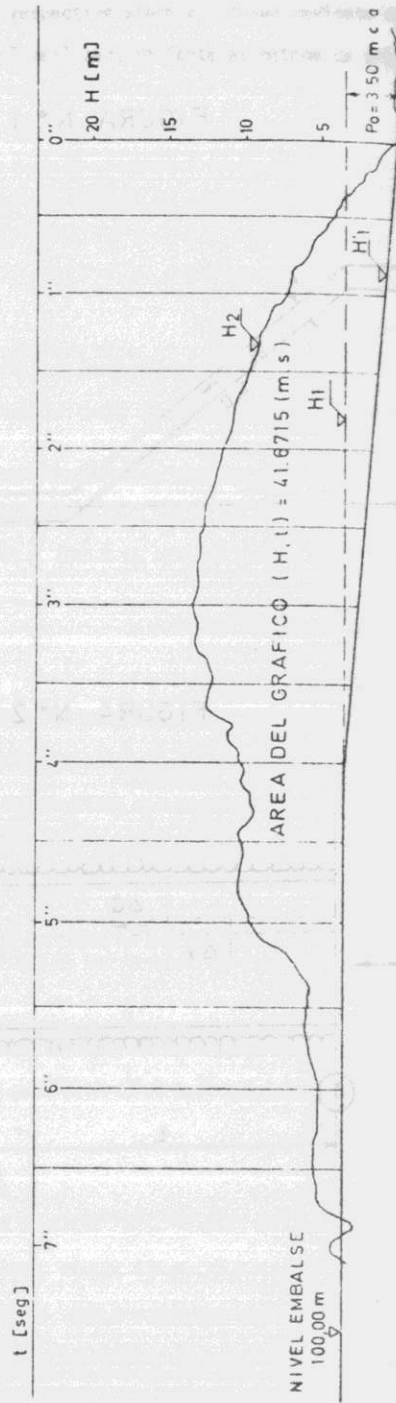


FIGURA N° 3  
CENTRAL RAPEL  
RECHAZO DE 70 M W. 5ª UNIDAD



#### ARRASTRE DE SEDIMENTOS Y SCCAVACION

## IV COLOQUIO NACIONAL

ANALISIS CRITICO DE ALGUNOS METODOS PARA DETERMINAR  
LA SOCAVACION LOCAL EN PILAS DE PUENTES

Alejandro López Alvarado (\*)

RESUMEN

Se ha hecho un análisis crítico del método de Maza y del de Breusers, Nicollet y Shen, propuestos para la determinación de la socavación local en pilas de puentes. El análisis se ha limitado sólo al caso de pilas circulares.

A la luz de algunos datos experimentales recopilados en la literatura, se ha intentado mostrar el rango de aplicación, diferencias y coincidencias de ambos métodos.

En el gráfico de Maza se han agregado unas curvas de  $D/b$ , que muestran el efecto del diámetro del sedimento, en el proceso de socavación. Este efecto está relacionado con la velocidad crítica de arrastre del sedimento.

En cuanto a la velocidad del escurrimiento se han definido tres situaciones. Una cuando la velocidad es menor a la crítica de arrastre, otra cuando es mayor pero influye en el proceso de socavación, y la tercera cuando no tiene influencia. Para las tres regiones así definidas se ha discutido la aplicabilidad de los métodos analizados.

Incluyendo en el gráfico de Maza las curvas  $D/b$  ya mencionadas, ha sido posible delimitar en dicho gráfico la región en la cual la velocidad, aún siendo mayor a la crítica de arrastre, tiene influencia en la socavación. El límite superior queda representado por la recta de Maza y el inferior por las correspondientes  $D/b$ .

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

### 3.4 1.- INTRODUCCION

En un trabajo anterior (Ref. 1), se presentó una recopilación de diferentes fórmulas que permiten obtener la socavación local en torno a una pila de puente. De la confrontación de los resultados obtenidos por cada uno de tales métodos, se encuentra una notable diferencia entre uno y otro, lo cual significa un alto grado de incertidumbre al proyectista abocado al problema de determinar la magnitud de la socavación en una pila.

En el presente trabajo se pretende dar algunos puntos de referencia para el uso de algunas de las metodologías más frecuentemente utilizadas. En ningún caso se ha intentado dar solución absoluta a este complejo problema, sino más bien mostrar algunas limitaciones necesarias de tener presente.

Por razones que más adelante se explican, el análisis se ha reducido al caso de pilas circulares.

### 2.- MECANISMO DE LA SOCAVACION

El aspecto dominante de la socavación en torno a una pila, es el sistema de vórtices que se genera en torno a ella, debido a los cambios de dirección de las líneas de corriente, producida por la presencia de dicha estructura. Este fenómeno, descrito y observado por varios investigadores, es ya sin lugar a dudas, el origen de este tipo de socavación. Las diferentes metodologías modernas así lo consideran.

