

- f) No son directamente aplicables a lechos gruesos las relaciones empíricas derivadas para lechos finos, ya que conducen a una sobre-estimación de la socavación máxima.

6.- BIBLIOGRAFIA

1. Aguirre, P.J. y Flórez L.I., "Socavación Alrededor de Pilas Circulares en Flujo Torrencial", VIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, AIIH, Quito, Ecuador, 1978.
2. Anderson, A.G., "Scour at Bridge Waterways. A Review", Federal Highway Administration, Washington D.C., 1974.
3. Breusers, H.N.C.; Nicollet, G. y Shen, H.W., "Local Scour Around Cylindrical Piers", Journal Hyd. Res., IAHR, Vol. 15, N°3, 1977.
4. Chabert, J. y Engeldinger, P., "Etude des Affouillements Autour des Piles de Pons", Lab.Nac. d'Hydr., Chatou, 1956.
5. Hanco, S., "Sur le Calcul des Affouillements Locaux dans la Zone des Piles de Ponts", Proc. XIV Congress IAHR, Paris, 1971.
6. Laursen, E.M. y Toch A., "Scour Around Bridge Piers and Abutments", Bull. N°4, Iowa Highway Res. Board, 1956.
7. Nicollet, G. y Ramette, M. "Affouillements au Voisinage de Piles de Pont Cylindriques Circulaires", Proc. XIV Congress IAHR, Paris, 1971.

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA

IV COLOQUIO NACIONAL

TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN LECHOS GRANULARES GRUESOS EN EQUILIBRIO

SOLANO VEGA VISCHI*

RESUMEN

Se propone fórmula que permite determinar velocidad absoluta de los diferentes tamaños de partículas constitutivas del lecho, basada en las fuerzas de sustentación. Estas fuerzas son una fracción considerable de las de arrastre producidas por resistencia hidrodinámica y actuando normal a aquellas. Las fuerzas de arrastre y las de sustentación se determinan por medio de las velocidades del agua cerca de fondo descritas por las fórmulas de von Karman y las constantes de Keulegan. La cantidad de partículas en movimiento se determina por medio de las fórmulas de socavación general propuesta por el autor, en otro trabajo ^{1/}. Conocido para cada fracción granulométrica el número de elementos y las velocidades absolutas de ellos se puede determinar el gasto sólido total transportado como carga de fondo. Se comparan resultados obtenidos por estas fórmulas con cuatro fórmulas clásicas.

* Ingeniero Consultor - Santiago.

3.60 Antecedentes

La teoría de socavación general del autor de este trabajo ^{1/} en condiciones de no equilibrio (aguas abajo de un embalse), permite determinar la profundidad de socavación final h_s alcanzada para un gasto determinado:

$$h_s = \frac{1.1}{n_i d_i^2 + n_j d_j^2 + \dots + n_p d_p^2}$$

en que d_i, d_j, \dots, d_p son los tamaños del material del lecho mayores que el tamaño crítico d_c de equilibrio incipiente. A su vez, n_i, n_j, \dots, n_p son el número de unidades de cada tamaño d_i, d_j, \dots, d_p por unidad de volumen del material del lecho. En esa teoría, el tamaño crítico d_c se determina de acuerdo a la ecuación de Shields, la que empíricamente relaciona los parámetros del escurrimiento con el tamaño crítico. En este trabajo se postula la iniciación de movimiento basado en que la partícula se desprege del lecho debido a la fuerza de sustentación (lift) que se manifiesta al estar ésta expuesta a una velocidad competente, es decir, cuando la fuerza de sustentación iguale al peso propio sumergido de la partícula. Para estas condiciones, los tamaños críticos se calculan por tanteo, resultando en general menores que los dados por Shields, y, en consecuencia, los niveles de socavación también serán menores que los calculados con el criterio de referencia ^{1/}. Se mantiene el mecanismo de acorazamiento y el cálculo de profundidad de socavación expuestos en ese trabajo.

