

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA
V CONGRESO NACIONAL

SOCAVACION ALREDEDOR DE PILAS CIRCULARES
EN LECHOS GRANULARES GRUESOS

Luis H. Ayala R. (1)

José M. Martín Y. (2)

RESUMEN

Se presentan en este trabajo resultados obtenidos en una investigación experimental y de terreno sobre socavación local alrededor de pilas cilíndricas circulares en lechos de granulometría gruesa, los cuales complementan y extienden los resultados, análisis y conclusiones de un estudio anterior (IV Coloquio Nacional de Ingeniería Hidráulica).

-
- (1) Ingeniero Civil, Profesor e Investigador del Centro de Recursos Hidráulicos, Universidad de Chile.
(2) Ingeniero Civil, actualmente en IEC.

1. INTRODUCCION

A mediados de 1978 el Centro de Recursos Hidráulicos de la Universidad de Chile inició un programa de investigación sobre fenómenos de socavación local alrededor de pilas en lechos gruesos. Los primeros resultados de este programa fueron dados a conocer en el IV Coloquio Nacional de Hidráulica (Ayala et al., 1979). Ellos demostraron que el comportamiento del fenómeno en lechos de granulometría gruesa queda condicionado básicamente por los mismos parámetros que intervienen en lechos finos. Sin embargo, la profundidad de socavación en lechos gruesos resulta en general sustancialmente inferior a la de lechos finos sometidos a las mismas condiciones hidráulicas, y geometría y tamaño de pila. Ello indica que las relaciones empíricas derivadas para lechos finos y utilizadas en diseño, no son en general aplicables a lechos gruesos porque llevan a una sobrevaluación de la profundidad de socavación.

En el presente trabajo se dan a conocer antecedentes adicionales sobre el fenómeno obtenidos en terreno y de experiencias efectuadas con 3 sedimentos y 3 diámetros de pila, todo lo cual permite extender considerablemente los rangos experimentales del estudio anterior y abordar otros aspectos del fenómeno tales como, socavación incipiente y extensión del bulbo de socavación.

2. ANTECEDENTES GENERALES DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL

2.1 Instalación Experimental

Las experiencias se desarrollaron en la instalación experimental cuyos detalles se encuentran descritos en la publicación CRH 80-21-I del Centro de Recursos Hidráulicos de la Universidad de Chile (Ayala et al., 1980).

Esta instalación consiste básicamente en un canal de experimentación de 18 m de largo y 0.80 m de ancho, el cual

dispone de una zona de experimentación de 3 m de largo, con una pared vidriada y fondo móvil, ubicada inmediatamente aguas abajo de una compuerta de abertura ajustable.

2.2 Condiciones Experimentales.

Para el estudio se utilizaron las siguientes condiciones experimentales :

- a) Sedimentos uniformes de cantos redondeados con las características granulométricas indicadas en la Fig. 1 y 2,6 Ton/m³ de peso específico.
- b) Socavación en equilibrio estático, sin transporte sólido generalizado.
- c) Condiciones hidráulicas caracterizadas por números de Froude y alturas o velocidades del escurrimiento no perturbado, limitadas por las condiciones de transporte incipiente del sedimento adoptado y por la instalación experimental usada.
- d) Diámetro de las pilas definidos de acuerdo a los rangos adimensionales típicamente observados en prototipo, considerando prefijados los rangos de sedimento y alturas de escurrimiento.

La Tabla 1 resumen el rango experimental de los parámetros utilizados así como algunos valores típicos de los parámetros experimentales y parámetros de prototipo.

