

TERCER COLOQUIO NACIONAL  
SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA

MEDICION EN LABORATORIO DE LA  
EROSION POR CAVITACION

ROBERTO MUÑOZ GOMA (\*) y JORGE VILLAVICENCIO VALDIVIA (\*\*)

RESUMEN

En este trabajo se presenta un estudio experimental del efecto de la cavitación en probetas cilíndricas con ca<sup>z</sup>beza semiesférica y de diferentes materiales. Para producir cavi<sup>t</sup>ación se usó un tubo Venturi, lográndose velocidades de 18 m /s, en la zona de la garganta.

Las experiencias muestran que es posible medir el daño producido por cavitación para tiempos de exposición relati<sup>v</sup>vamente cortos. Los resultados obtenidos indican que la erosión depende de las propiedades físicas de cada material, siendo el or<sup>d</sup>en de resistencia decreciente, el siguiente : acero inoxidable , aluminio, bronce y hierro fundido.

(\*) Ingeniero Civil, Sc.D., MIT, Investigador, Profesor, Departamento de Tecnología Química, Universidad de Chile.

(\*\*) Ingeniero Civil, Investigador, Profesor, Centro de Recursos Hidráulicos, Departamento de Obras Civiles, Universidad de Chile.



## 1.- INTRODUCCION

Se denomina cavitación al fenómeno de aparición de burbujas de vapor en zonas de un flujo líquido en que se alcanza la presión de vaporización; al subir nuevamente la presión, se produce el colapso de estas burbujas. La cavitación va acompañada de ruido, vibraciones y daño erosivo en las paredes. La explicación generalmente aceptada para el daño por erosión supone que el colapso de las burbujas cerca de una pared estática o en movimiento rotatorio ocurre en forma asimétrica, generándose un microchorro que hace impacto en la pared; el fenómeno puede entonces considerarse como análogo al daño causado por el impacto de un chorro intermitente sobre un sólido, existiendo sólo diferencias de frecuencia e intensidad ( Canavelis, 1968 ).

La forma obvia de evitar esta erosión es manteniendo la presión por encima del valor crítico de vaporización; sin embargo, esto no siempre conduce a un diseño eficiente, de modo que es frecuente la existencia de cavitación y el consiguiente daño material. Surge entonces la necesidad de predecir la magnitud de la erosión en función de las condiciones hidrodinámicas y de la resistencia del material sólido.

Con respecto a la primera dependencia, es decir, de las condiciones hidrodinámicas, ordinariamente se supone que éstas quedan caracterizadas por el índice de cavitación  $\sigma$  definido por :

$$\sigma = \frac{p - p_v}{\frac{1}{2} \rho v^2} \dots (1)$$

en que  $p$  es una presión de referencia,  $p_v$  es la presión de vapor del fluido a la temperatura del flujo,  $\rho$  es la densidad y  $v$  es una velocidad de referencia. El punto crítico de comienzo de la cavitación se designa por el índice de cavitación incipiente  $\sigma_i$ , que corresponde al caso en que se parte de una condición no cavitante y se aumenta gradualmente la velocidad hasta que se observan los primeros indicios de cavitación ; o bien, por el índice de cavitación desinente  $\sigma_d$ , en que la condición límite se alcanza partiendo de un estado cavitante y disminuyendo gradualmente la velocidad. Estos dos índices no son iguales, ya que se observa un ciclo de histeresis, lo que revela que el fenómeno no está únicamente determinado por el índice de cavitación.

Holl y Wislicenus (1961) han examinado los efectos de escala que afectan al índice de cavitación; su análisis se limita a la cavitación incipiente, dada la complejidad de una caracterización más extensa del fenómeno. Sus conclusiones son que el índice de cavitación incipiente debe crecer con el número de Reynolds, con el número de Weber y con la rugosidad relativa, todo lo cual está confirmado por sus propias experiencias y, posteriormente, por las de van der Meulen ( 1972i, 1972ii ). Un aspecto importante se refiere a la necesidad de que existan núcleos gaseosos en el seno del líquido para que en torno a ellos se formen las burbujas de vapor; de no existir estos núcleos, el líquido



puede resistir considerables presiones negativas sin vaporización. Holl y Wislicenus estiman que el número de núcleos ( o sea, el contenido de gas en el líquido ) no tendría mayor significación en el caso de cavitación parietal porque la propia rugosidad de la pared alberga núcleos de gas adherido en cantidad suficiente para permitir la cavitación. Sin embargo, van der Meulen (1972i) ha hecho determinaciones de la cavitación incipiente variando en forma controlada el contenido de aire en el agua y ha encontrado un efecto pequeño pero definido sobre  $\sigma_i$  y  $\sigma_d$ . Con el fin de dilucidar el punto, van der Meulen (1972ii) repitió sus experiencias con probetas idénticas a las anteriores pero recubiertas de un material hidrofóbico ( teflon ), que asegura una mayor presencia de núcleos de aire en las hendiduras de la superficie que no pueden ser humedecidas; las probetas con teflon mostraron valores de  $\sigma_i$  y  $\sigma_d$  considerablemente mayores, demostrando el rol activo de los núcleos en la aparición de la cavitación.