Las mediciones de fuerzas de sustentación efectuadas por Apperley y otros ^{2/} muestran que éstas son una fracción considerable de las de resistencia hidrodinámica (drag) las que, a su vez, son función de la velocidad relativa del escurrimiento respecto de la partícula. La sustentación es máxima para la partícula inmóvil apoyada en el nivel de velocidad nula (nivel de estagnamiento) y disminuye incluso cambiando de signo al elevarse sobre ese nivel. En el estado actual de las investigaciones es difícil fijar cuantitativamente el valor de la sustentación.

En este trabajo se acepta que al iniciarse el arrastre de la par. 3.61 titula la sustentación es del orden de un 25% de la resistencia hidrodinámica.

Se aceptan igualmente las siguientes hipótesis suplementarias:

- 1.- El lecho está en equilibrio, es decir, su cota y constitución granulométrica son iguales para gastos iguales.
- 2.- Las partículas son esféricas y las características mecánicas de una fracción granulométrica pueden ser representadas por el diámetro medio de esa fracción.
- 3.- Todos los valores expresados son valores medios temporales.
- 4.- El número de elementos n_1, n_2, \dots, n_{i-1} correspondientes a diámetros d_1, d_2, \dots, d_{i-1} en movimiento, es igual al número de partículas contenidas en el espesor h_s socavado. Esta hipótesis es una consecuencia de la hipótesis 1.
- 5.- El número de elementos n_i, n_j, \dots, n_p que acorazan el lecho, corresponden al número de partículas contenidas en el espesor h_s socavado. Esta hipótesis es una consecuencia de la hipótesis 1.

II. Distribución de Velocidades

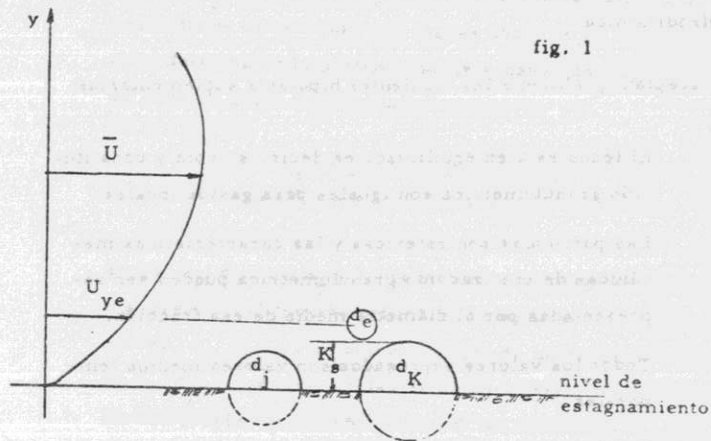


fig. 1

- d_K = diámetro simbólico de partículas que acorazan lecho
 K_s = altura representativa de resistencia del lecho = $d_{65}/2$
 d_e = diámetro simbólico de partículas arrastradas
 \bar{U} = velocidad media del escurrimiento
 U_{ye} = velocidad escurrimiento a nivel centro d_e

En figura 1 se representan las partículas fijas del lecho y las móviles representadas por d_e . Para la distribución de velocidades en régimen turbulento se adopta la distribución logarítmica de von Karman con las constantes de Keulegan para lecho áspero^{3/}.

$$U_y = 5.75 \log (30.2 y/K_s) U_* \quad U_* = \sqrt{g i J}$$

$$\bar{U} = 5.75 \log (12.27 H/K_s) U_* \quad H = \text{altura escurrimiento.}$$

$J = \text{pendiente eje hidráulico.}$

Se definirá un factor $\beta = \frac{U_y}{\bar{U}} = \frac{\log (30.2 y/K_s)}{\log (12.27 H/K_s)}$

$$U_y = \beta \bar{U}$$

III. Resistencia hidrodinámica y sustentación-Velocidad absoluta de las partículas

La resistencia hidrodinámica r_e de una partícula d_e arrastrada vale^{4/}:

$$r_e = C_D A \rho \frac{U^2}{2} \quad \rho = \frac{\gamma_a}{g}$$

$$r_e = 0.157 \frac{\gamma_a}{g} d_e^2 (U_{ye} - U_e)^2 \quad A = \frac{\pi d_e^2}{4}$$

$$r_e = 0.157 \frac{\gamma_a}{g} d_e^2 (\beta \bar{U} - U_e)^2 \quad C_D = 0.40$$

$$U = (U_{ye} - U_e)$$

U_e = velocidad absoluta de la partícula.

