

REVISIÓN DE ECUACIONES QUE PREDICEN LA SOCAVACIÓN LOCAL ALREDEDOR DE PILAS DE PUENTE

Chandra Nalluri

Profesor Invitado
Departamento de
Ingeniería Civil y Ambiental

Juan G. Saldarriaga

Decano Asociado de Investigación y
Consultoría
Facultad de Ingeniería

Francisco Plata

Investigador
Departamento de
Ingeniería Civil y Ambiental

Resumen

Existen en la actualidad gran cantidad de métodos para estimar la socavación local alrededor de pilas de puente; algunos de estos se obtienen de información de campo y en su gran mayoría de datos de laboratorio. El presente estudio corrige algunos métodos encontrados en la literatura con datos de campo y los compara con correcciones hechas usando datos de laboratorio. Se proponen finalmente ecuaciones para el cálculo de la socavación deducidas con datos de campo, laboratorio y una mezcla de estas dos fuentes. El estudio resalta la baja relación existente entre los métodos obtenidos de observaciones de campo y los obtenidos de experimentación en el laboratorio.

INTRODUCCIÓN

Smith (1976) estudió el caso de 143 fallas de puentes de las que aproximadamente el 50% ocurrieron debido a la socavación local alrededor de sus pilas.

La magnitud del problema ha motivado a muchos investigadores a encontrar ecuaciones que permitan diseñar la cimentación de los puentes que cruzan ríos de una manera segura, evitando sobredimensionarla. En la actualidad los diseñadores encuentran infinidad de métodos para determinar la profundidad de socavación.

Estos métodos sugieren diferentes parámetros como influyentes en el fenómeno mencionado, además de que la estructura de las ecuaciones propuestas difiere de manera importante. Algu-

nos estudios comparativos demuestran que la variabilidad en los cálculos de los diferentes métodos es muy alta. Otros estudios obtienen ecuaciones de datos de laboratorio, donde no se sabe si su aplicación a los casos de campo producirán predicciones aceptadas. Algunas ecuaciones han sido obtenidas de mediciones de campo, que no es una solución definitiva ya que al comparar métodos de diferentes fuentes se encuentran marcadas diferencias.

En el presente artículo se corrigen algunas ecuaciones encontradas en la literatura, variando las constantes y los exponentes de tal forma que se ajusten con las mismas variables propuestas por los autores a algunos datos de campo y

de laboratorio. Igualmente se plantean algunas diferencias entre posibles ecuaciones de cálculo obtenidas de datos de campo, de laboratorio y grupos resultantes de la mezcla de datos de campo y laboratorio.

BASE DE DATOS

Para el presente análisis se utilizaron algunos datos de campo medidos principalmente en puentes ubicados en la India recopilados por Kafi y Alam (1995); adicionalmente se usaron datos de laboratorio obtenidos de proyectos de grado realizados en la Universidad de los Andes (Santafé de Bogotá - Colombia). Dichos estudios de laboratorio se llevaron a cabo en umbral de movimiento y para diferentes formas de pilas probadas individualmente. Los datos de campo no presentan la condición de transporte de sedimentos de los ríos de donde fueron obtenidos. En la tabla 1 (datos de campo) y en la tabla 2 (datos de laboratorio) se presentan las principales estadísticas por variable de la información de la base de datos utilizada para el presente estudio.

RESUMEN DE ALGUNOS MÉTODOS PROPUESTOS

A continuación se presentan 18 métodos que calculan la socavación local en pilas de puente, obtenidos tanto de campo como de laboratorio y que se reportan en la literatura.

BASAK ET-AL (1975)

$$d_s = 0.558b^{0.586} \quad (1)$$

Donde d_s es la profundidad de socavación medida desde el nivel medio del lecho y b el ancho de la pila. La ecuación se obtuvo de datos de laboratorio en condiciones de agua clara (no hay movimiento del lecho) y para pilas rectangulares.

NORMAN (1975)

$$d_s = 1.5b^{0.7}y^{0.3} \quad (2)$$

La ecuación se obtuvo de datos de campo (algunos puentes en Alaska) en transporte generalizado de sedimentos.