Lo anterior es un resumen muy sucinto de los efectos de escala que pueden modificar el criterio teórico de que la magnitud de la cavitación se mide por el índice de cavitación. El segundo aspecto que debe considerarse es la dependencia de la erosión respecto a la resistencia del sólido. Si se mide la erosión por el volumen ( o peso ) de material desprendido en función del tiempo de exposición a condiciones cavitantes, parece haber consenso en reconocer la existencia de cuatro períodos ( Kato, 1975ii ; Rao, Rao y Rao, 1977 ) : 1) un período de incubación, en el que no se advierte pérdida de peso ; 2) período con tasa

de erosión creciente; 3) período de tasa de erosión máxima; 4) período de tasa de erosión decreciente. Rao, Rao y Rao concluyen empíricamente que el tiempo de inicio de la etapa 3 se puede evaluar a partir de la duración  $t_c$  de la etapa de incubación por :

$$t_m = 4t_c^{1,15} \text{ ( tiempos en horas ) } \dots (2)$$

Por otra parte, establecen una gama de correlaciones entre el tiempo de incubación  $t_c$  y diversas propiedades mecánicas para varios metales y aleaciones, todo lo cual permitiría eventualmente predecir la magnitud de la erosión.

El enfoque de Kato ( 1975i; 1975ii ) es diferente, pues hace notar que, si bien no hay pérdida de peso en el período de incubación, sí existe notoria deformación de la superficie del sólido, la que se puede cuantificar por el incremento de la rugosidad. Kato encuentra empíricamente que la tasa temporal de incremento de la rugosidad es proporcional a la 6ª potencia de la velocidad e inversamente proporcional a una medida de la resistencia mecánica del material. Esta correlación permite extrapolar una predicción de la erosión esperada en el prototipo para largos períodos de tiempo a partir de una breve experiencia de laboratorio en que se mide el incremento de rugosidad experimentado por un material blando ( aluminio ).

Con estos antecedentes generales, se abordó el estudio experimental, cuyos objetivos se limitaron en esta primera etapa a los siguientes :



1) Construcción de un circuito para la producción de condiciones cavitantes en un tubo venturi.

2) Determinación del índice de cavitación incipiente para diferentes probetas y su comparación con datos de la literatura.

3) Medida de la pérdida de peso en función del tiempo para probetas idénticas de diferentes materiales sometidas a idénticas condiciones hidrodinámicas.

## 2.- EQUIPO EXPERIMENTAL

La instalación experimental fue hecha en el Laboratorio de Hidráulica " Francisco Javier Domínguez " del Centro de Recursos Hidráulicos de la Universidad de Chile y se describe esquemáticamente en la Figura N°1. Consta de un grupo moto-bomba de 52 HP que impulsa un flujo máximo de 60 l/seg de agua a través de un tubo de acrílico transparente de 15 cm de diámetro y 5 m de largo, seguido de un tubo venturi de 1 m de largo y diámetro mínimo 7 cm. Posteriormente, un segundo tramo de tubería de 15 cm de diámetro y 4 m de largo termina en una válvula de regulación y vertedero aforador. La Figura N°2 detalla el diseño del venturi y la forma de sostener las probetas de ensaye. Se fabricaron dos tipos de probetas, denominadas A ( cabeza semiesférica ) y B ( cónica ) en la Figura N°3 a, en los siguientes materiales : aluminio, bronce-manganeso, fierro fundido, acero inoxidable.

Los detalles de calibración y cálculos para definir el diámetro óptimo de la garganta se dan en la Memoria de Ho dar y López (1977).

Las experiencias se refirieron a los dos aspectos antes señalados : 1) determinación del índice de cavitación incipiente  $\sigma_i$  por observación visual de la aparición de burbujas en la superficie de la probeta; 2) determinación de la pérdida en peso de diferentes probetas para tiempos de exposición de hasta 15 horas. Las pesadas se hicieron en una balanza analítica electrónica Sartorius de 0,1 mg de precisión.

