

Estudio Comparativo de Ecuaciones que Predicen la Socavación Local en Pilas de Puentes con Datos de Campo y Laboratorio

Comparative Study of Equations to Predict the Bridge Piers Local Scour with Field and Laboratory Data

Moncada, Alix

Centro de Investigaciones Hidráulicas y Mecánica de Fluidos (CHIDRA),
Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela
alix@ula.ve

Resumen

En este estudio, diez ecuaciones fueron seleccionadas para el proceso de comparación usando datos de campo y laboratorio. En primer lugar, se estudió el efecto de la forma de la pila empleando datos experimentales. El estudio comparativo mostró que la ecuación de Su predice con gran precisión la socavación en pilas circulares, mientras que en pilas rectangulares y redondeadas la subestima. En el caso de pilas rectangulares, las ecuaciones de Laursen y Toch y de Ab Ghani y Nalluri predicen razonablemente bien la socavación. En pilas redondeadas, las ecuaciones de Shen et al. y de Johnson entregan resultados satisfactorios para la socavación. Se encuentra que la ecuación de Hancu, en cualquiera de los casos, no es recomendable para predecir la socavación. Luego, usando datos de campo y laboratorio, para pilas circulares, se encontró que las ecuaciones de Hancu y Melville sobreestiman en gran medida la profundidad de socavación. La ecuación de Breusers et al. muestra gran dispersión en los puntos. Esto conduce a grandes errores de predicción. Las ecuaciones de Ab Ghani y Nalluri, CSU y Jain y Fisher predicen con gran precisión las profundidades de socavación de laboratorio y campo. Las ecuaciones de Laursen y Toch y de Johnson entregan también buenos resultados, pero sobreestiman en mayor proporción la socavación en algunos flujos. Para los datos de campo analizados, la mayoría de las fórmulas sobreestiman la socavación, mientras que la ecuación de Shen et al. la subestima.

Palabras clave: Socavación local, pilas de puente, fórmulas de socavación, comparación de ecuaciones, pruebas estadísticas.

Abstract

In this study, ten formulae were selected for the comparison process using field and laboratory data. First, the effect of the pier shape was studied using laboratory data. The comparative study showed that the Su equation predicts with high precision the scour depth in circular piers, while in rectangular and round piers underestimates it. In case of rectangular piers, the Laursen and Toch and the Ab Ghani and Nalluri equations predict well reasonably the scour. In round piers, the Shen et al. and the Johnson equations provide satisfactory results for scour. It was found that the Hancu equation is not recommended to predict the scour for any cases. Then, using field and laboratory data, for circular piers, it was found that the Hancu and the Melville formulae over-predict greatly the scour depth. The Breusers et al. equation shows great dispersion in the points. This leads to high prediction errors. The Ab Ghani and Nalluri, CSU and the Jain and Fisher formulae predict with high precision the experimental and field scour depths. The Laursen and Toch and the Johnson equations give also good results, but they appeared to over-predict with greater proportion the scour in some flows. For the analyzed field data, the majority of formulae over-predict the scour, while the Shen et al. formula under-predicts it.

Keywords: Local scour, bridge piers, scour equations, comparison of equations, statistical tests.

1 Introducción

Muchos puentes han fallado en todo el mundo debido a la socavación extrema alrededor de pilas y estribos. La falla de puentes debido a la socavación causa pérdidas económicas y, en algunos casos, la pérdida de vidas humanas. Una predicción aproximada de la profundidad de socavación en pilas es esencial para el diseño seguro de la fundación del puente debido a que la subestimación puede conducir a la falla del puente y la sobreestimación conducirá a mayores costos en construcciones innecesarias. La magnitud del problema ha motivado a numerosos investigadores a desarrollar ecuaciones que permitan diseñar la fundación de los puentes de una manera segura, evitando sobredimensionarla. En los últimos 25 años se ha realizado una amplia investigación con el fin de desarrollar ecuaciones confiables para estimar la profundidad de socavación máxima y también para reducir el impacto de la socavación local sobre la estructura de puentes. Numerosas fórmulas para estimar la socavación local máxima sugieren diferentes parámetros que influyen en el fenómeno de socavación, y la estructura de las ecuaciones difiere de manera importante. Algunos estudios comparativos han mostrado la alta variabilidad en los cálculos de los diferentes métodos. La comparación de las diversas fórmulas permite mejorar la precisión en la predicción de la profundidad de socavación máxima en pilas de puentes e incrementar la confianza en el diseño del puente.