BLENCH (1965)

$$\frac{D_s}{y_r} = 1.8 \left(\frac{b}{y_r} \right)^{1/4} \quad (3)$$

Estadística	b(cm)	D(mm)	V(m/s)	y(cm)	Q(m ³ /s)	q(m ² /s)	Fr	D _s (cm)	d _s (cm)
Valor mínimo	150	0.1	1.19	206	68.72	2.61	0.17	400	123
Valor máximo	1127	7.03	8	1836	63763	108.621	1.78	3567	701
Promedio	383.48	0.59	2.08	674.86	6236.63	14.92	0.29	1256.92	445.83
Desviación estándar	223.01	1.08	1.40	386.32	12301.86	17.70	0.27	644.35	222.19

TABLA 1.

Resumen de los datos de campo (45 datos) utilizados en el estudio.

Estadística	b(cm)	D(mm)	V(m/s)	y(cm)	Q(m ³ /s)	q(m ² /s)	Fr	d _s (cm)
Valor mínimo	2.1	0.51	0.06	3.3	0.01	0.01	0.05	0.5
Valor máximo	7.62	1.58	0.47	30.96	0.09	0.08	0.7	7.14
Promedio	4.55	0.80	0.17	18.16	0.03	0.02	0.16	3.73
Desviación estandar	2.03	0.22	0.11	7.58	0.01	0.01	0.15	1.85

TABLA 2.

Resumen de los datos de laboratorio (134 datos) utilizados en el estudio.

Donde $y_r = 1.48 \sqrt[3]{\frac{q^2}{f_b}}$ es la profundidad de flujo del régimen;

$f_b = \sqrt{D}$, debe calcularse con D en mm; q, el caudal por unidad de ancho del canal; D, el diámetro medio de los sedimentos del lecho y D_s es la profundidad de socavación medida desde el nivel medio del flujo.

LAURSEN Y TOCH (MELVILLE 1975) - VERSIÓN I

$$d_s = 1.5b^{0.7}y^{0.3} \quad (4)$$

Donde y es la profundidad del flujo. La ecuación fue obtenida de datos de laboratorio y para pila rectangular.

LAURSEN Y TOCH (CALLANDER) (MELVILLE 1975) - VERSION II

$$\frac{d_s}{b} = 1.11 \left(\frac{y}{b} \right)^{1/2} \quad (5)$$

Esta ecuación es el resultado de la simplificación de Callander (Melville, 1975) a uno de los métodos propuestos por los autores en mención.

ARUNACHALAM (1965)

$$\frac{d_s}{y} = 1.95 \left(\frac{b}{y} \right)^{1/6} - 1 \quad (6)$$

La ecuación resulta de una modificación hecha a la ecuación de Poona (Poona Research Station, India).

HANCU (1971)

$$\frac{d_s}{b} = 2.42 (Fr_p)^{1/3} \quad (7)$$

Donde $Fr_p \left(= \frac{V}{\sqrt{gb}} \right)$ es el número de Froude de

la pila, V es la velocidad media del flujo y g es la aceleración de la gravedad. No se encontró información sobre esta ecuación en la literatura.

AHMAD (1962)

$$D_s = 1.486kq^{2/3} \quad (8)$$

Donde k es una constante. La ecuación se obtuvo de datos de laboratorio en Pakistán.

SHEN (MELVILLE 1975) - VERSIÓN I

$$\frac{d_s}{b} = 11 \left(\frac{y}{b} \right) Fr^2 \quad (9)$$

Donde Fr es el número de Froude del flujo. La ecuación fue obtenida con datos de laboratorio.

SHEN (MELVILLE 1975) - VERSIÓN II

$$\frac{d_s}{b} = 3.4 (Fr_p)^{0.66} \quad (10)$$

La ecuación se obtuvo con datos de laboratorio.

INGLIS (1949)

$$D_s = 0.946 \left(\frac{Q}{f} \right)^{1/3} \quad (11)$$

Donde, $f = 1.76 \sqrt{D}$, D en mm, es el factor de Lacey y Q es el caudal que fluye por el canal. La ecuación fue obtenida de datos de campo.

INGLIS ET - AL (1942)

$$\frac{D_s}{b} = 2.32 \left(\frac{q}{b} \right)^{0.78} \quad (12)$$

Esta ecuación es el resultado de las pruebas realizadas en el modelo de Poona Research Station, India.