En este aspecto es necesario no confundir esta socavación con la producida por la capacidad propia del escurrimiento para arrastrar sedimentos del fondo. El mecanismo en ambos casos es diferente. En el primero, como se dijo, la base de la acción erosiva se debe a los vórtices creados por la presencia de la pila y no a la capacidad de arrastre natural del escurrimiento, como lo es en el segundo. De aquí la complejidad del fenómeno, ya que hay un alto número de variables interviniendo en el problema.

Si bien es cierto, algunos métodos modernos presentan simplificadas fórmulas de cálculo, ellos de una u otra forma reconocen la mecánica del proceso. No sucede lo mismo con metodologías tradicionales, como la de Terzaghi, por ejemplo, la cual está basada en concepciones erradas del mecanismo de socavación, y puede ser en extremo insegura su aplicación.

### 3.- METODOS PARA ABORDAR EL PROBLEMA

De las innumerables expresiones encontradas en la literatura, serán dos las que se considerarán: la propuesta por Maza Alvarez, de gran interés práctico y ampliamente difundida en nuestro medio, y la relación propuesta por Breusers y otros (Ref. 2), resultado esta última de un análisis exhaustivo de antecedentes previos, recopilados por los autores señalados (Breusers recopila el trabajo de casi una treintena de investigadores).

Se compararán algunos resultados experimentales que se han podido recopilar, con ambas metodologías mencionadas.

Maza Alvarez presenta sus resultados en un gráfico en base a tres parámetros dimensionales  $h+s/b$ ,  $Fr^2$  y  $h/b$  siendo  $h$ , profundidad del escurrimiento,  $s$  la socavación,  $b$  ancho de la pila y  $Fr$  el correspondiente al flujo. La profundidad  $h$  es la obtenida después de determinar la variación del fondo debido a la socavación transversal por estrechamiento. Estos parámetros dimensionales fueron obtenidos mediante análisis dimensional, y son los que presentaron mejor concordancia con los resultados obtenidos. Maza Alvarez experimentó con pilas circulares, rectangulares y de punta redondeada, en lechos de arena de 0,17 - 0,56 y 1,30 mm, respectivamente.

Específica que para una profundidad dada, la socavación varía linealmente hasta un cierto valor de la velocidad, en donde se hace independiente de ella.

Considera también factores de corrección para el caso que la pila esté inclinada respecto a la dirección del escurrimiento.

Breusers, Nicollet y Shen, en el trabajo ya mencionado, y después de analizar varias experiencias, incluyendo las de Maza, concluyen que la profundidad de socavación puede describirse mediante una función de la forma

$$\frac{s}{b} = f \left( \frac{\bar{v}}{\bar{v}_c}, \frac{h}{b}, \text{forma de la pila, ángulo de ataque} \right) \quad (1)$$

donde  $v_c$  es la velocidad crítica de arrastre.

Sugieren, para fines prácticos, la relación siguiente :

$$\frac{s}{b} = f_3 \left( \frac{\bar{v}}{\bar{v}_c} \right) \left| 2 \operatorname{tg} h \left( \frac{h}{b} \right) \right| f_2(\text{forma}) f_3(\alpha, l/b) \quad (2)$$

siendo  $\alpha$  = ángulo de ataque

$l$  = largo de la pila

en esta relación :

$$\begin{aligned} f_1 \left( \frac{\bar{v}}{\bar{v}_c} \right) &= 0, \text{ para } \frac{\bar{v}}{\bar{v}_c} \leq 0,5 \\ &= \left( 2 \frac{\bar{v}}{\bar{v}_c} - 1 \right) \text{ para } 0,5 \leq \frac{\bar{v}}{\bar{v}_c} \leq 1,0 \\ &= 1,0 \text{ para } \frac{\bar{v}}{\bar{v}_c} \geq 1,0 \end{aligned} \quad (3)$$

$f_2(\text{forma}) = 1,0$  para pilas circulares y redondeadas

$= 1,3$  para pilas rectangulares

$f_3(\alpha, l/b) = 1$  para pilas circulares, y para otras

pilas se obtiene de un gráfico.

En la recopilación efectuada por estos autores se incluyen una variedad de diámetros de sedimentos, entre 0,1 y 5 mm, siendo mayoritariamente experimentado el rango entre 0,2 y 1,5 mm y pilas de variadas formas, entre ellas circular, rectangular, de nariz redondeada y lenticular.

De acuerdo a (2) y (3) para el caso de pilas circulares, la profundidad de socavación puede expresarse como

$$\frac{s}{b} = \left( 2 \frac{\bar{v}}{\bar{v}_c} - 1 \right) 2 \operatorname{tg} h \left( \frac{h}{b} \right) \quad (4)$$

si  $\bar{v}/\bar{v}_c$  está entre 0,5 y 1, y como :

$$\frac{s}{b} = 2 \operatorname{tg} h \left( \frac{h}{b} \right) \quad (5)$$

si  $\bar{v} > \bar{v}_c$ . No hay socavación si la velocidad del escurrimiento es menor a  $0,5 \bar{v}_c$ .