3. PRESENTACION Y ANALISIS DE LOS RESULTADOS

3.1 Socavación Máxima

Para fines del presente estudio, basado en los antecedentes bibliográficos y experimentales recopilados, se ha adoptado la siguiente representación adimensional para describir el fenómeno :

Caract. Mat. de Ensayo			
	I	II	III
D ₂₅ mm	4.8	9.8	25.0
D ₅₀ mm	5.1	10.0	25.4
D ₆₅ mm	5.4	10.2	25.6
D _G mm	5.2	10.7	24.7
σ	1.2	1.3	1.2

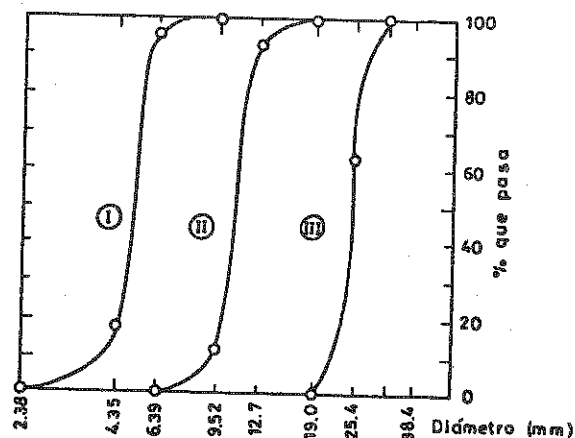


FIG. 1 CURVAS GRANULOMETRICAS DE LOS SEDIMENTOS EMPLEADOS

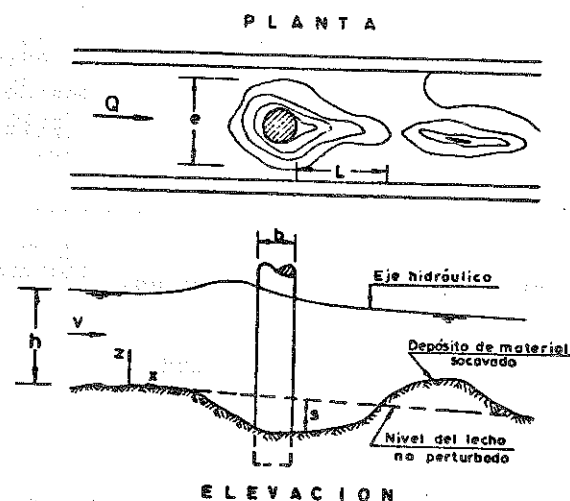


FIG. 2 ESQUEMA DE DEFINICION DE LAS VARIABLES

$$\frac{s}{h} = \gamma (F^2, \frac{h}{D}, K) \quad (1)$$

donde s es la socavación máxima, h la altura de agua del escurrimiento no perturbado, F el número de Froude, D el diámetro del sedimento y K la razón b/D , diámetro de la pila - diámetro del sedimento (Ver Fig. 2).