JAIN (1981)

$$\frac{d_s}{b} = 1.84 \left(\frac{y}{b} \right)^{0.3} Fr^{0.25} \quad (13)$$

La ecuación se obtuvo de datos de laboratorio y para la condición de umbral de movimiento.

SHEN (1969) - VERSIÓN III

$$d_s = 0.00022 \cdot Re_p^{0.619} \quad (14)$$

Donde $Re_p = \frac{V \left(\frac{b}{2} \right)}{\nu}$ es el número de Reynolds

de la pila. Shen dedujo la ecuación de datos de laboratorio. Se recomienda para la condición de agua clara (umbral).

FROEHLICH (1991)

$$d_s = 0.32b^{0.62} y^{0.47} Fr^{0.22} D^{-0.09} + B \quad (15)$$

Donde B es un factor de seguridad. La ecuación se obtuvo de datos de campo bajo transporte generalizado de sedimentos.

RICHARDSON ET - AL (CSU - COLORADO STATE UNIVERSITY 1993)

$$\frac{d_s}{y} = 2k \left(\frac{y}{b} \right)^{0.35} Fr^{0.43} \quad (16)$$

Donde k es una constante que depende de la forma de la pila y de la dirección del flujo con respecto a la misma. La ecuación se obtuvo de datos de laboratorio para pilas circulares.

JOHNSON (1992)

$$\frac{d_s}{y} = 1.82 \left(\frac{b}{y} \right)^{0.98} Fr^{0.21} \quad (17)$$

La ecuación se obtuvo de datos de laboratorio.

AB GHANI Y NALLURI (1996B)

$$\frac{d_s}{D} = 1.46 \left(\frac{b}{D} \right)^{0.97} \left(\frac{y}{b} \right)^{0.52} \left(\frac{Q}{by\sqrt{gy}} \right)^{0.24} \quad (18)$$

La ecuación fue obtenida de datos de campo de algunos puentes de la india.

CORRECCIÓN DE LAS ECUACIONES CON LOS DATOS DE CAMPO

Mediante el uso del paquete estadístico SPSS 5.0.1 para Windows (1992) se ajustaron las ecuaciones presentadas anteriormente a algunos datos de campo. Se variaron los factores y potencias manteniendo la estructura original de cada método. En la tabla 3 se presentan estas variaciones junto con la correlación (R^2) para las diferentes ecuaciones corregidas.

MEJORES ECUACIONES CORREGIDAS PARA LOS DATOS DE LABORATORIO

En la tabla 4 se presentan las ecuaciones modificadas con los datos de laboratorio. Sólo se muestran los métodos con correlaciones mayores a 0.5.

MEJOR ECUACIÓN PARA LOS DATOS DE LABORATORIO

En la tabla 4 se encuentra que las ecuaciones de mejor comportamiento son las de Johnson (ecuación 17) y Richardson et - al (ecuación 16) que corregidas toman la siguiente forma:

$$\frac{d_s}{y} = 2.153 \left(\frac{b}{y} \right)^{0.56} Fr^{0.72} \quad (19)$$

con $R^2 = 0.884$

Si a la anterior ecuación se le adiciona el

término $\left(\frac{b}{D} \right)$ la correlación (R^2) se aumenta a

0.932, obteniendo la siguiente expresión:

$$\frac{d_s}{y} = 0.376 \left(\frac{b}{y} \right)^{0.315} Fr^{1.26} \left(\frac{b}{D} \right)^{0.57} \quad (20)$$

