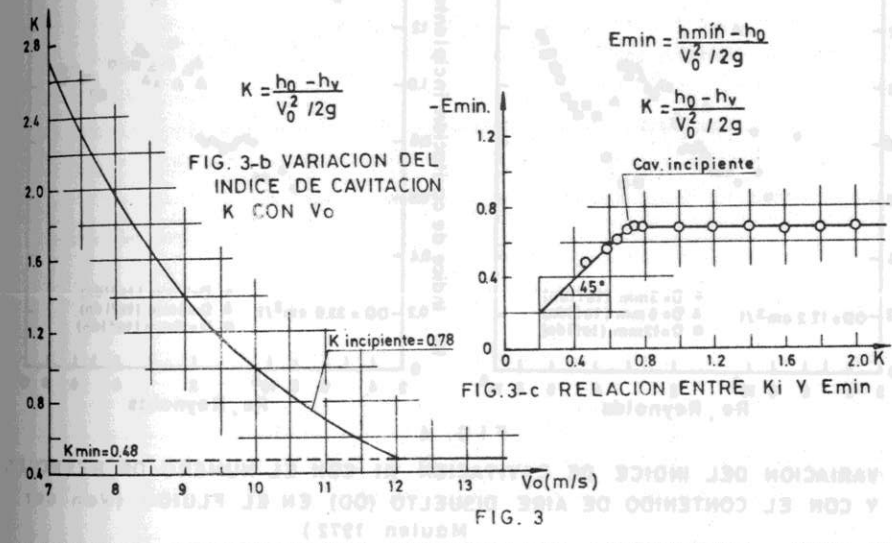


FIG. 3-b VARIACION DEL INDICE DE CAVITACION K CON Vo

FIG.3-c RELACION ENTRE Ki Y Emin

FIG. 3

RESULTADOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS POR J.REHNfeldt. CRH 1980

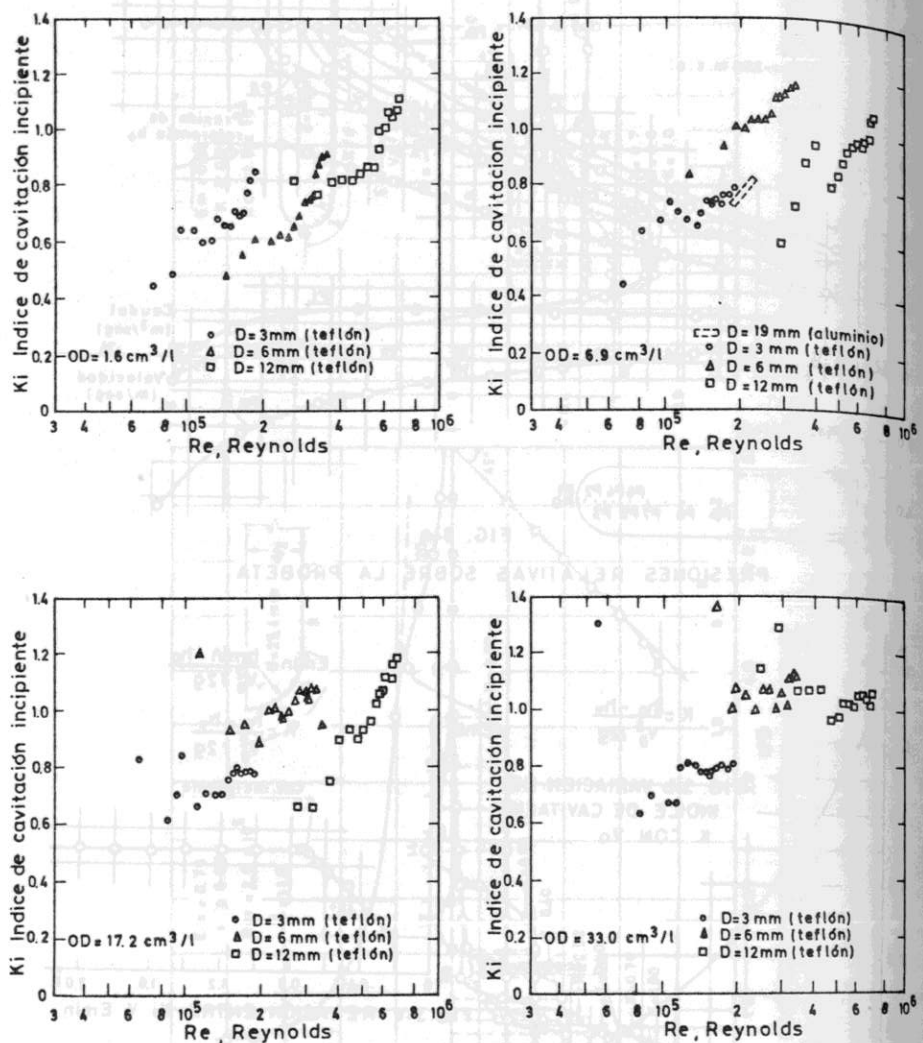


FIG. 4

VARIACION DEL INDICE DE CAVITACION  $K_i$  CON EL NUMERO DE REYNOLDS Y CON EL CONTENIDO DE AIRE DISUELTO (OD) EN EL FLUIDO (Van der Maulen 1972)

ALCANTARILLADO DE AGUAS LUVIAS DE SANTIAGO:

ANALISIS DE LA CURVA 7 EN 10

Aguarín Martínez L. (1)\*  
Rodrigo Caro C. (1)\*\*

TEMA 2

HIDRAULICA AGRICOLA E  
HIDRAULICA URBANA

Historicamente, el diseño de colectores de aguas lluvias en Chile ha estado basado en una selección entre la intensidad de la precipitación y el tiempo de concentración del área tributaria, para cada Curva de Seguridad 7 veces en 10 años. En este artículo se comparan los fundamentos de esta curva con el objeto de precisar su aplicación. Se concluye que el fundamento teórico es correcto, pero se persigue que existe una seguridad constante a lo largo de la vida que implica que las intensidades medias máximas de diseño para diferentes duraciones de la lluvia deben tener igual probabilidad de ocurrencia. Se propone, en estricto rigor, el campo de aplicación de la Curva 7 en 10 años circunscrito a la zona central de Santiago y se propone abundantemente la aplicación de "seguridad" por la de probabilidad de excedencia o retorno.

Ingeniero de CADE-IDEPE, Ingeniería y Desarrollo de Proyectos Ltda.

Los autores expresan su agradecimiento a los ingenieros de IDEPE, Sr. Oscar Botelli, Jefe Depto. Estudios, y Sr. Vittorio Curotto, por permitir la publicación de este artículo que es parte del estudio del Plan Maestro del Alcantarillado de Santiago, encargado por IDEPE al Consorcio Botelli y CADE-IDEPE.