## 3.- OBSERVACIONES Y RESULTADOS

El trabajo experimental que aquí se presenta constituyó una etapa preliminar destinada principalmente a asegurar un funcionamiento satisfactorio del equipo y a detectar los efectos que serán materia de un estudio más acucioso en etapas posteriores.

### 3.1. Índice de Cavitación Incipiente

Las probetas de cabeza semiesférica ( tipo A ) han sido objeto de un prolijo estudio por van der Meulen ( 1972i, 1972ii ); por lo tanto, se estimó que una comparación de los valores medidos con los publicados por este investigador daría una adecuada comprobación del buen funcionamiento del equipo y de la técnica de medición. La Figura N°4a muestra los resultados de van der Meulen para diversos diámetros de probetas y para diferen



tes niveles de presión absoluta en el túnel. El índice de cavitación está definido en relación a la presión en la garganta y a la velocidad media en términos de la sección efectiva de la garganta ( esto es, rebajando el área obstruida por la probeta ). En la misma Figura N°4a se indican las mediciones hechas para tres probetas idénticas tipo A, hechas de fierro fundido, aluminio y bronce. La concordancia de las medidas puede estimarse satisfactoria.

La variación  $\sigma_i$  observada en los tres puntos de esta investigación puede atribuirse simplemente a imprecisión de la medida, cosa muy posible dado que hay una evaluación muy subjetiva del instante en que la cavitación es " incipiente "; o podría sugerir un efecto de la diferente rugosidad de los distintos materiales, según proponen Holl y Wislicenus. Hacen falta más mediciones para esclarecer el punto; conviene además hacer las medidas para  $\sigma_d$  antes que para  $\sigma_i$  pues, según indican diversos investigadores,  $\sigma_d$  es el valor más reproducible.

Para las probetas tipo B no se observó ningún indicio de cavitación, aún cuando se llegó al límite de la capacidad del equipo. Para inducir una cavitación más temprana, se hicieron 4 estrías transversales de 1 mm de profundidad sin lograr resultado positivo, por lo cual estas probetas se descartaron de los ensayos.

### 3.2. Erosión por Cavitación

Los primeros ensayos con probetas tipo A en las condiciones más severas de cavitación que permitía el equipo

(  $\sigma = 0,20$  ) indicaron que se necesitarían períodos de muchos días para lograr una erosión cuantificable como pérdida de peso. Con el fin de lograr resultados más rápidos, se modificó el diseño con un rebaje después de la cabeza ( Figura N°3b ). Un rebaje de 1 mm en una probeta de bronce llevó  $\sigma_i$  al valor 0,61 comparado con 0,49 obtenido originalmente. La Figura N°4a indica que esta variación no es significativa, pudiendo incluso atribuirse a error experimental. Se optó entonces por un rebaje de 2 mm de profundidad, lo que produjo valores de  $\sigma_i$  sobre 1,4. Con este diseño se ensayó una probeta de cada material durante 15 horas, con pesadas intermedias cada 5 horas. La Tabla N°1 y la Figura N°4b dan los resultados de estas mediciones.

Probablemente los datos son insuficientes para juzgar en qué etapa del proceso se encontraba cada uno de los materiales; habría sido posible, por supuesto, realizar más pesadas intermedias, pero no se habría obtenido mejor información dado que la pérdida en peso ya es muy pequeña para tiempos de 5 horas, casi en el límite de la precisión instrumental.

El orden de mayor resistencia a la erosión exhibido por los diversos materiales coincide en general con los datos de la literatura, excepto en la posición relativa del bronce y del aluminio, en que hay información contradictoria, debida posiblemente a la gran variedad de tipos de bronce.



T A B L A N°1

Tipo Probeta	Tiempo Hrs	$\sigma_i$ Índice de cavitación incip.	$Re_i \times 10^5$	$\sigma_t$ Índice de tra bajo	$Re_t \times 10^5$	Pérdida Parcial mgs	Pérdida Acumula da mgs
Fierro fundido	5	1,37	1,89	0,22	3,46	14,4	14,4
	10	1,37	1,89	0,21	3,48	10,7	25,1
	15	1,69	1,79	0,24	3,49	9,0	34,1
Aluminio	5	1,65	1,86	0,21	3,47	2,1	2,1
	10	1,65	1,86	0,21	3,48	1,5	3,6
	15	1,51	1,89	0,23	3,46	3,0	6,6
Bronce	5	1,45	1,89	0,23	3,46	2,3	2,3
	10	1,44	1,89	0,23	3,47	3,7	6,0
	15	1,43	1,89	0,24	3,46	4,1	10,1
Acero Inoxidable	5	1,46	1,88	0,25	3,47	0,6	0,6
	10	1,46	1,88	0,25	3,46	1,0	1,6
	15	1,43	1,89	0,26	3,47	2,6	4,2

4.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En resumen, se ha logrado montar un equipo capaz de producir condiciones cavitantes en forma controlada y se han realizado mediciones preliminares del índice de cavitación incipiente y de la erosión causada por este fenómeno que presentan una concordancia satisfactoria con los datos de la literatura.