con $R^2 = 0.932$

AUTOR	ECUACIÓN GENERAL	ECUACIÓN MODIFICADA	CORRELACIÓN R ²
BASAK ET-AL	$d_s = 0.558b^{0.586}$	$d_s = 2.063b^{0.740}$	0.47
NORMAN	$d_s = 3b^{0.8}$	$d_s = 2.063b^{0.740}$	0.47
BLENCH	$\frac{D_s}{y_r} = 1.8 \left(\frac{b}{y_r}\right)^{1/4}$	$\frac{D_s}{y_r} = 1.97 \left(\frac{b}{y_r}\right)^{0.275}$	0.472
LAURSEN Y TOCH I	$d_s = 1.5b^{0.7}y^{0.3}$	$d_s = 1.027b^{0.55}y^{0.513}$	0.7109
LAURSEN Y TOCH II (CALLANDER)	$\frac{d_s}{b} = 1.11 \left(\frac{y}{b}\right)^{1/2}$	$\frac{d_s}{b} = 1.15 \left(\frac{y}{b}\right)^{0.45}$	0.447
ARUNACHALAM	$\frac{d_s}{y} = 1.95 \left(\frac{b}{y}\right)^{1/6} - 1$	$\frac{d_s}{y} = 1.4 \left(\frac{b}{y}\right)^{0.42} - 0.24$	0.4547
HANCU	$\frac{d_s}{b} = 2.42 (Fr_p)^{1/3}$	$\frac{d_s}{b} = 2.22 (Fr_p)^{0.165}$	0.2265
AHMAD	$D_s = 1.486kq^{2/3}$	$D_s = 3.98q^{0.45}$	0.6203
SHEN VERSIÓN I	$\frac{d_s}{b} = 11 \left(\frac{y}{b}\right) Fr^2$	$\frac{d_s}{b} = 1.53 \left(\frac{y}{b}\right)^{0.46} Fr^{0.2}$	0.507
SHEN VERSIÓN II	$\frac{d_s}{b} = 3.4 (Fr_p)^{0.66}$	$\frac{d_s}{b} = 2.22 (Fr_p)^{0.33}$	0.226
INGLIS-LACEY	$D_s = 0.946 \left(\frac{Q}{F}\right)^{1/3}$	$D_s = 1.204 \left(\frac{Q}{F}\right)^{0.288}$	0.7381
INGLIS- POONA	$\frac{D_s}{b} = 2.32 \left(\frac{q}{b}\right)^{0.78}$	$\frac{D_s}{b} = 2.08 \left(\frac{q}{b}\right)^{0.434}$	0.7413
JAIN	$\frac{d_s}{b} = 1.84 \left(\frac{y}{b}\right)^{0.3} Fr^{0.25}$	$\frac{d_s}{b} = 1.53 \left(\frac{y}{b}\right)^{0.466} Fr^{0.2}$	0.507
SHEN – VERSION III	$d_s = 0.00022 Re_p^{0.619}$	$d_s = 0.00098 Re_p^{0.577}$	0.4727
FROEHLICH	$d_s = 0.32b^{0.62}y^{0.47}Fr^{0.22}D^{-0.09}+B$	$d_s = 0.735b^{0.58}y^{0.5}Fr^{0.2}D^{-0.074}$	0.726
RICHARDSON ET – AL	$\frac{d_s}{y} = 2k \left(\frac{y}{b}\right)^{0.35} Fr^{0.43}$	$\frac{d_s}{y} = 1.52 \left(\frac{y}{b}\right)^{0.46} Fr^{0.23}$	0.527
JOHNSON	$\frac{d_s}{y} = 1.82 \left(\frac{b}{y}\right)^{0.98} Fr^{0.21}$	$\frac{d_s}{y} = 1.52 \left(\frac{y}{b}\right)^{0.46} Fr^{0.23}$	0.527

AUTOR	ECUACIÓN GENERAL	ECUACIÓN MODIFICADA	CORRELACIÓN R ²
AB GHANI Y NALLURI	$\frac{d_s}{D} = 1.46 \left(\frac{b}{D}\right)^{0.97} \left(\frac{y}{b}\right)^{0.52} \left(\frac{Q}{b\sqrt{gy^3}}\right)^{0.24}$	$\frac{d_s}{D} = 0.08 \left(\frac{b}{b}\right)^{1.264} \left(\frac{y}{b}\right)^{0.53} \left(\frac{Q}{\sqrt{gy^3}}\right)^{0.027}$	0.8