Las dos metodologías, válidas básicamente para lechos de granulometría fina, mencionadas concuerdan en que la socavación máxima, para una pila y profundidad dada, se hace independiente de la velocidad a partir de un cierto valor de ella.

El valor de esta velocidad no queda suficientemente aclarado en el gráfico de Maza, aunque se considere que es la crítica de arrastre. Para Hincu (Ref. 3), esta velocidad correspondería a un valor entre 1 y  $1,2 \bar{v}_c$ .

Dado que existirían dos situaciones bien diferentes, se establecerá una comparación entre ambos métodos para estos casos, a pesar de que  $\bar{v}/\bar{v}_c \leq 1$ , tiene más bien un valor académico, puesto que en condiciones de diseño, normalmente  $\bar{v} > \bar{v}_c$ .

La comparación se limitará al caso de pila circular.

Para calcular la velocidad crítica, Breuser sugiere usar la relación propuesta por Hincu (Ref. 3).

$$\bar{v}_c = 1,2 \sqrt{g D \frac{\rho_s - \rho}{\rho}} \left( \frac{h}{D} \right)^{0,2} \quad (6)$$

siendo  $D$  = diámetro del sedimento.

Para el caso de sedimentos naturales,  $\rho_s - \rho / \rho = 1,65$ , la expresión (6) queda como :

$$\bar{v}_c = 4,82 D^{0,5} \left( \frac{h}{D} \right)^{0,2} \quad (7)$$

Dado el rango experimental de  $h/D$ , en general  $> a 100$ , la conocida fórmula de Neill, no es aplicable, y será por tanto la ec. (7) la que se utilizará.

Calculada la velocidad crítica para los datos experimentales con los que se contaba, se procedió a calcular la socavación, según el gráfico de Maza Alvarez y las fórmulas (4) o (5), según correspondieran.

Estos resultados se presentan en las Tablas N° 1 y N° 2.

- Caso de  $\bar{V}/\bar{V}_c < 1$ . Por inspección de la Tabla N° 1, se comprueba que en este rango la expresión de Breusser, presenta mejor concordancia con los valores experimentales, que los obtenidos de Maza. En el gráfico N° 1 se comparan los valores experimentales con la ecuación de Breusers, llevando como parámetro la relación  $h/b$ . En general se encuentra una tendencia satisfactoria con dicha relación.
- Caso de  $\bar{V}/\bar{V}_c > 1$ . Este rango es el de mayor utilidad práctica. En la Tabla N° 2 se muestran los resultados experimentales recopilados, los calculados con la ecuación (5), y los obtenidos aplicando el gráfico de Maza. Se aprecia que en esta situación, los resultados derivados de la metodología de Maza, cuando la velocidad se acerca a la crítica, muestran mejor concordancia con los experimentales, que los calculados con la relación de Breusers. Estos resultados se incluyeron en el gráfico original de Maza (Graf. 2), indicándose en cada punto la relación  $h/b$ . Se agregó también la recta correspondiente a la ecuación (4). Se encuentra allí que la tendencia experimental coincide con la tendencia del método de Maza algo mejor que con la de Breusers. A fin de comprobar la consistencia de estos resultados, se llevaron dos gráficos, uno con  $s/h$  y  $Fr^2$  y  $s/b$  y  $Fr^2$ , Gráficos 3 y 4 respectivamente, llevándose  $h/b$  como parámetro. Se ve en ambos casos que la tendencia en favor de uno u o-

SOCAVACION PARA  $\bar{V} < \bar{V}_c$ 

Autor	b cm	D mm	h cm	$\bar{V}$ m/s	$\bar{V}/\bar{V}_c$	s		
						experi mental cm	ec. de Breu sers cm	Gráfi co de Maza cm
Shen	15	0,24	11,5	0,20	0,78	12	11	5
			21	0,14	0,48	2	-	-
Chabert y Engeldin- ger	15	3	20	0,31	0,51	1,2	0,5	11,5
				0,34	0,56	2,5	3	13
ger	15	1,5	20	0,38	0,62	7,3	6	13,8
				0,43	0,70	8,3	10	16,8
				0,48	0,78	12,5	14,6	17,5
				0,58	0,95	15,8	23	20,5
				0,53	0,87	16,3	19	20,4
				0,59	0,96	16,1	24	20,5
Hincu	20	2	5	0,29	0,58	14,5	4	11
				0,33	0,66	18	8	11,5
				0,348	0,70	21	10,4	12,2
				0,38	0,76	21	13,6	14,5
				0,432	0,87	19,5	19,3	17,5
				0,248	0,69	13,5	7,3	8
Hincu	13	17,3	12,5	0,28	0,78	13,6	10,8	9
				0,328	0,91	14	15,8	11
				0,40	0,98	16,4	9	12
				0,283	0,54	2,3	2	10
				0,40	0,81	11,4	12	14,8
				0,40	0,81	11,4	7	9,7
Hincu	6	12,5	5	0,30	0,70	8,8	3	6,4
				0,40	0,98	5	5,4	5
				0,36	0,88	4,7	4,2	4,9
				0,30	0,73	2,4	2,7	4,6