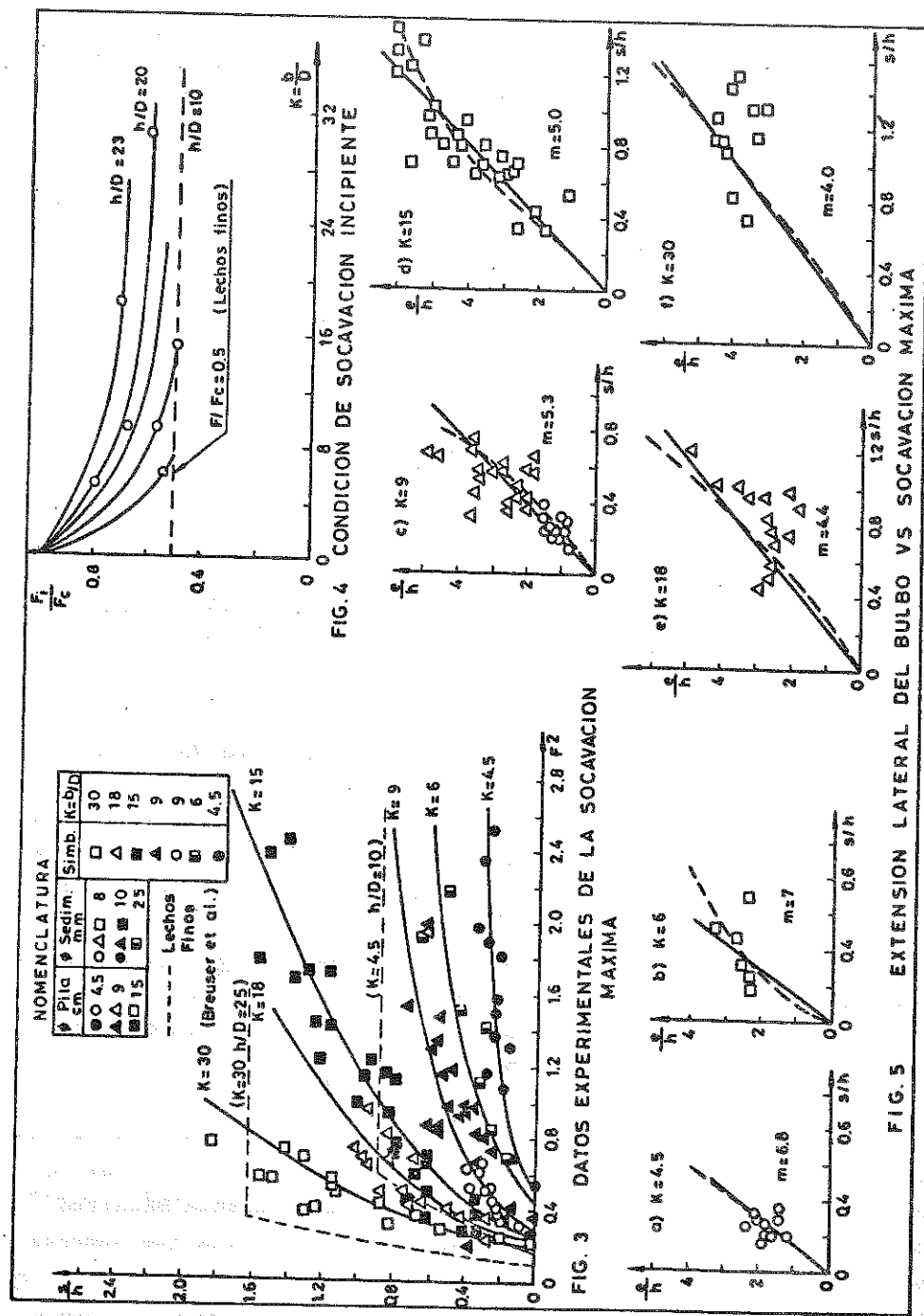
TAELA 1 RANGOS EXPERIMENTALES

Parámetro	Estudio Exp.	
Altura de Agua (m) h	0.02 a 0.17	
Caudal (m ³ /s) Q	0.020 a 0.120	
Diám. de Sed. (mm) D	5-10-25	
Diám. de la Pila (cm) b	4.5- 9-15	Prototipo*
Nº Eroude F	0.5 a 2.0	0.4 a 1.3
b/D	1.8 a 30	8 a 13
h/D	1.0 a 33	3.5 a 16.5
h/b	0.2 a 3.8	0.27 a 2.1

(*) Obtenido del río Mapocho en Puentes Pedro de Valdivia y Américo Vespucio.

La Fig. 3 resume gráficamente los resultados obtenidos en la forma de la Ec. (1). De esta figura se aprecia que la correlación entre los parámetros $\frac{s}{h}$ y F^2 para $K = cte$ es satisfactoria, siendo aparentemente despreciable la influencia de h/D en el fenómeno. Se aprecia asimismo que las mayores dispersiones experimentales ocurren para valores altos de K , lo cual es explicable por la dificultad de operación del sistema y medición de las variables en el rango de velocidades altas.

Es interesante destacar dos características de las relaciones mostradas. En primer lugar, todas las relaciones comienzan con una socavación nula, cuya correspondiente magnitud del número de Froude tiende a disminuir en la medida que aumenta el parámetro K . Esta condición de "socavación incipiente", es importante en la práctica pues permite definir un límite de tamaño



de sedimento "resistente a la socavación" y su cuantificación da una idea de las características de las protecciones que se requerirían para una pila sometida a un flujo de propiedades dadas.