TABLA 3

Ajuste de las ecuaciones de la literatura con los datos de campo

AUTOR	ECUACIÓN GENERAL	ECUACIÓN MODIFICADA	CORRELACIÓN R ²
RICHARDSON ET - AL	$\frac{d_s}{y} = 2k \left(\frac{y}{b}\right)^{0.35} Fr^{0.43}$	$\frac{d_s}{y} = 2.153 \left(\frac{b}{y}\right)^{0.56} + Fr^{0.72}$	0.884
JOHNSON	$\frac{d_s}{y} = 1.82 \left(\frac{b}{y}\right)^{0.98} Fr^{0.21}$	$\frac{d_s}{y} = 2.153 \left(\frac{b}{y}\right)^{0.56} Fr^{0.72}$	0.884
JAIN	$\frac{d_s}{b} = 1.84 \left(\frac{y}{b}\right)^{0.3} \cdot Fr^{0.25}$	$\frac{d_s}{b} = 1.74 \left(\frac{y}{b}\right)^{0.613} \cdot Fr^{0.674}$	0.58
AB GHANI Y NALLURI	$\frac{d_s}{D} = 1.46 \left(\frac{b}{D}\right)^{0.97} \left(\frac{y}{b}\right)^{0.52} \left(\frac{Q}{b\sqrt{gy^3}}\right)^{0.24}$	$\frac{d_s}{D} = 0.1018 \left(\frac{b}{D}\right)^{1.17} \left(\frac{y}{b}\right)^{0.47} \left(\frac{Q}{b\sqrt{gy^3}}\right)^{0.67}$	0.638
ARUNACHALAM	$\frac{d_s}{y} = 1.95 \left(\frac{b}{y}\right)^{1/6} - 1$	$\frac{d_s}{y} = 1.27 \left(\frac{b}{y}\right)^{1.9} + 0.11$	0.632
SHEN VERSIÓN I	$\frac{d_s}{b} = 11 \left(\frac{y}{b}\right) Fr^2$	$\frac{d_s}{b} = 1.74 \left(\frac{y}{b}\right)^{0.613} Fr^{0.67}$	0.576

TABLA 4

Ajuste de las ecuaciones de la literatura con los datos de laboratorio.

En la figura 1 se observa la relación entre los datos observados y los calculados con la ecuación 20.

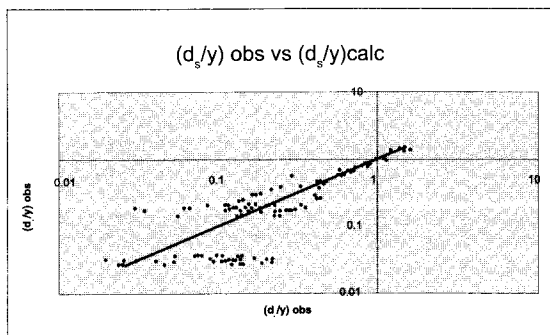


Figura 1.

Comparación entre los datos observados de laboratorio y los calculados con la ecuación 20

MEJOR ECUACIÓN PARA LOS DATOS DE CAMPO

Se partió entonces de la ecuación de Ab Ghani y Nalluri (ecuación 18) de donde se observó que variando el número de Froude de la pila por el del flujo, se aumenta levemente la correlación de 0.8 a 0.813. De esta variación se obtiene la siguiente ecuación:

$$\frac{d_s}{D} = 0.2027 \left(\frac{y}{b}\right)^{0.5} Fr^{0.187} \left(\frac{b}{D}\right)^{1.208} \quad (21)$$

con R²=0.813

En la figura 2 se aprecia la relación de los datos calculados con los datos observados.

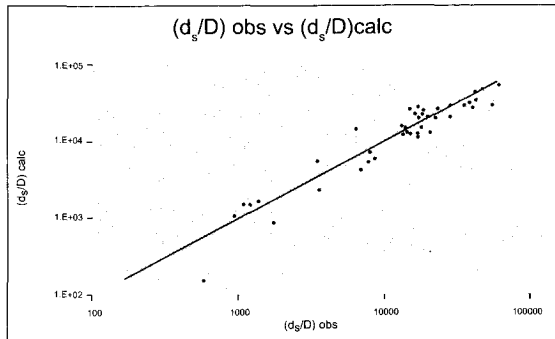


Figura 2.