La sustentación s_e tiene la misma expresión, modificada por 0.25 y actuando normal a la resistencia r_e .

$$s_e = 0.0393 \frac{\gamma_a}{g} d_e^2 (\beta \bar{U} - U_e)^2$$

Al imponer la condición que la sustentación s_e iguale a peso sumergido P_s de la partícula para que se produzca arrastre, permite calcular U_e , velocidad inicial de traslación.

$$s_e = P_s = \frac{\pi d_e^3}{6} (\gamma_s - \gamma_a) \quad \gamma_s = \text{peso específico partícula.}$$

γ_a = peso específico agua.

$$U_e = \beta \bar{U} - \sqrt{13.32 d_e \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_a} - 1 \right) g} \quad (1)$$

La velocidad media U_{em} de la partícula, que debido a la forma de acción de la sustentación se eleva con cierta velocidad de traslación y cae para volver a iniciar el proceso, se acepta que vale $0,5 U_e$.

$$U_{em} = 0,5 U_e \quad (2)$$

Las fórmulas (1) y (2) son las básicas para el movimiento de cada partícula.

IV. Número de partículas de tamaño "d" e arrastradas

El autor de este trabajo ha propuesto una metodología ^{1/} para analizar la socavación general de una sección de escurrimiento en lechos naturales. Se acepta por simplificación que la sección se puede representar para un gasto Q, por una altura media de escurrimiento H y una pendiente long. J. El material del lecho tiene una distribución por fracciones granulométricas representadas por tamaños d_1, d_2, \dots, d_p , en que cada tamaño a su vez constituye un porcentaje del peso p_1, p_2, \dots, p_p por unidad de volumen. Si la profundidad de socavación es h_s con un tamaño de acorazamiento d_i , el material arrastrado estará constituido por los tamaños d_1, d_2, \dots, d_{i-1} . El peso arrastrado para cada diámetro d_e por unidad de ancho por unidad de tiempo se designa Δq_e .

$$\Delta q_e = p_e \cdot h_s \cdot P \cdot U_{em}$$

P = peso específico aparente material lecho.

Para el conjunto de tamaños en movimiento, el peso arrastrado por unidad de ancho y de tiempo es:

$$q_s = \sum_{e=1}^{e=i-1} q_e$$

Para el ancho total b, el peso Q_s será:

$$Q_s = b q_s = b \sum_{e=1}^{e=i-1} p_e \cdot h_s \cdot P \cdot U_{em} \quad (3)$$

La expresión (3) da el peso total por unidad de tiempo.

V. Aplicación al Río Maipo

Se aplicará la metodología descrita a un caso ya estudiado ^{5/} por los métodos clásicos de Schoklitsch, Shields, Meyer-Peter y Einstein.

a) Fraccionamiento granulométrico del lecho y número de elementos constitutivos.

Se acepta que la población se puede fraccionar como sigue:

Fraccionamiento (Tamaños en m.)	$\frac{d_m}{(m)}$	$\frac{p_n}{(*)}$	$\frac{n d_n^2}{n n}$	$\frac{n d_n^3}{n n}$	$\frac{h_s}{(m)}$
1) 0-0.003	0.0015	0.10	0.129	86.16	0.008
2) 0.003-0.010	0.0065	0.16	0.207	31.81	0.021
3) 0.010-0.030	0.020	0.20	0.258	12.92	0.054
4) 0.030-0.010	0.065	0.24	0.310	4.77	0.150
5) 0.100-0.200	0.150	0.30	0.388	2.58	0.426

(*) fracción del peso total

El peso total aparente P de la unidad de volumen de material del lecho da la siguiente relación:

$$n_1 \frac{\pi d_1^3}{6} \gamma_s + n_2 \frac{\pi d_2^3}{6} \gamma_s + \dots + n_p \frac{\pi d_p^3}{6} \gamma_s = P$$

γ_s = peso específico de las partículas.