En segundo lugar, las relaciones se encuentran definidas para distintos rangos de F , lo cual es una consecuencia del hecho de haber limitado la experimentación a condiciones de equilibrio "estático", sin transporte generalizado, para el cual se cumple $v/v_c < 1$.

El análisis de la Fig. 3 permite extraer las siguientes conclusiones que tienen implicancia directa en el diseño de la socavación en pilas: a) las tendencias de los puntos experimentales indican que para un valor constante de K , el parámetro s/h depende en forma directa del número de Froude, y es independiente del tamaño del sedimento y pila; b) a medida que el parámetro K aumenta, el parámetro s/h crece más rápidamente con el Froude, haciendo cada vez más concordante la tendencia experimental con las relaciones de socavación de lechos finos y c) lo anterior induciría a pensar que el comportamiento del material granular grueso, dentro de ciertos rangos de K , es similar al de un material fino y por lo tanto, desde el punto de vista de la socavación existen materiales gruesos que pueden asimilarse a materiales finos.

3.2 Socavación Incipiente

En lechos finos se ha observado que la condición de socavación incipiente no depende del tamaño de la pila y corresponde a $v/v_c = F/F_c = 0.5$. Los datos obtenidos en el presente estudio, graficados en la Fig. 4, muestran en cambio que en general para lechos gruesos lo anterior no se cumple.

Los valores de F_1 en la Fig. 4 son los correspondientes a la condición $s/h \rightarrow 0$ de la Fig. 3. Los valores de F_c corresponden a la velocidad crítica de arrastre obtenida de observaciones sobre arrastre crítico efectuadas en el presente estudio.

En esta figura, las curvas se han definido a partir del punto $\frac{F_1}{F_c} = 1$ y $K = 0$, que corresponde a la condición de arrastre crítico sin la presencia de pilas. Puede apreciarse que para un valor de h/D constante, a medida que aumenta el valor de K , la razón F_1/F_c disminuye, es decir, el sedimento se hace más inestable a la socavación. Esta menor capacidad de arrastre para desestabilizar los granos de igual tamaño a medida que K aumenta, es debida a la mayor perturbación del flujo introducida por la presencia de la pila.

Por otro lado, para K constante, a mayor h/D la relación F_1/F_c aumenta, lo cual indicaría que el sedimento se hace más estable ya que se amplía el rango de F_1 de socavación incipiente. Sin embargo, esto es sólo aparente por lo siguiente. En primer lugar, para que K sea constante si D disminuye, es preciso disminuir también b , o sea, inducir menores perturbaciones locales del flujo. Por lo tanto, la mayor estabilidad no se debe solamente al sedimento sino a la menor capacidad de arrastre de la corriente. En segundo lugar, a medida que aumenta h/D , F_c disminuye, por lo cual un aumento de F_1/F_c no implica necesariamente un aumento de F_1 .

Es interesante destacar también que de acuerdo con la forma de las relaciones de la Fig. 4, sólo a partir de un valor de K superior a 20 aproximadamente, la socavación incipiente deja de depender de dicho parámetro, pero sigue dependiendo de h/D . Además, todos los valores hacia los cuales tienden las relaciones F_1/F_c son sensiblemente mayores que 0.5, lo cual reafirma lo expuesto con anterioridad, en el sentido que los lechos gruesos son comparativamente más resistentes a la socavación que los lechos finos.

El gráfico de la Fig. 4 sobre las condiciones de socavación incipiente reviste interés práctico para el diseño de protecciones en pilas, ya que define las condiciones para las cuales el material que rodea a la pila presenta un comportamiento estable.

3.3 Extensión Lateral del Bulbo de Socavación

El estudio experimental permitió también analizar algunas características relativas a la extensión lateral del bulbo de socavación. Para este efecto, se planteó la siguiente relación funcional adimensional del fenómeno:

$$v_e \left(\frac{e}{h}, F^2, \frac{h}{D}, K \right) = 0 \quad (2)$$

donde e es la extensión lateral del bulbo definida como la mayor distancia que separa el contorno externo del bulbo, medida a lo largo de una línea normal al escurrimiento, contenida en un plano horizontal tangente a dicho contorno. (Ver Fig. 2).