El propósito de este estudio es comparar diez de las ecuaciones más comúnmente usadas y citadas para estimar la socavación local en pilas de puentes. Inicialmente, para estudiar el efecto de la forma de la pila se usarán datos experimentales en pilas circulares, redondeadas y rectangulares obtenidos a partir de estudios previos de diversos investigadores y, posteriormente, se emplearán datos experimentales y de campo reportados en la literatura por otros autores para el caso de pilas circulares. Se llevarán a cabo varias pruebas estadísticas para determinar la ecuación con los mínimos errores de predicción.

2 Antecedentes

Jain (1981) comparó varios predictores potenciales de la profundidad de socavación máxima en agua clara con datos experimentales. Encontró que la fórmula de Laursen y Toch en 1956 fue la de mayor predicción entre las comparadas, cuando incluyó todos los datos y era la que menos sobreestimaba la profundidad de socavación en comparación con otras fórmulas.

Johnson (1995) estudió comparativamente siete ecuaciones de socavación en pilas de puentes usando un amplio banco de datos de campo. Los resultados apuntaron a la necesidad de una investigación adicional sobre el proceso de socavación para los casos en los cuales las

velocidades del flujo están cerca de la velocidad crítica y para pilas anchas en agua relativamente poco profunda.

Nalluri y col., (1998) corrigieron algunas ecuaciones variando las constantes y los exponentes de tal forma que se ajustaran con las mismas variables propuestas por los autores a algunos datos de campo y de laboratorio. Presentaron una revisión de 18 métodos que calculan la socavación local en pilas de puente, obtenidos tanto de campo como de laboratorio. Concluyeron que, en general, las ecuaciones obtenidas con datos de laboratorio no predicen adecuadamente las profundidades de socavación observadas en el campo. Encontraron que las ecuaciones que arrojan las más altas correlaciones presentan como parámetros influyentes el ancho de la pila, la profundidad del flujo, el número de Froude del flujo y el diámetro medio de los sedimentos del lecho.

Farias y col., (2004) estudiaron algunos métodos de amplia difusión a nivel mundial usando datos de socavación en pilas de puentes sobre ríos naturales compilados por Jones. Advirtieron que, en general, todas las fórmulas tienden a sobreestimar el valor de la socavación. Indicaron que, de las funciones analizadas, la que mejor se ajuste a los datos de campo en el rango de los parámetros típicos de ríos de llanura es la fórmula de Sheppard en 2003.

Mohamed y col., (2005) seleccionaron cuatro fórmulas para el proceso de validación usando datos de campo y de laboratorio. La comparación entre la profundidad de socavación calculada y la medida a partir de datos experimentales y de campo mostró que las fórmulas de Laursen y Toch y la de CSU entregan una predicción razonable, mientras que las fórmulas de Melville y Sutherland y la de Jain y Fisher parecen sobreestimar la profundidad de socavación.