La fracción granulométrica representada por d_n constituye un porcentaje p_n del peso total P.

$$n_n \frac{\pi d_n^3}{6} \gamma_s = p_n P \quad \dots \quad n_n d_n^3 = \frac{6 p_n P}{\pi \gamma_s}$$

Si se acepta $P = 1.8 \text{ ton/m}^3$ $\gamma_s = 2,66 \text{ t/m}^3$

$$n_n d_n^3 = 1,292 p_n$$

Dividiendo a su vez la expresión anterior por d_n , se obtiene $n_n d_n^2$ que son los términos que permiten calcular h_s .

b) Características medias del escurrimiento para varios gastos.

Pendiente media del lecho $J = 0.0144$

Q (m^3/s)	b (m)	H (m)	\bar{U} (m/s)
12.9	20	0.39	1.65
30.4	27	0.59	1.90
69.4	29.5	0.85	2.77
119.3	31.0	1.09	3.53
217.1	32	1.42	4.77

El gasto mayor anotado corresponde a un período de retorno de 1.000 años.

c) Cálculo del arrastre.

Como ejemplo de aplicación del método se calcula para $Q = 69.4 \text{ m}^3/s$. Para los otros gastos tabulados se entregan los resultados finales.

$Q = 69.4 \text{ m}^3/s$ (ancho medio del escurrimiento: $b = 29.5 \text{ m}$)

El cálculo se inicia tanteando un valor d_m representativo de una fracción granulométrica, como el tamaño menor que acoraza el lecho. El tanteo es correcto si la velocidad absoluta para ese diámetro es la primera de valor cero.

Se tanea $d_m = 0.020 \text{ m}$ (fraccionamiento N°3) como tamaño que inicia acorazamiento. El valor de la socavación indicada en la sección anterior vale: $h_s = 0.054 \text{ m}$. Se acepta $d_{65} = 0.065 \text{ m}$ (fraccionamiento N°4). Como consecuencia $K_s = 0.0325 \text{ m}$. Las partículas que son arrastradas deben moverse por sobre un nivel

$$y = K_s + \frac{d}{2}$$

Fraccionamiento 1 ($d_m = 0.0015$)

$$y_1 = 0.0325 + 0.0015/2 = 0.0332$$

$$\beta_1 = \frac{\log(30.2 \times 0.0332/0.0325)}{\log(12.27 \times 0.85/0.0325)} = 0.594$$

$$U_1 = 0.594 \times 2.77 - 14.72 \sqrt{d_e} = 1.076 \quad U_{1m} = 0.538 \text{ m/s}$$

Fraccionamiento 2 ($d_m = 0.0065$)

$$y_2 = 0.0325 + 0.0065/2 = 0.0357$$

$$\beta_2 = 0.607 \quad U_2 = 0.493 \text{ m/s} \quad U_{2m} = 0.246 \text{ m/s}$$

$$U_3 = 0$$

$$\Delta q_1 = 0.10 \times 0.054 \times 1.8 \times 0.538 = 0.0052$$

$$\Delta q_2 = 0.16 \times 0.054 \times 1.8 \times 0.246 = 0.0038$$

$$q_s = 0.0090 \text{ ton/seg/m.}$$

$$Q_s = 29.5 \times 0.0090 = 0.2655 \text{ ton/seg.}$$

$$Q_{sd} = 86.400 Q_s = 22.939 \text{ ton/día}$$

$$Q = 217.1 \text{ m}^3/s \text{ (} b = 32 \text{ m)}$$

Acorazamiento a partir de fraccionamiento 4, $d_m = 0.065$

$$h_s = 0.15 \text{ m} \quad d_{65} = 0.15 \text{ m} \quad K_s = 0.075 \text{ m}$$

$$\text{Fracc. 1} \quad \beta_1 = 0.628 \quad U_1 = 2.426 \quad U_{1m} = 1.213 \text{ m/s}$$