Es conveniente considerar los siguientes factores para la próxima etapa de trabajo :

- Medir tanto el índice de cavitación incipiente como el desinente, con especial atención de la reproducibilidad de los resultados.
- Extender la duración de los ensayos de erosión, así como variar la magnitud de la cavitación.
- Realizar medidas directas de las propiedades de resistencia mecánica de los materiales ensayados.
- Intentar la medida directa de la rugosidad de las probetas, antes y durante los ensayos o, si esto no es posible, al menos variar cualitativamente la rugosidad inicial y examinar la influencia de este factor en las medidas a) y b).



## REFERENCIAS

R. Canavelis, Jet Impact and Cavitation Damage, Trans. A.S.M.E., J. of Basic Eng., 90, Sept. 1968, 355-366.

A. Hodar y F. López, Diseño y Construcción de un Sistema para Obtener Cavitación y Efectuar Estudios Experimentales, Examen de Grado para Optar al Título de Ingeniero Naval Mecánico, 1977, Escuela de Ingeniería Naval, Armada de Chile.

J.W. Holl y G.F. Wislicenus, Scale Effects on Cavitation, Trans. A.S.M.E., J. of Basic Eng., Sept. 1961, 83, 381-395.

H. Kato, A New Cavitation Erosion Test Method and its Application to a Ducted Propeller, Int. Shipbuilding Progress, 22, Sept. 1975 (i)

H. Kato, A Consideration on Scaling Laws of Cavitation Erosion, Int. Shipbuilding Progress, 22, Sept. 1975 (ii).

B.C.S. Rao, N.S.L. Rao y P.V. Rao, The Role of Incubation Period in Cavitation Erosion, Int. Water Power and Dam Constr. 29, 3, Marzo 1977, 22-27.

J.H.J. van der Meulen, Incipient and Desinent Cavitation on Hemispherical Nosed Bodies, Int. Shipbuilding Progress, 19, 209, Enero 1972, 21-32 (i).

J.H.J. van der Meulen, Cavitation on Hemispherical Nosed Teflon Bodies, Int. Shipbuilding Progress, 19, 218, Oct. 1972, 333-341 (ii).