Al reemplazar la Ec. (1) en (2) resulta:

$$v_{e1} \left(\frac{e}{h}, \frac{s}{h} \right) = 0 \quad (3)$$

La ecuación anterior puede expresarse también como función de b o D como sigue:

$$v_{e2} \left(\frac{e}{b}, \frac{s}{b} \right) = 0 \quad (4)$$

$$v_{e3} \left(\frac{e}{D}, \frac{s}{D} \right) = 0 \quad (5)$$

Considerando que para valores muy pequeños de s , la extensión del bulbo es despreciable y teniendo presente que las Ecs. (3), (4) y (5) corresponden al mismo fenómeno, se cumple:

$$\frac{e}{x} = m \left(\frac{s}{x} \right) \quad (6)$$

o bien

$$\frac{e}{s} = m = \text{cte} \quad (7)$$

relación semejante a la encontrada para la socavación en estribos

insertos en lechos arenosos. (Ayala et al., 1979).

Los resultados obtenidos se presentan en la Fig. 5. En esta figura se han incluido también líneas rectas pasando por el origen que representan a la Ec. (7) y curvas dibujadas con líneas de segmento, las cuales representan la Ec. (3). Cabe indicar que estas últimas curvas se obtuvieron mediante ajustes gráficos de relaciones del tipo de las Ecs. (1) y (2) a los datos experimentales.

De acuerdo a lo mostrado en la Fig. 5, no se cumple la Ec. (7) por cuanto, si se acepta que la dispersión de los puntos es básicamente experimental, el coeficiente m de pendiente de las relaciones lineales resulta claramente dependiente de K . Esto se aprecia mejor en la Fig. 6 donde se ha graficado m en función de K a partir de los ajustes gráficos de la Fig. 5. Sin embargo, la contradicción con la Ec. (7) es sólo aparente por que la dependencia de m con K sólo viene a poner de manifiesto la relatividad del concepto de lecho grueso y fino desde el punto de vista de la socavación; esto se analizará con mayor detenimiento a continuación.

3.4 Análisis Comparativo de la Socavación en Lechos Gruesos y Finos

Para establecer una comparación entre los datos experimentales del presente estudio y los numerosos antecedentes sobre socavación en lechos finos, se adoptó la relación empírica de Breusers, Nicollet y Shen (1977) :

$$\frac{s}{D} = 2 \operatorname{tg} h \left(\frac{h}{D} \right) \cdot f \left(\frac{v}{v_c} \right) \quad (8)$$

donde

$$f \left(\frac{v}{v_c} \right) = \begin{cases} 0 & 0 \leq \frac{v}{v_c} < 0.5 \\ 2 \left(\frac{v}{v_c} \right) - 1 & 0.5 \leq \frac{v}{v_c} < 1 \\ 1 & \frac{v}{v_c} \geq 1 \end{cases}$$