3 Fórmulas de Socavación en Pilas de Puentes

La comparación de ecuaciones que predicen la profundidad de socavación local en pilas de puentes permite determinar cuál de las fórmulas entregará una predicción razonable de la socavación. Aquí se presentan diez de las fórmulas de socavación más comúnmente usadas para calcular la socavación local en pilas de puentes, obtenidas tanto de campo como de laboratorio y que se reportan en la literatura. Según Johnson (1995), la ecuación de socavación en pilas más comúnmente usada en los Estados Unidos es la fórmula CSU (HEC-18) dada por

$$\frac{Y_s}{y} = 2 K_1 K_2 \left(\frac{b}{y} \right)^{0.65} F^{0.43} \quad (1)$$

en la cual Y_s es la profundidad de socavación, y es la profundidad del flujo aguas arriba de la pila, K_1 es el factor de corrección que depende de la forma de la nariz de la pila: $K_1 = 1.1$ para nariz cuadrada y $K_1 = 1$ para circular y

redondeada, K_2 es el factor de corrección para el ángulo de ataque del flujo: $K_2 = 1$ para un ángulo de 0° , b es el diámetro o ancho característico de la pila y F es el número de Froude aguas arriba de la pila. La Ec. (1) fue desarrollada a partir de datos de laboratorio y se recomienda para condiciones de fondo vivo y agua clara. Se recomienda que el valor límite de Y_s/y sea de 2.4 para $F \leq 0.8$ y 3.0 para $F > 0.8$.

Según refieren Farias y col., (2004), la ecuación de Melville se desarrolló en 1997 con base en una extensa experimentación de laboratorio. La fórmula está dada por

$$Y_s = K_1 K_d K_y K_\alpha K_F \quad (2)$$

donde K_1 es el factor de intensidad del flujo, K_d es el factor en función del tamaño del sedimento, K_y es el factor de profundidad del flujo, K_α es el factor de alineación de la pila y K_F es el factor de forma de la pila. El factor K_1 es función de la velocidad de aproximación relativa a la velocidad crítica. Para condiciones de lecho vivo ($V/V_c > 1$) $K_1 = 1$, mientras que para la de agua clara ($V/V_c < 1$) $K_1 = V/V_c$, donde V es la velocidad y V_c es la velocidad crítica. Con relación al factor que depende del tamaño del sedimento K_d , en realidad lo que se compara es la relación entre el tamaño del sedimento y el ancho de la pila. Según Farias et al. (2004), para $b/D > 25$ (sedimento relativamente fino) $K_d = 1$, mientras que para $b/D < 25$ (sedimento grueso), Melville propone que: $K_d = 0.57 \log(2.24(b/D))$, en las cuales D es el diámetro medio del sedimento. El factor K_y tiene dimensiones de longitud. Para este factor, Melville propone: 1) Para $b/y < 0.7$, $K_y = 2.4 b$, 2) Para $0.7 < b/y < 5$, $K_y = 2(yb)^{0.5}$ y 3) Para $b/y > 5$, $K_y = 4.5y$. Los valores de los factores K_α y K_F se obtienen a partir de ecuaciones o gráficos (Melville y Coleman en 2000).

Según Johnson (1995), Jain y Fischer en 1979 desarrollaron una serie de ecuaciones basadas en experimentos de laboratorio. Para $(F - F_c) > 0.2$

$$Y_s = 2.0 b (F - F_c)^{0.25} \left(\frac{y}{b}\right)^{0.5} \quad (3)$$

donde F_c es el número de Froude crítico $F_c = V_c/(g y)^{0.5}$, en la cual V_c es la velocidad crítica y g es la aceleración de gravedad. Para $(F - F_c) < 0$

$$Y_s = 1.85 b F_c^{0.25} \left(\frac{y}{b}\right)^{0.5} \quad (4)$$

Para $0 < (F - F_c) < 0.2$, se usa el valor mayor de las dos profundidades de socavación calculadas a partir de las Ecs. (3) y (4).

Según Jain (1981), Hancu en 1971 propuso la siguiente ecuación para estimar la socavación local en pilas

$$Y_s = 2.42 b \left[2 \left(\frac{V}{V_c} \right) - 1 \right] F_c^{\frac{2}{3}} \left(\frac{y}{b} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (5)$$

$$\text{donde } V_c = 1.2 \sqrt{g D [(\rho_s - \rho) / \rho]} \left(\frac{y}{D} \right)^{0.2}$$

en las cuales V es la velocidad media del flujo, ρ y ρ_s son la densidad del agua y del sedimento, respectivamente. Para socavación en agua clara, el término $(2(V/V_c) - 1) = 1$. La Ec. (5) no se aplica para $V/V_c \leq 0.5$.