Comparación entre los datos observados de campo y los calculados con la ecuación 21

MEJOR ECUACIÓN PARA LOS DATOS MEZCLADOS

Las ecuaciones representativas de los datos de campo (ecuación 21) y de los datos de laboratorio (ecuación 20) fueron probadas con datos de laboratorio y datos de campo respectivamente arrojando pobres correlaciones ($R^2 < 0.1$) en ambos casos.

Finalmente al mezclar los datos de laboratorio con los datos de campo (usando la mitad de cada grupo, dejando las otras mitades para comprobación de los resultados) se obtuvo la siguiente ecuación.

$$\frac{d_s}{D} = 0.1176 \left(\frac{y}{b} \right)^{0.538} Fr^{0.126} \left(\frac{b}{D} \right)^{1.25} \quad (22)$$

con $R^2(\text{obtenido})=0.8956$

Cuando la ecuación fue revisada con la otra mitad de los datos (laboratorio y campo mezclados, ver figura 3) se alcanzó un alto coeficiente de correlación $R^2 (= 0.962)$. Sin embargo, cuando la ecuación se prueba con toda la base de datos (mezclada) la correlación se reduce significativamente a $R^2 = 0.92$ (ver figura 4).

Para el cálculo de las ecuaciones 20, 21 y 22 no se hizo diferenciación ni en la forma de la pila, ni en el tipo de transporte de sedimentos en el que se encontró el lecho.

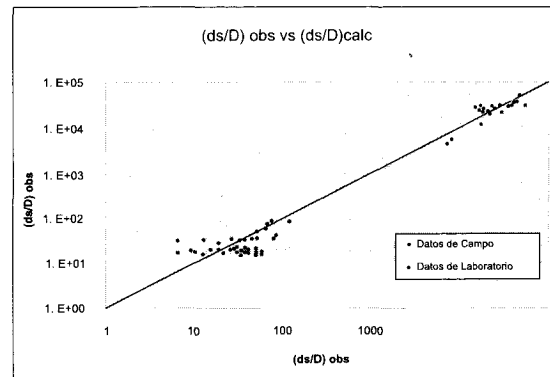


Figura 3.

Comparación de los datos observados de campo y de laboratorio con los calculados con la ecuación 22

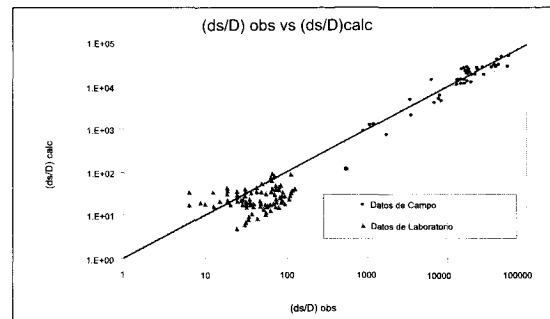


Figura 4.

Comparación de los datos observados de campo y de laboratorio con los calculados con la ecuación 22 usando toda la base de datos.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

La aplicación de la base de datos arrojó bajas correlaciones en la mayoría de las ecuaciones reportadas en la literatura exceptuando unas pocas (ecuaciones 4, 11, 12, 15 y 18 con $R^2 > 0.5$ – ver tablas 1 y 2).

Las ecuaciones que mejor correlación presentan para la corrección con los datos de laboratorio, Richardson et al (ecuación 16) y Johnson (ecuación 17), contienen los números adimensionales $\left(\frac{b}{y} \right)$ y Fr . En algunos casos también se encuentran

los números $\left(\frac{b}{D} \right)$ y $\left(\frac{D}{y} \right)$. Cuando se utilizan los datos de campo las fracciones adimensionales que contienen Q (caudal) ó q (caudal por unidad de ancho del canal) parecen relevantes (empleados principalmente en las ecuaciones basadas en el régimen), mientras que relaciones

adimensionales como el número de Froude de la pila, el número de Reynolds de la pila, al igual que $\left(\frac{d_s}{b}\right)$ ó $\left(\frac{d_s}{y}\right)$, no se acoplan adecuadamente.