(continúa.-)

T A B L A N° 1 (continuación)

SOCAVACION PARA  $\bar{V} < \bar{V}_c$ 

Autor	b cm	D mm	h cm	$\bar{V}$ m/s	$\bar{V}/\bar{V}_c$	s			
						experi mental cm	ec. de Breu sers cm	Gráfi co de Maza cm	
Hincu	13	0,5	5	0,20	0,74	5,2	4,6	5,4	
				0,25	0,92	9	8	6,7	
				0,50	0,81	10	10	15,3	
				0,52	0,83	12,5	11,4	15,3	
				0,60	0,97	18,1	15,8	16	
	0,54	0,80	12	12,8	18,1				
	0,64	0,94	21	19,3	19,1				
	Maza	13,3	0,56	5	0,20	0,71	3,5	4	
					0,235	0,81	6	7	
					0,27	0,86	7	11	
0,285					0,98	9	10		
0,295					0,73	9,5	12		
0,29	0,65	11,5	8						
0,26	0,67	12	9						
0,305	0,76	13	13,6						
0,325	0,90	12	18,6						
0,335	0,78	15,5	15						

SOCAVACION PARA  $\bar{V} > \bar{V}_c$ 

Autor	b cm	D mm	h cm	$\bar{V}$ m/s	experi mental cm	ec. de Breu sers cm	Gráfico de Maza cm
Shen	15	0,24	11,5	0,30	13	19	12,5
				0,41	15	19	17
				0,52	15,5	19	18,5
				0,87	17	19	19,2
				0,29	14	22,8	12
				0,37	16	22,8	15
				0,49	15	22,8	19,5
				0,62	18	22,8	21
				0,75	20	22,8	21
				0,29	14	26	11
				0,42	20	26	17
				0,53	18	26	19
				0,60	18	26	19
				0,386	13,8	28	16,5
				0,46	16,6	28	20
Chaberty	15	3	20	0,63	19,7	26	21
				0,79	21	26	23
				0,85	18,6	26	23
				0,88	17,6	26	23
				0,93	18,1	26	23
				1,07	18	26	23
				0,65	20	26	21
				0,366	14,5	19,3	12,5
				0,40	14,6	19,3	14
				0,462	14,8	19,3	15
0,57	14,9	19,3	17				

(continda.-)

T A B L A N° 2 (continuación)  
SOCAVACION PARA  $\bar{v} > \bar{v}_c$

Autor	h cm	D mm	h cm	$\bar{v}$ m/s	s						
					experi mental cm	ec. de Breusers cm	Gráfico de Maza cm				
Shen	15	0,24	11,5	0,30	13	19	12,5				
				0,41	15	19	17				
				0,52	15,5	19	18,5				
				0,87	17	19	19,2				
				15	0,29	14	22,8	12			
					0,37	16	22,8	15			
					0,49	15	22,8	19,5			
					0,62	18	22,8	21			
					0,75	20	22,8	21			
					21	0,29	14	26	11		
						0,42	20	26	17		
				0,53		18	26	19			
				27	0,39	13,3	28	19			
					0,46	16,6	28	16,5			
								20			
				Chabert y Engeldin- ger	15	3	20	0,63	19,7	26	21
								0,79	21	26	23
0,85	18,6	26	23								
0,88	17,6	26	23								
0,93	18,1	26	23								
1,07	18	26	23								
1,5	20	26	21								
10	0,52	20	0,366					14,5	19,3	12,5	
			0,40					14,6	19,3	14	
			0,462					14,8	19,3	15	
			0,57	14,9	19,3	17					

tro ya no es tan clara, pues la dispersión es casi análoga. Esto refleja que la honddad del método de Maza ha sido lo- 3.13  
grada mediante una correlación artificial de parámetros a-  
dimensionales, cual es el agregar el término h/b al paráme-  
tro que representa la socavación. Esto se evidencia en  
los gráficos 3 y 4, en donde los valores experimentales se  
dispersan, lo cual indicaría que la confiabilidad de la me-  
todología de Maza puede no ser tan absoluta.