Según refiere Johnson (1995), Laursen y Toch en 1956 desarrollaron curvas de diseño que fueron más tarde presentadas por Neill en 1964 en forma de fórmula matemática. La fórmula para estimar la profundidad de socavación local presentada por Johnson (1995) es

$$Y_s = 1.35 b^{0.7} y^{0.3} \quad (6)$$

Según Farias et al. (2004), Su en 1995 sostiene que el principal mecanismo erosivo se debe a la acción del flujo descendente sobre la cara de aguas arriba de la pila. Su modifica la relación funcional considerando a la trayectoria total del flujo descendente como variable dependiente e introduce la pendiente del cauce S como variable independiente. A partir de experimentos de laboratorio encontró que

$$\frac{y + Y_s}{b} = 1.378 \left(\frac{y}{b}\right)^{0.83} \left(\frac{b}{D}\right)^{0.045} \left(\frac{V}{V_c}\right)^{0.24} (1-S)^{-1.47} \quad (7)$$

Según indica Johnson (1995), Shen y col., en 1969 usaron datos de laboratorio y datos de campo limitados para desarrollar la siguiente ecuación de socavación en agua clara

$$Y_s = 0.0002225 R^{0.619} \quad (8)$$

donde $R = V(b/2)/\nu$, donde ν es la viscosidad cinemática del agua. Para socavación en fondo vivo, la Ec. (8) es conservativa; en este caso, Shen en 1971 recomendó el uso de la ecuación de Larras en 1963 dada por

$$Y_s = 1.05 b^{0.75} \quad (9)$$

Según Johnson (1995), Breusers et al. en 1977 desarrollaron la siguiente ecuación

$$Y_s = b f K_1 K_2 \left[2 \tanh \left(\frac{y}{b} \right) \right] \quad (10)$$

donde $f = 0$ para $\frac{V}{V_c} \leq 0.5$; $f = 2 \frac{V}{V_c} - 1$ para

$0.5 < \frac{V}{V_c} \leq 1$; $f = 1$ para $\frac{V}{V_c} > 1$ y K_1 y K_2 son

similares a la Ec.(1).

Nalluri y col., (1998) indican que la ecuación de Johnson en 1992 fue obtenida experimentalmente y está dada por

$$Y_s = 1.82 y \left(\frac{b}{y} \right)^{0.98} F^{0.21} \quad (11)$$

Nalluri y col., (1998) señalan que la ecuación de Ab Ghani y Nalluri en 1996 fue obtenida a partir de datos de campo de algunos puentes de la India y está dada por

$$Y_s = 1.46 D \left(\frac{b}{D} \right)^{0.97} \left(\frac{y}{b} \right)^{0.52} \left(\frac{Q}{b y \sqrt{g y}} \right)^{0.24} \quad (12)$$

en la cual Q es el caudal.

4 Banco de Datos

Inicialmente se utilizaron datos obtenidos a partir de los estudios previos de Flórez (1981), Monroy (1982), Yanmaz y Altinbilek (1991), Melville y Chiew (1999) y Jain (1981). Se procesaron 483 flujos de laboratorio, 352 en pilas circulares, 83 en rectangulares y 48 en redondeadas. Un resumen de los datos se presenta en la Tabla 1. Los datos incluyen el tamaño medio de la partícula d_{50} , la profundidad del flujo, el ancho de la pila, la velocidad, la profundidad de socavación observada y la pendiente.