La relación $\left(\frac{d_s}{y}\right)$ se encuentra muy influyente en el análisis de los datos de laboratorio, mientras la relación $\left(\frac{d_s}{D}\right)$ lo es para los datos de campo. La experimentación en el laboratorio no permitió una gran variabilidad en los valores del diámetro medio del sedimento del lecho, diferente a lo que se puede detectar en las observaciones de campo. Aparece latente el problema que acarrea las ecuaciones obtenidas de observaciones experimentales en laboratorios. Sin embargo, dichas ecuaciones representan correctamente los casos de campo cuyas condiciones son muy similares a las de laboratorio en las que fueron obtenidas.

Cuando se comparan las ecuaciones ajustadas a los datos de campo y de laboratorio, la correlación obtenida para el primer caso es más alta que para el segundo. Esto ocurre a pesar de que los datos de laboratorio son aproximadamente tres veces los datos de campo. Es posible que este efecto se produzca por la baja variabilidad anteriormente mencionada de los parámetros en los datos de laboratorio, contrario a lo que ocurre con los datos de campo.

Es muy clara la similitud existente entre las ecuaciones 21 y 22, tanto en su estructura matemática como en sus factores y potencias. La ecuación 20 aunque utiliza las mismas variables, difiere de las ecuaciones 21 y 22 considerablemente.

Las figuras 3 y 4 muestran los datos (mezclados) calculados contra los observados usando la ecuación 22. Se puede observar que los datos de campo en general muestran una mejor tendencia. Los datos de laboratorio parecen subestimar lo observado mientras que los de campo lo hacen en menor grado; en la figura 4 (usando la ecuación 22 con todos los datos) esta característica es más notable.

CONCLUSIONES

En general las ecuaciones encontradas con datos de laboratorio no predijeron adecuadamente las profundidades de socavación observadas en el campo,

similarmente los datos de campo no se acoplaron bien a las ecuaciones obtenidas con datos de laboratorio.

En las tres ecuaciones encontradas en el presente estudio, al igual que los métodos de la literatura que corregidos arrojan las más altas correlaciones, presentan los siguientes parámetros como influyentes en el fenómeno estudiado: el ancho de la pila (b), la profundidad del flujo (y), el número de Froude del flujo (Fr) y el diámetro medio de los sedimentos del lecho (D).

Las ecuaciones 20, 21 y 22 sugieren que los datos de campo y los de laboratorio funcionan mejor como un complemento que como un suplemento.

La ecuación 22 muestra un mayor grado de confiabilidad que las otras dos (ecuaciones 20 y 21).

La subestimación de los datos observados por los calculados (usando la ecuación 22), ocurre en menor grado con los datos de campo que con los de laboratorio. Ver figura 4.

Ninguno de los métodos aquí descritos calcula la profundidad de socavación con una certeza tal que pueda asegurar la efectividad de la cimentación de la pila. De la correcta interacción entre los métodos aquí presentados y el criterio del ingeniero diseñador (experiencia) depende el éxito del puente diseñado.

AGRADECIMIENTOS

El primer autor aprecia las facilidades brindadas por la Universidad de los Andes, donde se encuentra en periodo sabático.

BIBLIOGRAFÍA

1. AB GHANI, A. and NALLURI, C., (1996a), "Prediction of Bridge Pier Scour", Proc. Second Malaysian Road Conference, pp. 425 - 428.
2. AB GHANI, A. and NALLURI, C., (1996b), "Development of Pier Scour Equations Using Field Data", proc 10 th IAHR - APD congress, Langkawi, Malaysia pp. 295 - 302.
3. ACOSTA, C. (1987), "Socavación Local en Pilas de Puente y Diseño de Estructuras Protectoras", Proyecto de Grado, Universidad de los Andes, Colombia.
4. AHMAD, M., (1962), "Discussion of Scour at Bridge Crossings", Trans. ASCE., Vol 127.
5. ARUNACHALAM, K. (1965), "Scour Around Bridge Piers", Journal of the Indian Roads Congress (No 2), pp. 189 - 210.
6. BASAK, V., BARSAMISLI, Y. and ERGUN, O., (1975), "Maximum Equilibrium Scour Depth Around Linear-Axis Square Cross Section Pier Groups (in Turkish), Devlet su isteri genel müdürlüğü", Rep. No 583, Ankara.