$$\text{Fracc. 2} \quad \beta_2 = 0.633 \quad U_2 = 1.831 \quad U_{2m} = 0.916$$

$$\text{Fracc. 3} \quad \beta_3 = 0.649 \quad U_3 = 1.010 \quad U_{3m} = 0.505$$

$$q_s = 0.100 \quad Q_{sd} = 276.480 \text{ ton/día}$$

$$Q = 119.3 \text{ m}^3/s \text{ (} b = 31 \text{ m)}$$

Acorazamiento a partir de fraccionamiento 4, $d_m = 0.065 \text{ m}$

$$h_s = 0.15 \text{ m} \quad d_{65} = 0.15 \text{ m} \quad K_s = 0.075 \text{ m.}$$

Fracc. 1	$\beta_1 = 0.660$	$U_1 = 1.760$	$U_{1m} = 0.880$ m/s
Fracc. 2	$\beta_2 = 0.665$	$U_2 = 1.160$	$U_{2m} = 0.580$ "
Fracc. 3	$\beta_3 = 0.681$	$U_3 = 0.326$	$U_{3m} = 0.163$ "

$$q_s = 0.058 \quad Q_{sd} = 155.347 \text{ ton/día}$$

$$Q = 30.4 \text{ m}^3/\text{s} \quad (b = 27 \text{ m})$$

Acorazamiento a partir de fraccionamiento 2, $d_m = 0.0065$
 $h_s = 0.021 \text{ m}$, $d_{65} = 0.065 \text{ m}$, $K_s = 0.0325 \text{ m}$

Fracc. 1	$\beta_1 = 0.637$	$U_1 = 0.640$	$U_{1m} = 0.320$ m/s
----------	-------------------	---------------	----------------------

$$q_s = 0.0012 \quad Q_{sd} = 2.800 \text{ ton/día}$$

$$Q_s = 12.9 \text{ m}^3/\text{s} \quad (b = 20 \text{ m})$$

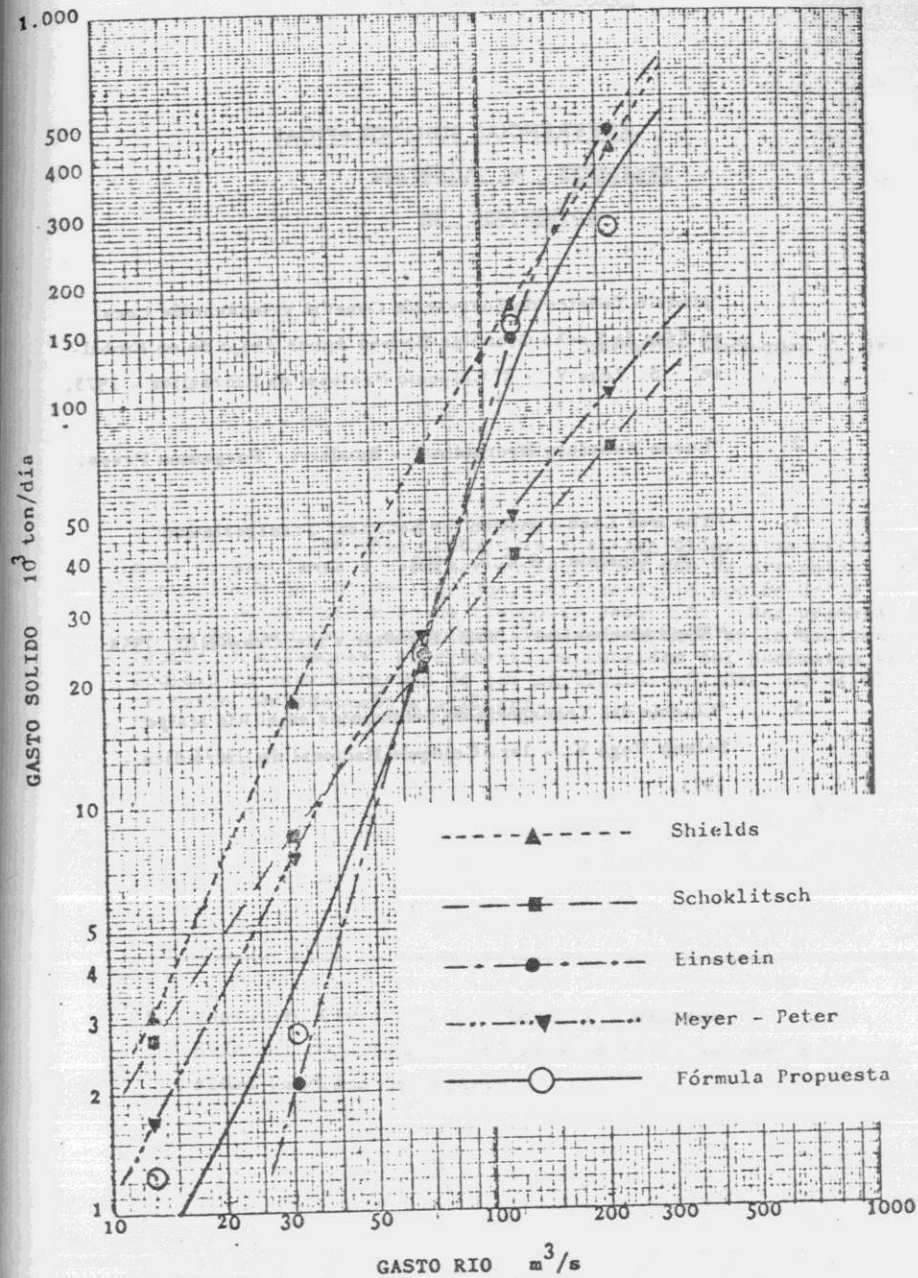
Acorazamiento a partir de fraccionamiento 2, $d_m = 0.0065$
 $h_s = 0.021 \text{ m}$, $d_{65} = 0.065 \text{ m}$, $K_s = 0.0325 \text{ m}$