Posteriormente, se procesaron datos de laboratorio de otros estudios reportados en la literatura para pilas circulares (Sheppard USGS, Sheppard NZ (fondo vivo), Miller-Sheppard, Chiew en 1984, Chee en 1982, CSU en 1966, Chabert y Engeldinger en 1956, Jain y Fisher en 1980, Shen y col., en 1969, Yanmaz y Altinbilek en 1990 y Dey, Bose y Sastry en 1995) y datos de campo entregados por Froelich en 1988, Dongguang en 1993, Zhuravlyov en 1978 y Mueller y Wagner (2005). De este banco de datos no se tiene la pendiente del cauce, por lo que en el análisis comparativo, no se consideró la ecuación de Su en 1995. Un resumen de los datos se presenta en las Tablas 2 y 3. Se procesaron un total de 358 flujos de laboratorio en pilas circulares y 624 flujos de campo en pilas circulares, correspondientes a socavación en agua clara y fondo vivo.

Tabla 1. Resumen de Datos Experimentales

Fuente n = 483		d_{50} (mm)	y (cm)	b (cm)	V (m/s)	Y_s (cm)	S (%)
Pilas Circulares							
Flórez (1981)	Mín.	0.59	2.60	5	0.14	0.3	0.25
	Máx.	4.61	10.00	5	1.07	10.4	5
Monroy (1982)	Mín.	2.9	1.41	2.52	0.22	1.5	0.5
	Máx.	2.9	11.18	5	1.16	8.9	4
Yanmaz y Altinbilek (1991)	Mín.	0.84	4.5	4.7	0.03	3.2	0.1
	Máx.	1.07	16.5	6.7	0.99	10.7	0.1
Melville y Chiew (1999)	Mín.	0.8	2	1.6	0.17	0.4	---
	Máx.	7.8	60	20	1.21	31.8	---
Jain (1981)	Mín.	0.24	5	5	0.3	7	---
	Máx.	3.0	35	15.2	0.85	21	---
Pilas Rectangulares							
Monroy (1982)	Mín.	2.75	2.43	3.88	0.29	4.1	0.5
	Máx.	3.8	11.18	8.15	1.28	15.2	4
Yanmaz y Altinbilek (1991)	Mín.	0.84	8.5	4.7	0.19	8.4	0.1
	Máx.	1.07	16.5	6.7	0.99	14.1	0.1
Pilas Redondeadas							
Monroy (1982)	Mín.	2.4	3.25	3.56	0.39	2.3	0.5
	Máx.	3.8	8.88	5.75	1.03	12.3	4.0

Tabla 2. Resumen de Datos Experimentales con Pilas Circulares

Fuente n = 358		d_{50} (mm)	y (m)	b (m)	V (m/s)	Y_s (m)	F
Sheppard USGS	Mín.	0.22	0.17	0.11	0.21	0.13	0.05
	Máx.	2.90	1.90	0.92	0.68	1.27	0.37
Sheppard NZ	Mín.	0.27	0.20	0.15	0.17	0.13	0.08
	Máx.	0.84	0.49	0.15	2.16	0.29	1.26
Miller- Sheppard	Mín.	0.22	0.17	0.11	0.25	0.13	0.07
	Máx.	2.90	2.00	0.91	1.52	1.27	0.89
Dey- Bose	Mín.	0.26	0.04	0.06	0.17	0.05	0.29
	Máx.	0.58	0.05	0.08	0.26	0.09	0.37
Chiew, 1984	Mín.	0.24	0.17	0.03	0.31	0.02	0.24
	Máx.	3.20	0.21	0.07	1.00	0.10	0.70
Chee, 1982	Mín.	0.24	0.10	0.05	0.23	0.06	0.23
	Máx.	1.40	0.10	0.10	1.20	0.14	0.21
CSU, 1966	Mín.	0.24	0.11	0.15	0.23	0.11	0.20
	Máx.	0.46	0.27	0.15	1.02	0.21	0.95
Chabert y Engeldin- Ger, 1956	Mín.	1.00	0.10	0.05	0.37	0.07	0.23
	Máx.	3.00	0.35	0.15	0.84	0.20	0.77
Jain y Fisher, 1980	Mín.	0.30	0.10	0.05	0.50	0.07	0.50
	Máx.	2.50	0.25	0.10	1.50	0.19	1.50
Shen et al., 1969	Mín.	0.20	0.11	0.15	0.15	0.03	0.01
	Máx.	0.50	0.67	0.92	1.02	0.67	0.95
Yanmaz Y Altinbi-	Mín.	0.80	0.05	0.05	0.15	0.03	0.23
	Máx.	1.10	0.17	0.07	0.29	0.11	0.23
Dey, Bose Y Sastry, 1995	Mín.	0.30	0.04	0.06	0.17	0.05	0.29
	Máx.	0.60	0.05	0.08	0.26	0.10	0.37