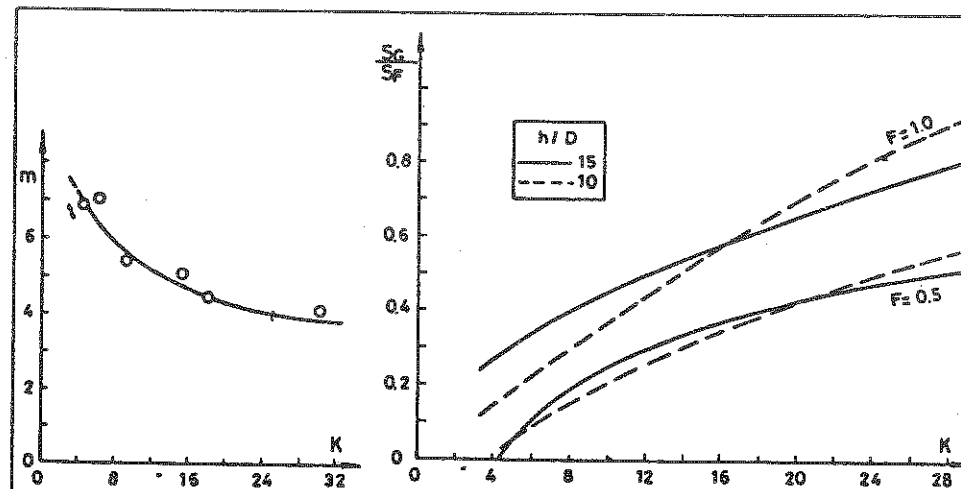


FIG. 6 RELACION ENTRE $m = \frac{e}{s}$ y $K = \frac{b}{D}$

FIG. 7 RAZON ENTRE SOCAVACION DE LECHOS GRUESOS Y FINOS EN FUNCION DE $K = b/D$

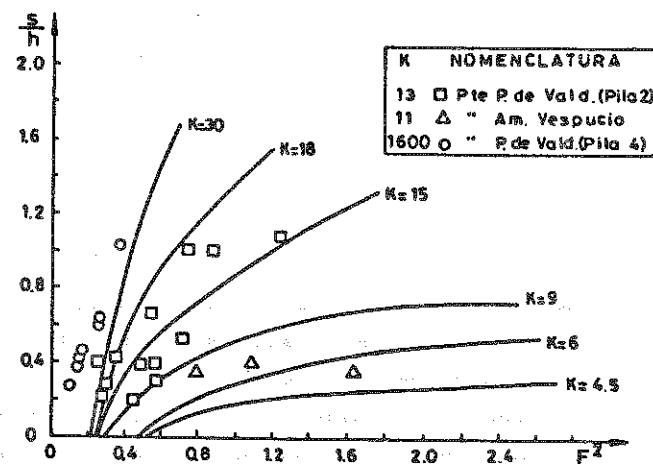


FIG. 8 COMPARACION ENTRE DATOS DE TERRENO (RIO NAPOCHO) Y CURVAS EXPERIMENTALES

v_c es la velocidad crítica de Hincu :

$$v_c = 1.54 D^{0.3} h^{0.2} g^{0.5} \quad (9)$$

A esta expresión se le puede dar la siguiente forma adimensional :

$$\frac{h}{D} = 4.22 F_c^{-1.5} \quad (10)$$

donde

$$F_c = \frac{v_c}{(gh)^{1/2}}$$

Luego, para el rango en que son válidas las experiencias del presente estudio se cumple :

$$\frac{s}{h} = \left\{ 2 \cdot \frac{b}{h} \cdot \operatorname{tgh} \left(\frac{h}{b} \right) \right\} \left(2 \frac{F}{F_c} - 1 \right) \quad (11)$$

Esta expresión ha sido derivada de la Ec. (8), multiplicando ambos miembros de la ecuación por h y reemplazando $\frac{v}{v_c} = \frac{F}{F_c}$.

Al introducir en la Ec. (11) la Ec. (10), resulta :

$$\frac{s}{h} = 2 K \left(\frac{h}{D} \right)^{-1} \cdot \operatorname{tgh} \left(K^{-1} \frac{h}{D} \right) \left\{ 1.30 \left(\frac{h}{D} \right)^{3/4} F - 1 \right\} \quad (12)$$

La ecuación anterior sirvió de base para hacer la comparación entre la socavación de lechos gruesos y finos. Para estos efectos, se fijaron valores de $\frac{h}{D}$ y F , y se calcularon valores de $\left(\frac{s}{h} \right)_F$ de lecho fino mediante la Ec. (12) y valores de $\left(\frac{s}{h} \right)_G$ de lecho grueso de las curvas de la Fig. 2 en función de K . La relación $\left(\frac{s}{h} \right)_{\frac{SG}{SF}}$ en función de K obtenida, se muestra en la Fig. 7. Esta figura indica que en la medida que K aumenta, la razón $\left(\frac{s}{h} \right)_{\frac{SG}{SF}}$ tiende a 1.0, y que este valor se alcanza más rápidamente en la medida que el número de Froude aumenta. El efecto de h/D parece no ser tan importante como el Froude en el rango de K investigado.