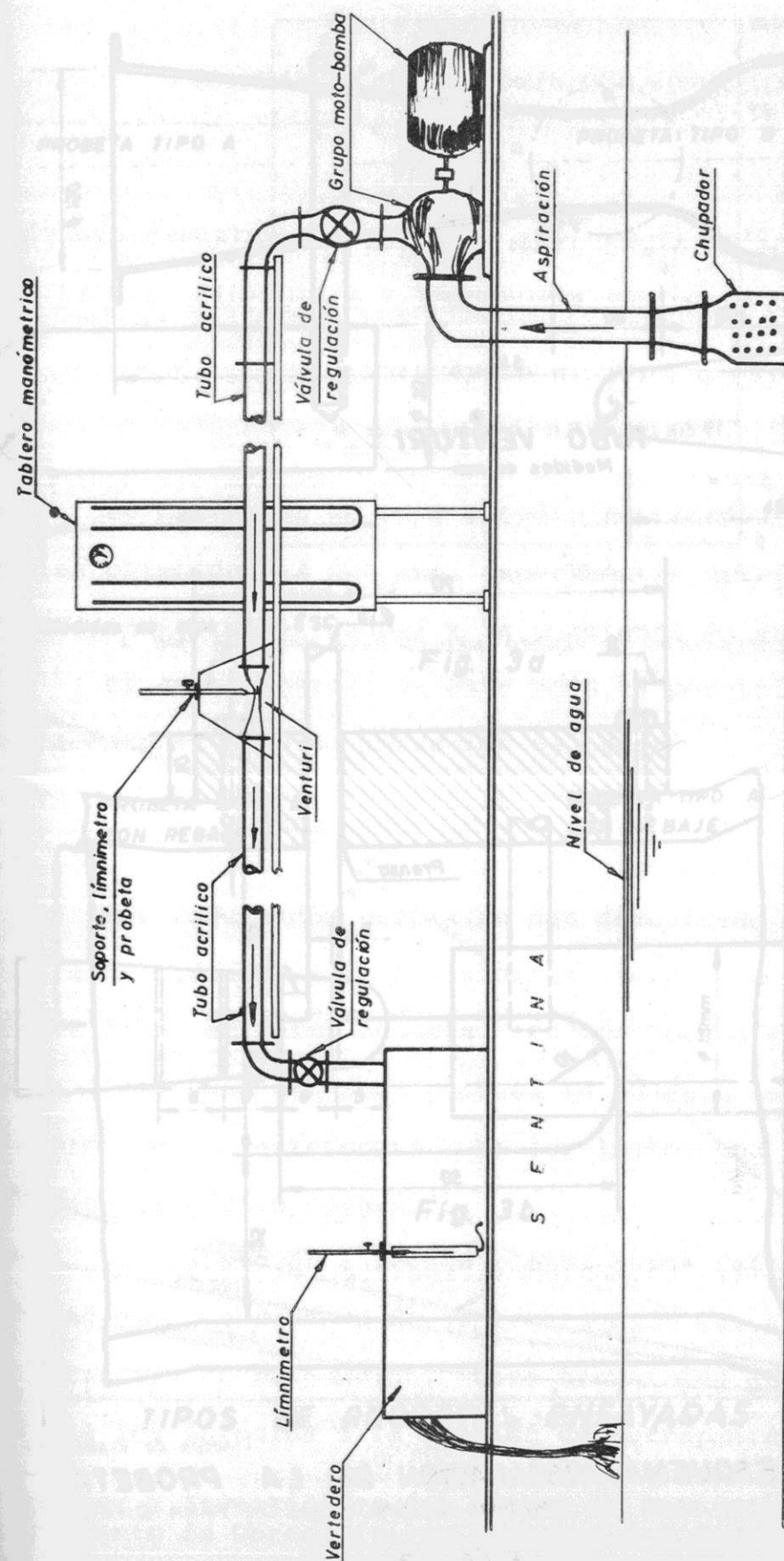
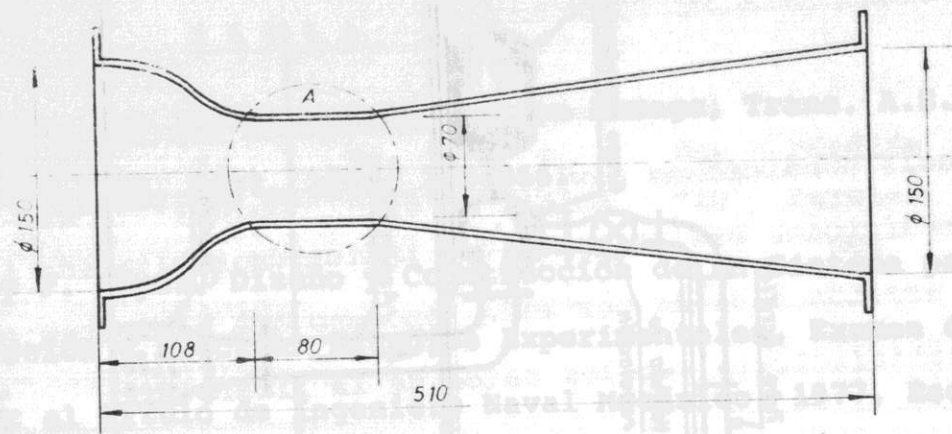