Tabla 3. Resumen de Datos de Campo con Pilas Circulares

Fuente n = 624		d ₅₀ (mm)	y (m)	b (m)	V (m/s)	Y _s (m)	F
Zhurav-lyov's, 1978	Mín.	0.16	0.30	0.20	0.35	0.17	0.05
	Máx.	1.84	17.1	10.2	2.72	5.72	0.50
Zhurav-lyov's, 1978	Mín.	0.05	0.35	0.20	0.48	0.26	0.07
	Máx.	150	18.8	6.02	3.33	5.03	0.76
Zhurav-lyov's, 1978	Mín.	0.20	0.75	0.20	0.51	0.28	0.07
	Máx.	1.90	11.4	13.0	3.30	10.6	0.49
Froelich, 1988	Mín.	0.01	0.40	0.30	0.20	0.20	0.06
	Máx.	90	19.5	19.5	3.70	10.4	0.86
Dongguang 1993(Fondo Vivo)	Mín.	0.17	0.30	1.00	0.43	0.35	0.17
	Máx.	68.80	5.14	3.60	2.91	5.40	1.34
Dongguang 1993 (Agua clara)	Mín.	0.21	0.50	1.47	0.35	0.10	0.06
	Máx.	70.0	6.50	6.72	2.35	2.98	0.65
Mueller-Wagner, 2005	Mín.	0.12	0.30	0.60	0.20	0.10	0.03
	Máx.	90.0	13.0	4.60	4.50	5.60	0.61

5 Pruebas Estadísticas

Se aplicaron varias pruebas estadísticas para evaluar las profundidades de socavación estimadas. Las profundidades de socavación obtenidas a partir de las fórmulas seleccionadas y aquellas de los datos experimentales y de campo se usaron para calcular los parámetros de las pruebas estadísticas. Las pruebas estadísticas incluyen el coeficiente de Theil U, el error absoluto medio MAE, la raíz del error al cuadrado medio RMSE, el error medio normalizado MNE, el factor medio de predicción MPF y el índice de dispersión ID, que matemáticamente se describen por las siguientes ecuaciones: El coeficiente de Theil U descrito por Mohamed et al. (2005) está dado por

$$U = \frac{\left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n ((Y_s)_c - (Y_s)_0)^2 \right]^{\frac{1}{2}}}{\left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_s)_c^2 \right]^{\frac{1}{2}} + \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_s)_0^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (13)$$

donde (Y_s)₀ es la profundidad de socavación obtenida en los experimentos o en campo, (Y_s)_c es la correspondiente socavación estimada a partir de la aplicación de las fórmulas de socavación seleccionadas y n es el número de mediciones o flujos. Según indican Mohamed et al. (2005), U = 0 para el modelo de predicción perfecta y U = 1 para el modelo que no es satisfactorio

El error absoluto medio MAE está dado por

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |e_i| \quad (14)$$

La raíz del error al cuadrado medio RMSE o error típico de la estima está dado por

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n e_i^2}{n}} \quad (15)$$

en las cuales e_i es el error en la profundidad de socavación estimada a partir de la aplicación de la fórmula. Según indican Mohamed et al. (2005), los valores más pequeños de U, MAE y RMSE obtenidos a partir de las ecuaciones indican una predicción satisfactoria.