Para dilucidar el problema de la velocidad límite de influen-  
cia en la socavación se calculó el número de Froude crítico  
correspondiente a distintos h/b y D/b, con lo cual se  
estaría introduciendo en alguna forma la característica  
del sedimento, no considerada en ninguno de estos métodos.  
Para ello la ecuación de velocidad crítica, para el caso de  
 $\rho_s - \rho / \rho = 1.65$ , dada por :

$$\bar{v}_c = 1.54 g^{0.5} D^{0.5} \left( \frac{h}{D} \right)^{0.2} \quad (8)$$

se transformó en una ecuación que considera el número de  
Froude y la relación entre el diámetro del sedimento y el  
de la pila

$$\frac{h}{D} = 4.22 \frac{D}{B} Fr^{-10/3} \quad (9)$$

Con esta ecuación se trazaron las curvas D/b en el gráfico  
N° 2, las cuales para un h/b dado y un D/b permiten obte-  
ner el Fr crítico de arrastre en el mismo gráfico.  
Se ve que la recta de Maza representa el caso particular  
de una velocidad extrema que ya no influye en la socava-  
ción. Esta velocidad será siempre superior o a lo sumo i-  
gual a la crítica. Este efecto no es tomado en cuenta por  
la ecuación de Breussers, y sí por la metodología de Maza,  
como lo muestra la Figura 2. El valor de la velocidad que no  
influye en el proceso, comparado con la velocidad crítica  
de arrastre dependerá de las relaciones particulares de  
D/b y h/b consideradas. De acuerdo a Hincu esta velocidad  
varía entre 1 y 1,2 la velocidad crítica.

3.14 Estas curvas D/b permiten definir las zonas de validez de ambos métodos. A la izquierda de las curvas D/b respectivas, corresponde la región  $V < V_c$ , en la cual concuerda mejor la relación de Preusers. En la Figura 2 se han incluido también los valores experimentales recopilados para  $V < V_c$ , y cada valor particular se ubica en la región mencionada.

A la derecha de la recta de Maza, o sea en la zona donde la velocidad ya no influye en el proceso, puede aplicarse indistintamente el Gráfico de Maza o la ecuación de Breusers. Entre las curvas D/b y la recta de Maza, es conveniente aplicar la metodología de este investigador, pues la tendencia de las curvas reconoce la influencia de la velocidad. La ecuación de Breusers en esta región, entregará un valor cada vez mayor de la socavación, mientras menor sea la relación D/b, para un valor de h/b dado.

#### 4.- RANGOS EXPERIMENTALES

En general las experiencias revisadas se han efectuado para el caso de sedimentos finos, principalmente en un rango entre 0,1 y 3 mm. Pocas son las experiencias para diámetros mayores a 3 mm. La relación h/D ha sido normalmente muy superior a 100, llegándose a valores comprendidos entre 500 y 1000, lo cual ha permitido concluir a muchos investigadores la no influencia del diámetro en el proceso. Este punto ha sido discutido por Neill (Ref. 4) en su discusión al artículo de Breusers reconociendo este último que aún no se puede decir palabra definitiva al respecto.

Por tanto los resultados obtenidos son aplicables a los casos en que la relación h/D esté dentro de los rangos experimentales o sea superior. Es el caso de los ríos de poca pendiente y lecho con sedimento fino, como los del valle central en nuestro medio. En cursos torrenciales, de mayor pendiente y lecho de granos gruesos, ya no serían aplicables estas relaciones.

En cuanto a la relación h/b, de reconoci-

3.15

da incidencia en el proceso de erosión local, las experiencias cubren rangos entre 0,3 y 4, los cuales cubren en buena parte valores reales de dicha relación.

#### 5.- CONCLUSIONES

Del análisis efectuado es posible concluir

lo siguiente :

- a) Las metodologías propuestas son válidas para el caso de ríos con lecho de granulometría fina y sedimentos no cohesivos.
- b) Es posible distinguir tres situaciones bien definidas, cuales son : velocidad del escurrimiento menor a la crítica de arrastre, velocidad mayor a la crítica pero con influencia en el proceso de socavación, y velocidad para la cual la socavación es independiente de ella.
- c) Para  $\bar{V} < \bar{V}_c$  es recomendable el uso de la ecuación de Breusers.
- d) La velocidad mayor que la crítica que influye en la socavación dependerá del diámetro del sedimento. Sus límites están dados por la curva D/b y h/b respectiva y la recta de Maza. Es una zona en la cual hay cierta incertidumbre en el cálculo de la socavación.
- e) Cuando la velocidad del escurrimiento no tiene influencia en el fenómeno, ambos métodos son igualmente válidos.
- f) Es conveniente tener presente los rangos experimentales que validan estos métodos, a fin de aplicarlos cuidadosamente.
- g) La incertidumbre que aún subsiste en estos estudios deberá dilucidarse con un programa de experimentación en terreno, que confirme la mayor o menor confiabilidad de los métodos más en uso.