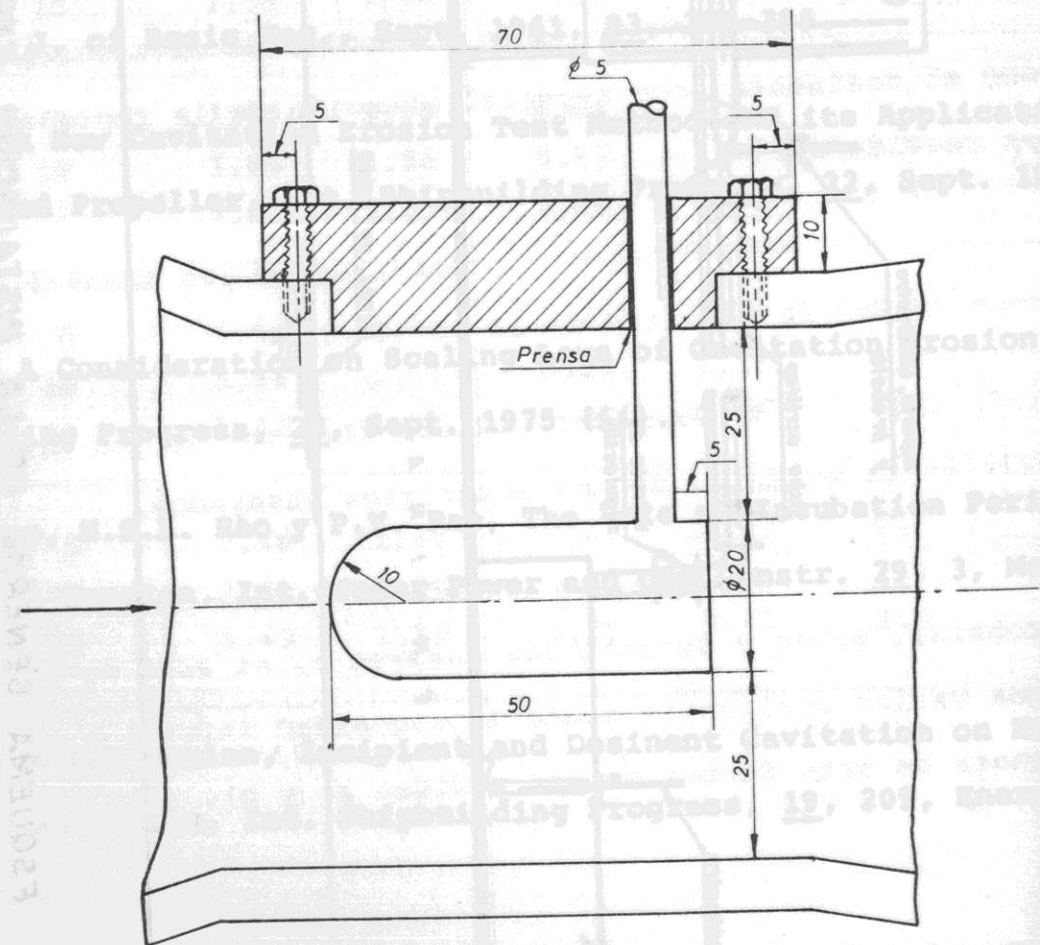