El error medio normalizado MNE, el cual es la medida del error relativo entre valores reales y estimados en términos porcentuales, está definido por

$$MNE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{(Y_s)_0 - (Y_s)_c}{(Y_s)_0} \right| \quad (16)$$

El factor medio de predicción MPF, el cual es un parámetro que sirve para determinar la predictibilidad de los valores reales respecto a los valores calculados, está dado por

$$MPF = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \text{mayor} \left(\frac{(Y_s)_0}{(Y_s)_c}, \frac{(Y_s)_c}{(Y_s)_0} \right) \quad (17)$$

El factor medio de predicción MPF tiene un valor ideal igual a 1, que se obtendrá en aquellos casos en los que el valor calculado sea igual al valor real. Adicionalmente, para la comparación se empleó un nuevo parámetro reciente, presentado por Aguirre-Pe et al. en 2004, denominado índice de dispersión ID, dado por

$$ID = \frac{MNE}{100} MPF \quad (18)$$

Así, el índice de dispersión puede tomar cualquier valor mayor o igual a cero. Cuando los valores medido y calculado sean iguales, el error medio se hará cero, lo que en consecuencia hará que ID tome el valor de cero, exactitud total. En cambio, a medida que la diferencia entre el valor real y el teórico se haga más grande, mayor serán tanto MNE como MPF y, por lo tanto, se maximizará ID.

6 Comparación de Ecuaciones y Resultados

Las profundidades de socavación se calcularon empleando las Ecs. (1)-(12) y los datos de campo y experimentales se describieron previamente. El valor de V_c se calculó a partir de la ecuación de Richardson y Davis en 1995, referida por Farias y col., (2004). Estos valores se compararon con los obtenidos a partir de la ecuación de Hancu en 1971. Se obtuvieron valores muy próximos. En todos los casos, se consideró que las pilas estaban alineadas con el flujo. Esta suposición se hizo porque esta

información no era disponible. Con el fin de facilitar la comparación, se presentan gráficos de las profundidades de socavación estimadas a partir de la fórmula seleccionada y las medidas en laboratorio o en campo. Los puntos mostrados se comparan con la línea de acuerdo perfecto con el fin de evaluar la aproximación de la predicción de cada fórmula.

Se inició el análisis empleando los 483 flujos de laboratorio, 352 en pilas circulares, 83 en pilas rectangulares y 48 en pilas redondeadas, correspondientes a socavación en agua clara y fondo vivo, con el fin de estudiar el efecto de la forma de la pila.

Las Figs. 1, 2, 3, 4 y 5 muestran la comparación de varias fórmulas con los datos de socavación considerados, en este caso. En la Fig. 1a se observa que, en el caso de pilas circulares, la ecuación de Su en 1995 entrega una predicción adecuada, mientras que para pilas rectangulares y redondeadas arroja valores muy pequeños de la profundidad de socavación en comparación con los observados, como se muestra en la Fig. 1b. Para estos flujos, la ecuación subestima en gran medida la socavación.