Fracc. 1	$\beta_1 = 0.568$	$U_1 = 0.366$	$U_{1m} = 0.183$ m/s
----------	-------------------	---------------	----------------------

$$q_s = 0.0007 \quad Q_{sd} = 1.209 \text{ ton/día}$$

En figura 2 se reproduce gráfico de referencia 5 en que se presentan las funciones de arrastre para las fórmulas clásicas, y la función según esta teoría. Se aprecia que para valores bajo $100 \text{ m}^3/\text{s}$ da valores muy semejantes a Einstein. Para valores sobre $100 \text{ m}^3/\text{s}$ los resultados se asemejan al promedio de las cuatro curvas calculadas.

Fig. 2



REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. "Modelo Teórico de Socavación General y Socavación Local en Ríos de Lecho Granular Grueso Aguas Abajo de un Embalse" - S. Vega V. - 2° Coloquio Nacional de Hidráulica - 1973.
2. "Loose Boundary Hydraulics" - Raudkivi - Pergamon Press.
3. "The Bed Load Function for Sediment Transportation" - H. A. Einstein - S.C.S. 1950.
4. "Fluid Mechanics" - V.L. Streeter - Mc.Graw-Hill, 1958.
5. "Cálculo del Transporte de Sedimentos en el Río Maipo". - Solano Vega V. - 1er. Coloquio Nacional de Hidráulica - 1971.

CRITERIOS DE SEMEJANZA

EN SEDIMENTOS

Bernardo Domínguez C. (*)

En este trabajo se analizan diferentes criterios de semejanza a utilizar en fenómenos que se presentan en escurrimientos sólido-líquidos, utilizando la noción de la función de distribución de tiempo de retención. Una primera serie de resultados experimentales muestra que en la sedimentación en estanques, el criterio de igualdad del parámetro de localidad de sedimentación de las partículas sólidas, no es el criterio más adecuado a utilizar.

(*) Ingeniero Civil U.C. - Docteur Ingenieur
Jefe del Departamento de Obras Hidráulicas, de la Universidad Católica de Chile.