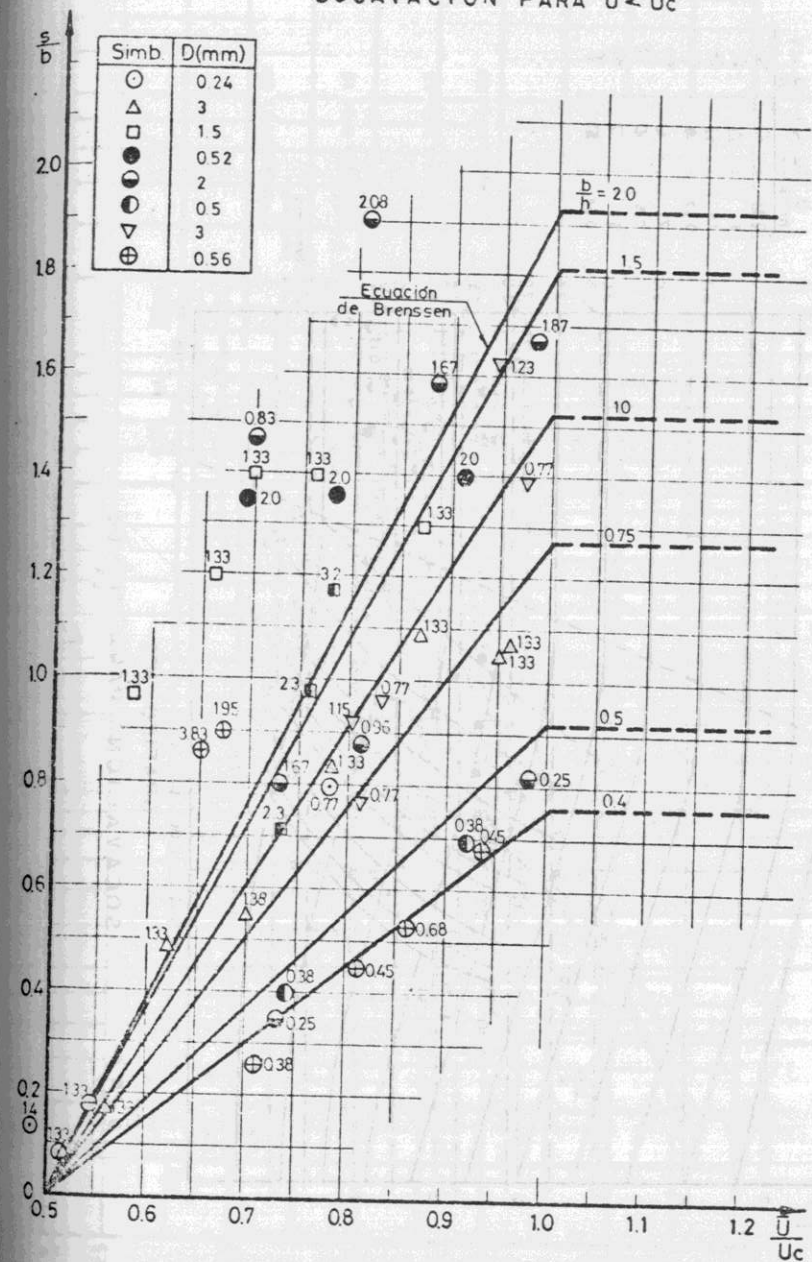
## 6.- AGRADECIMIENTOS

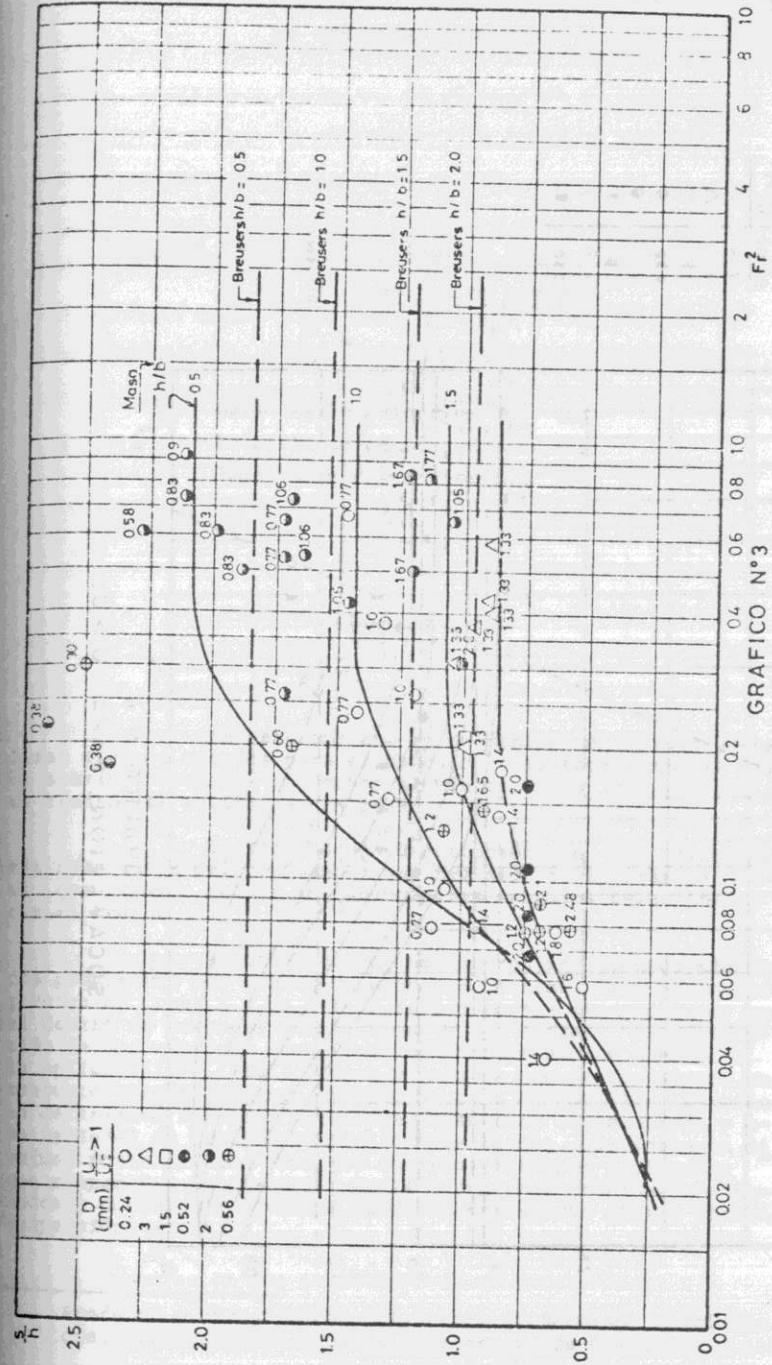
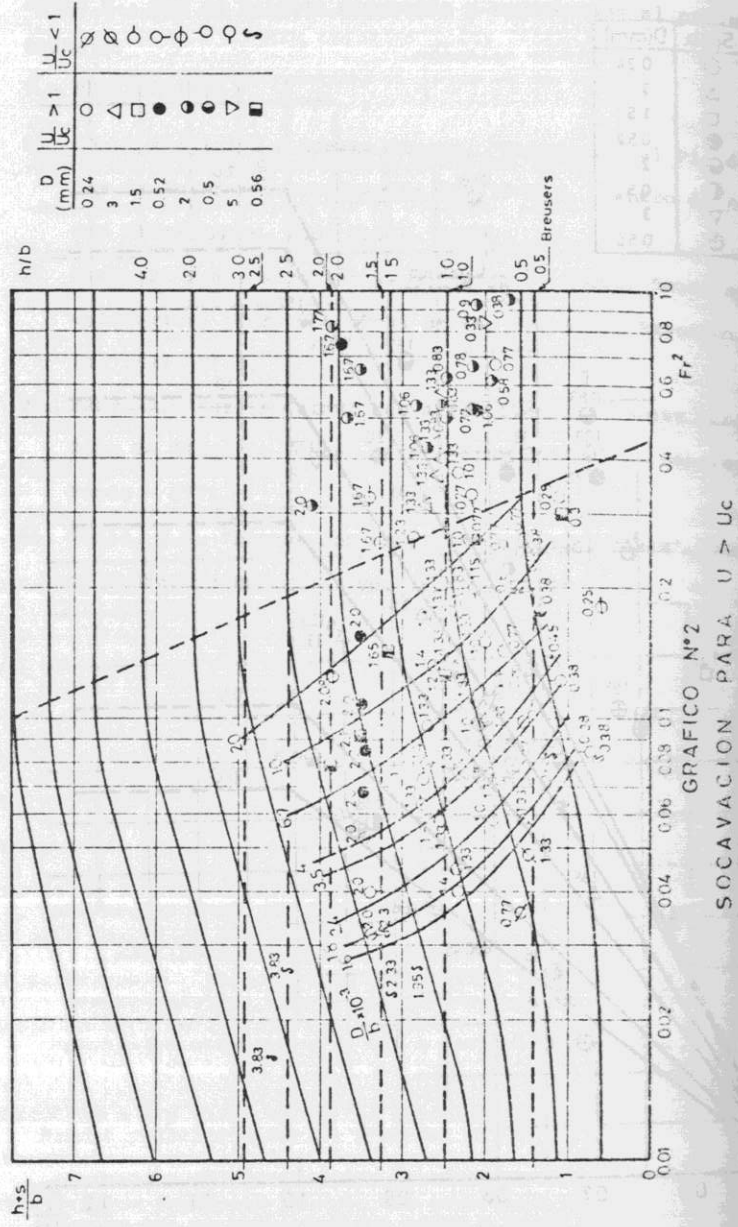
Se agradece debidamente al Profesor Luis Ayala R., por su valiosa discusión y sugerencias al presente trabajo.