7. BLENCH, T., (1965), *Mobile Bed Fluviology*, University of Alberta Press.
8. FLECHAS, G. (1992), "Estudio de la Influencia del Material granular en la Socavación Local Alrededor de las Pilas de Puente", Proyecto de grado, Universidad de los Andes, Colombia.
9. FROEHLICH, D. C. (1991), "Analysis of Onsite Measurements of Scour at Piers", Proceedings of the ASCE National Hydraulic Engineering Conference, Colorado Spring, CO.
10. GUTIÉRREZ, B. (1989), "Efectos de la Separación en Pilas de Puente y su Influencia en la Socavación local", Proyecto de Grado, Universidad de los Andes, Colombia.
11. HANCU, S. (1971), "Sur le Calcul des Affouillements Locaux dans la Zone des Piles De ponts", Proc. 14 th IAHR Congress, France, Vol 3, pp. 299 - 313.
12. INGLIS, S. C. (1949), *The Behavior and Control of Rivers and Canals*, Chapter 8, C. P. I. N., Research Station Poona, Res. Publ. 13.
13. INGLIS, S. C. THOMAS, A. R. and TOGLEKAR, D. V. (1942), "The Protection of Bridge Piers Against Scour", India, Central Irrigation and Hydrodynamic Research Stn. Poona, Research Publ. No 5.
14. INSTITUTO NACIONAL DE VIAS (INVIAS - COLOMBIA) (1996), *Socavación y Protección contra Socavación en Puentes*, Ministerio de Transporte, Colombia.
15. JAIN, S. C. (1981), "Maximum Clear Water Scour Around Circular Piers", Journal of the Hydraulic Division, ASCE, Vol 107, No HY5, pp 611 - 626.
16. JOHNSON, P. A. (1992), "Reliability-Based Pier Scour Engineering", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 121, No 8, pp 626 - 629.
17. KAFI, M. and ALAM, J. (1995), "Modification of Local Scour Equations", Journal of the Institution of Engineers (India), Vol 76, No 5, pp 25-28.
18. MANJARRES, F. (1996), "Socavación en Pilas de Puente. Diseño de Estructuras Protectoras", Proyecto de Grado, Universidad de los Andes, Colombia.
19. MELVILLE, B. W. (1975), "Scour at Bridge Sites", University of Auckland, Report No 104, Auckland, New Zealand
20. NORMAN, V. W. (1975), "Scour at selected Bridge Sites in Alaska", U. S. Geol. Survey Water Resources Div., Anchorage, Alaska.
21. PLATA, F. J. (1998), "Estudio de Diferentes Métodos que Estiman la Socavación Local en Pilas de Puente", Proyecto de Grado, Universidad de los Andes, Colombia.
22. RICHARDSON, E. V., HARRISON, L. J., RICHARDSON, J. R. and DAVIS, S. R., (1993), "Evaluating Scour at Bridges", Hydraulic Engineering Circular 18. Publication FHWA-IP-90-017. Federal Highway Administration.
23. SHEN, H. W., SHNEIDER, V. R. and KARAKI, S., (1969), "Local Scour Around Bridge Piers", Proc. ASCE, 95, (HY6), pp. 1919 - 1940.
24. SMITH, D.W., (1976), *Bridge Failures, Proceedings* Institution of Civil Engineers, pp. 367-382.
25. VOLPI, A., (1988), "Criterio de Cálculo de Parámetros Geométricos que Afectan la Socavación Local en las Pilas de Puente", Proyecto de Grado, Universidad de los Andes, Colombia.

NOTACIÓN

Los siguientes símbolos son usados en este artículo:

$b =$ Ancho / diámetro de la pila

$D =$ Diámetro medio de los sedimentos del lecho

$d_s =$ Profundidad de socavación medida desde el nivel medio del lecho

$D_s =$ Profundidad de socavación medida desde el nivel medio del flujo

$f =$ Factor de Lacey

$Fr =$ Número de Froude del flujo

$Fr_p =$ Número de Froude de la pila

$g =$ Aceleración de la gravedad

$q =$ Caudal por unidad de ancho del canal

$Q =$ Caudal

$Re_p =$ Número de Reynolds de la pila

$V =$ Velocidad media del canal

$n =$ Viscosidad cinemática del fluido (agua)

$y =$ Profundidad del flujo

$y_r =$ Profundidad de flujo del régimen