FIG. 1 ESQUEMA GENERAL DE LA INSTALACION EXPERIMENTAL



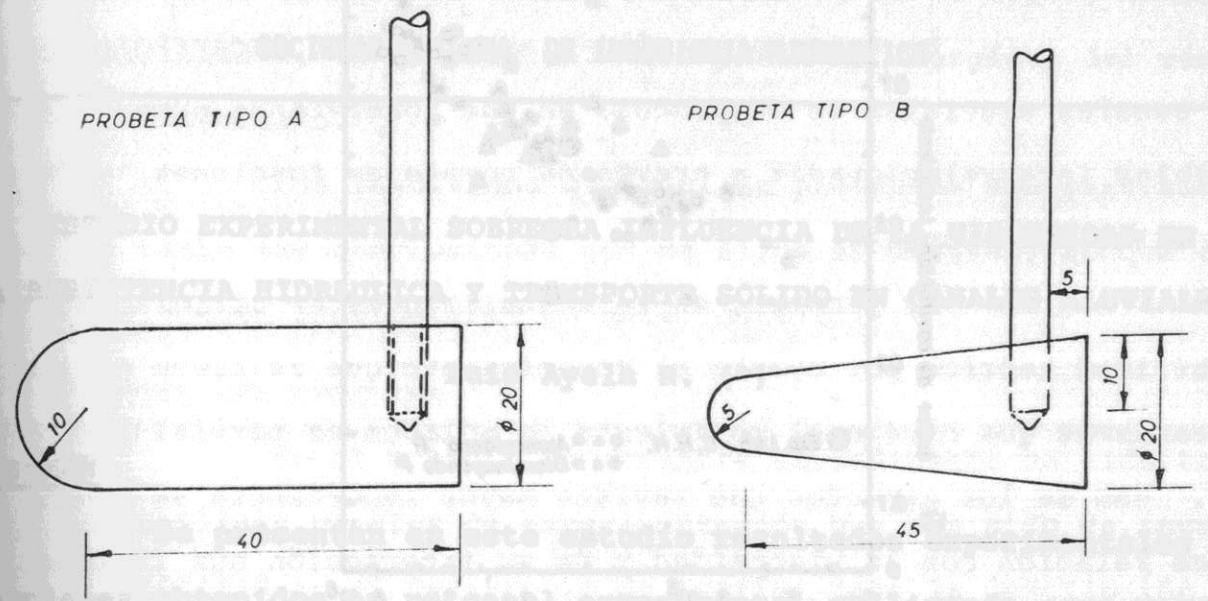


**TUBO VENTURI**  
Medidas en mm.



**A** ESQUEMA INSTALACION DE LA PROBETA  
Medidas en mm.

FIG. 2



Medidas en mm. ESC. 1:1

Fig. 3a

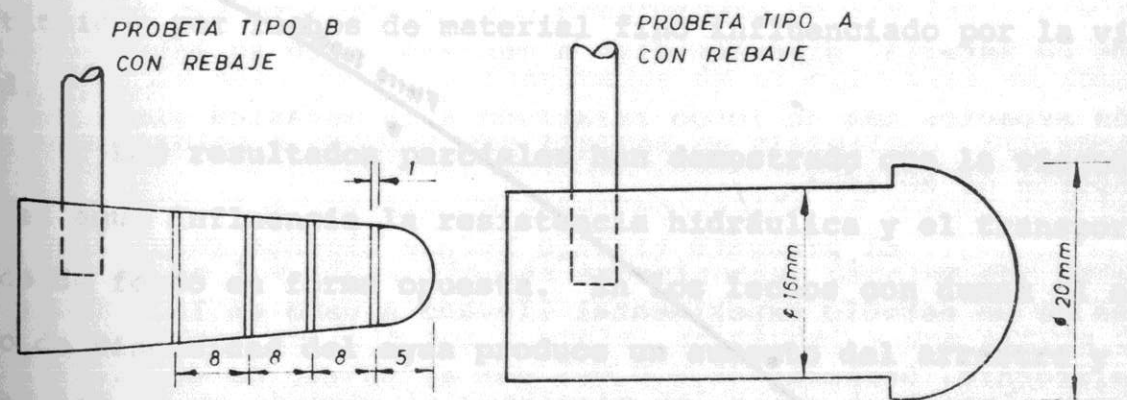


Fig. 3b

TIPOS DE PROBETAS ENSAYADAS



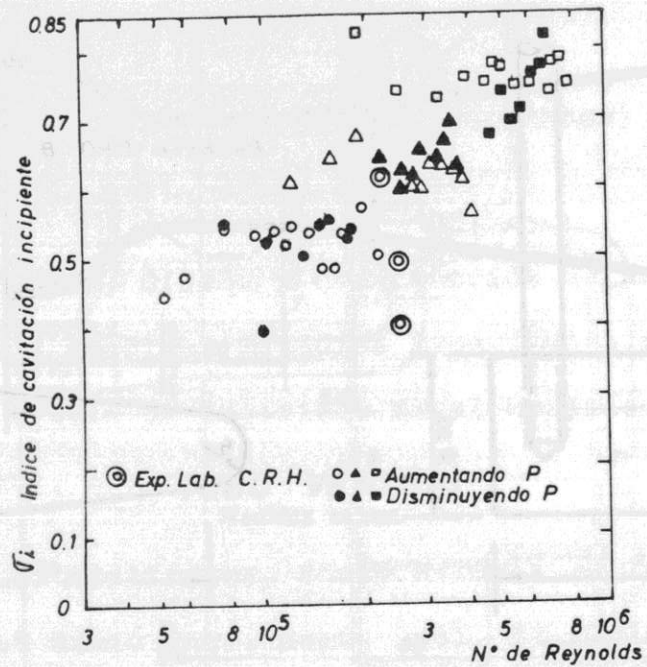


FIG. 4-a EXPERIENCIAS DE VANDER MEULEN PARA PROBETAS TIPO A

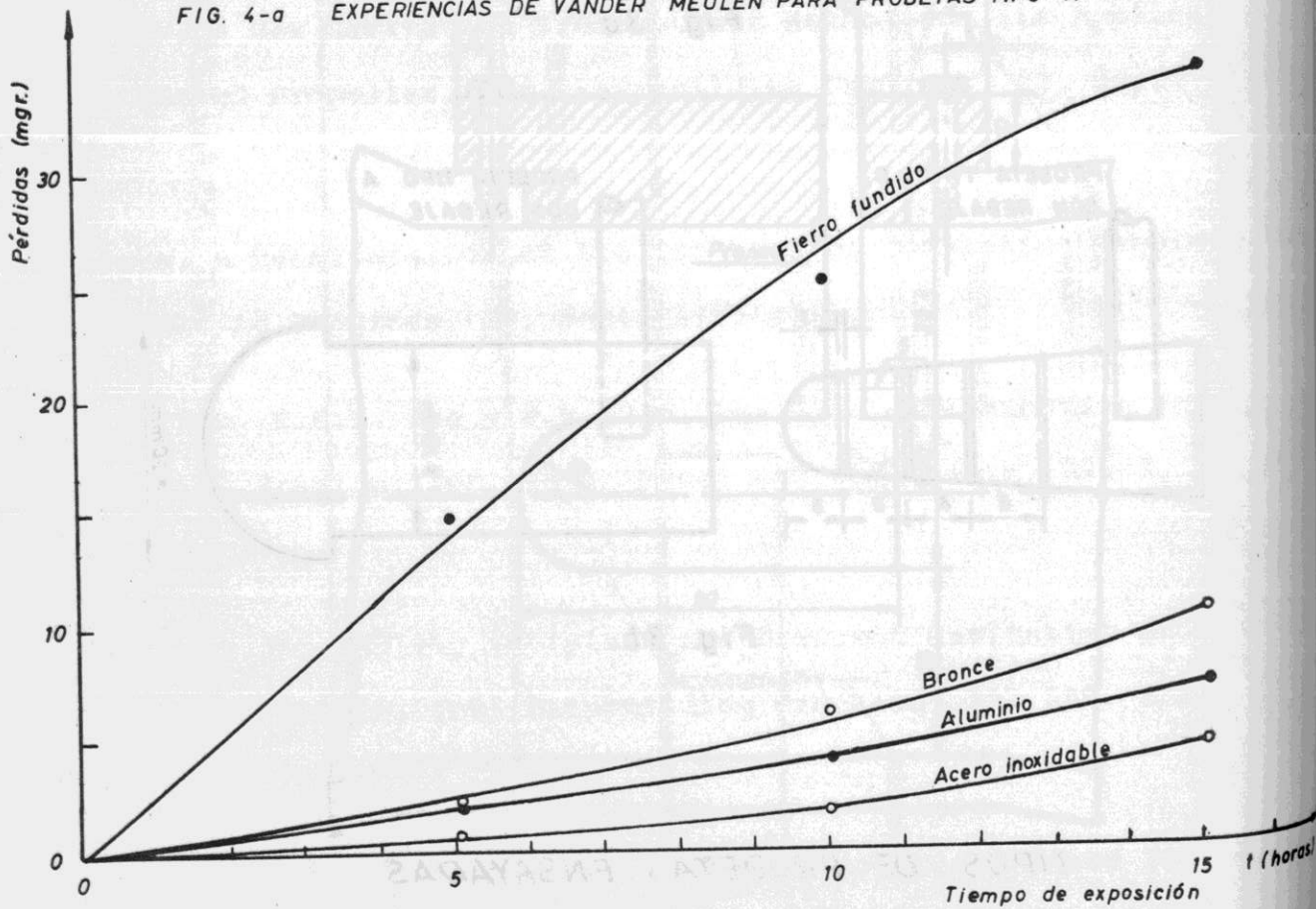


FIG. 4-b. PERDIDAS DE PESO POR EFECTO DE LA CAVITACION PARA DIFERENTES MATERIAL

FIG. ENSAYADOS

ESTUDIO EXPERIMENTAL SOBRE LA INFLUENCIA DE LA VISCOSIDAD EN LA RESISTENCIA HIDRAULICA Y TRANSPORTE SOLIDO EN CANALES ALUVIALES

Luis Ayala R. (\*)

RESUMEN

Se presentan en este estudio resultados experimentales parciales obtenidos en un canal experimental utilizando como variables independientes el caudal y la pendiente de energía.

El canal operado de este modo ha permitido simular satisfactoriamente el modo de operación de cauces aluviales naturales constituidos por lechos de material fino influenciado por la viscosidad.

Los resultados parciales han demostrado que la viscosidad del agua influencia la resistencia hidráulica y el transporte sólido de fondo en forma opuesta. En los lechos con dunas el aumento de viscosidad del agua produce un aumento del arrastre y una disminución de la resistencia. En los lechos con rizos la viscosidad produce el efecto contrario.

La transición a lechos planos queda influenciada por la viscosidad pero no depende de la interacción del arrastre de fondo con el arrastre en suspensión. Esta transición queda definida mediante una ley parecida a la función de entrapamiento de Shields.

(\*) Profesor e Investigador del Centro de Recursos Hidráulicos, Departamento de Obras Civiles, Universidad de Chile.