Por lo tanto, para un sedimento dado y un tamaño de pila fijo, los escurrimientos de mayor velocidad y/o menor altura hacen que el comportamiento de un sedimento grueso, desde el punto de vista de la socavación, se asemeje cada vez más al de un sedimento fino.

4. ESTUDIO DE TERRENO

4.1 Antecedentes Generales del Estudio

El estudio de la socavación local efectuado en laboratorio, por las simplificaciones que requiere, hace recomendable hacer verificaciones a partir de observaciones del fenómeno a escala natural. Con este objeto se elaboró un programa de mediciones de terreno orientado a : 1) obtener información que permitiera evaluar mejor el fenómeno de socavación y a establecer la validez de los resultados experimentales, y 2) sentar las bases para elaborar una metodología para sistematizar las mediciones en terreno.

A continuación se presenta una breve síntesis del estudio efectuado, enfocada principalmente hacia el primer objetivo.

Para el estudio se seleccionaron los puentes Américo Vespucio y Pedro de Valdivia sobre el río Mapocho.

El programa de mediciones comenzó en Julio de 1977 y se desarrolló por espacio de 14 meses. Consistió en mediciones quincenales de caudales, velocidades, alturas de escurrimiento, profundidades de socavación y perfiles transversales del cauce en la zona adyacente a los puentes. Junto a lo anterior, se obtuvo información relativa a granulometría del lecho, dimensiones de las pilas, pendiente del cauce, etc.

Las principales características de los puentes se incluyen en la Tabla 2.

que mejor tiende a reflejar el comportamiento de materiales finos. El caso de la pila 2 también es digno de destacar por la mayor dispersión de los puntos; ello puede atribuirse al efecto del cambio de régimen de los caudales que en esta pila tienen una mayor influencia que en otras pilas por encontrarse ella en el cauce principal del río. Aquí las variaciones de caudal inducen cambios apreciables de la socavación local por efecto de socavación general y relleno del cauce.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las principales conclusiones y recomendaciones del estudio son :

- a) Para sedimento uniforme y velocidades menores que las críticas de arrastre las correlaciones entre s/h , F^2 y K son satisfactorias. Para el rango indicado s/h crece con el número de Froude, para $K = cte$.
- b) A medida que K aumenta, las diferencias entre socavación de lechos gruesos y finos disminuye; para $K \geq 30$ estas diferencias tienden a minimizarse y a desaparecer. Luego, los conceptos de sedimento grueso y fino son relativos dependiendo del parámetro K y no del tamaño de sedimento únicamente.
- c) La condición de socavación incipiente, expresada en términos del número de Froude de inicio de la socavación, depende en forma inversa de K . El valor $F = 0.5 F_c$ dado en la literatura para lechos finos no sería aplicable a lechos gruesos.
- d) La extensión lateral del bulbo de socavación depende linealmente de la socavación máxima y la pendiente de dicha relación es función inversa de K .
- e) Los datos de terreno obtenidos muestran que la socavación en prototipo sigue una tendencia similar a la encontrada en laboratorio.

BIBLIOGRAFIA

- Ayala L. y Martín J. "Socavación Local al Pie de Pilas en Lechos de Granulometría Gruesa". Publicación CRE 80-21-I, Centro de Recursos Hidráulicos, Universidad de Chile, 1980.
- Ayala L. y Martín J. "Resultados Preliminares de un Estudio Experimental sobre Socavación Local al Pie de Pilas en Lechos de Granulometría Gruesa". Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica, IV Coloquio Nacional, Nov. 1979.
- Breusers H., Nicollet G. y Shen H. "Local Scour around Cylindrical Piers". IAHR, Vol. N° 15, 1977.