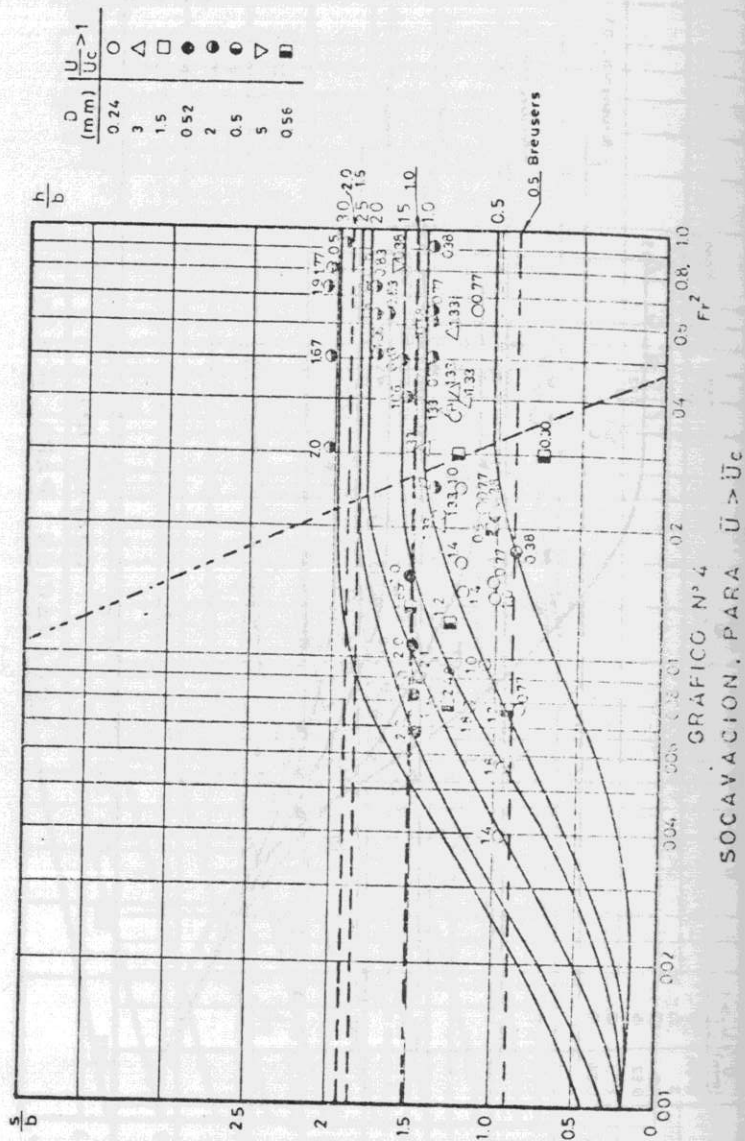
## 7.- BIBLIOGRAFIA

- 1) López Alejandro y Ximena Vargas. "Socavación al Pie de Pilas de Puentes". Publicación CRH 77-1-I. Centro de Recursos Hidráulicos, U.de Chile, 1977.
- 2) Breusers H.N., Nicollet G. y Shen H.W. "Local Scour around Cylindrical Piers". Journal of the Hydraulic Research. Vol. 15, 1977, N° 3.
- 3) Hanco S. "Sur le Calcul des Affouillements Locaux dans la Zone de Piles de Ponts". Proceeding 14th. IA HR Congress Paris - 1971.
- 4) Neill, C.R. "Discussion Local Scour around Piers". Journal of Hydraulic Research. Vo. 16 N° 3. 1978.

GRAFICO N°1  
SOCAVACION PARA  $U < U_c$







### REVISION Y ANALISIS DEL CALCULO DE LA SOCACCIÓN

#### AL PIE DE ESTRIBOS DE PUENTES

Luis Ayala Riquelme (1)

Patricio de Jourdan Rosati (2)

Juan Pablo Duran Miranda (3)

#### RESUMEN

En este trabajo se presentan, describen y analizan algunos métodos para el cálculo de la socavación al pie de estribos fundados en lechos aluviales finos con presencia de transporte sólido generalizado.

Se incluye una descripción de los aspectos más relevantes del fenómeno y una revisión bibliográfica breve que permite reunir los principales estudios relacionados con el tema.

A continuación se presentan algunos métodos propuestos por diversos autores (Laursen, Liu, Artamonov y Veiga da Cunha) y un método recientemente desarrollado en el Centro de Recursos Hidráulicos (U. de Chile). La descripción de los métodos, cuya finalidad básica es dar a conocer la aplicabilidad, limitaciones y modo de uso de los mismos, en conjunto con un análisis crítico de tipo comparativo, permite en definitiva formular recomendaciones para su selección y uso racional en problemas prácticos de diseño. Se incluyen diversas posibilidades como por ejemplo, estribos inclinados con respecto a la dirección de la corriente, estribos con taludes y dominio de diversos modos de transporte sólido (fondo, suspensión, etc.).

(1) Profesor e Investigador del Centro de Recursos Hidráulicos, Departamento de Obras Civiles, U. de Chile.

(2) Ingeniero Civil, U. de Chile.

(3) Profesor e Investigador, Departamento de Ingeniería Civil, U. de Concepción.