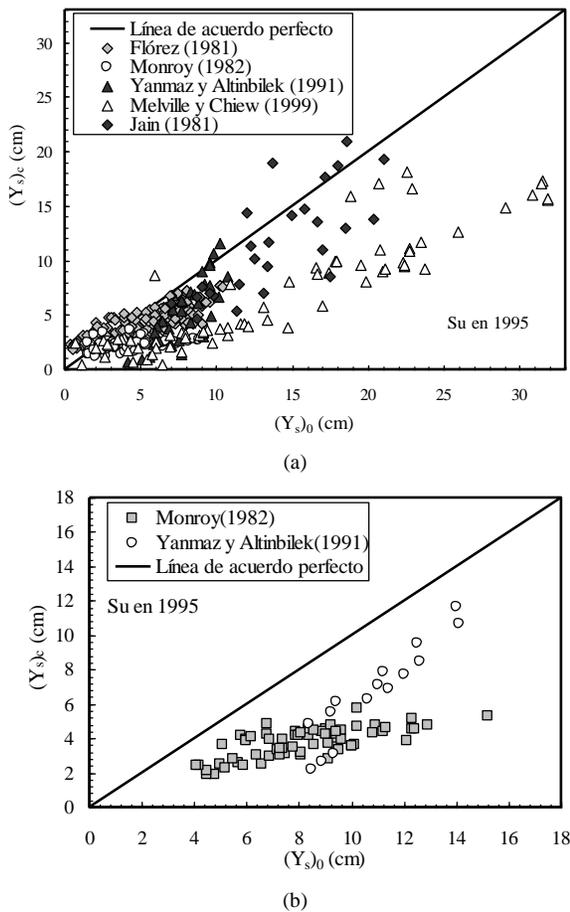


Fig. 1. Comparación de la Fórmula de Su en 1995 con Datos de Socavación Disponibles. a) Pilas Circulares. b) Pilas Rectangulares

Para esta base de datos, se obtuvo que en pilas circulares la ecuación de Laursen y Toch en 1956 conduce a resultados razonables, al igual que en el caso de pilas rectangulares y cuadradas, para las cuales entrega una buena estimación, como se ilustra en la Fig 2(a, b), mientras que ésta no presenta resultados satisfactorios para la profundidad de socavación en el caso de pilas redondeadas, ya que arroja un valor constante, que depende de los datos.

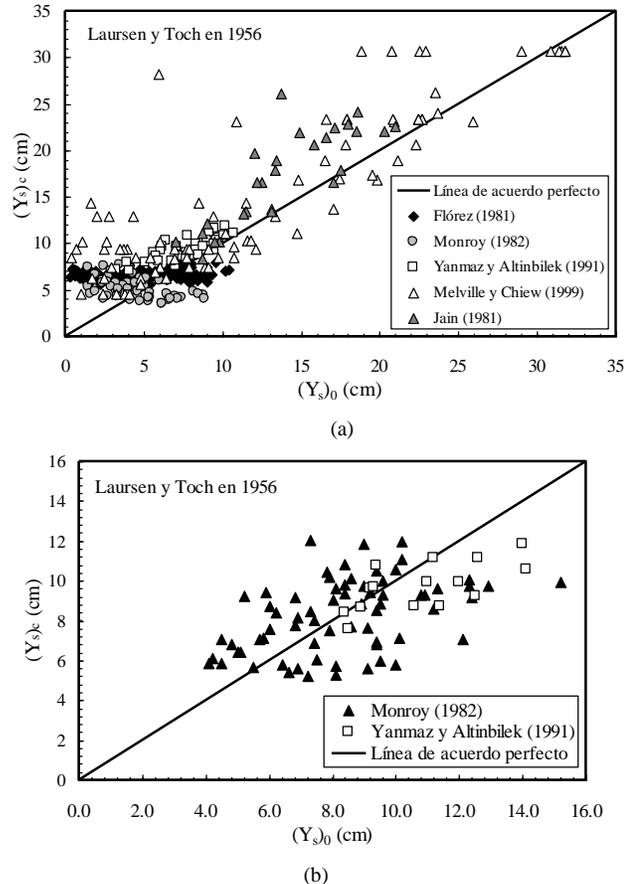


Fig. 2. Comparación de la Fórmula de Laursen y Toch en 1956 con Datos de Socavación Disponibles. a) Pilas Circulares. b) Pilas Rectangulares

En la Fig.3(a, b) se observa que la ecuación de Johnson en 1992 predice razonablemente bien la profundidad de socavación en pilas redondeadas y rectangulares. En pilas circulares, la ecuación no estima adecuadamente la profundidad de socavación, en algunos flujos de la base de datos. Hay mayor dispersión en los puntos experimentales. La comparación mostró muy poca correlación entre los valores medidos y calculados.

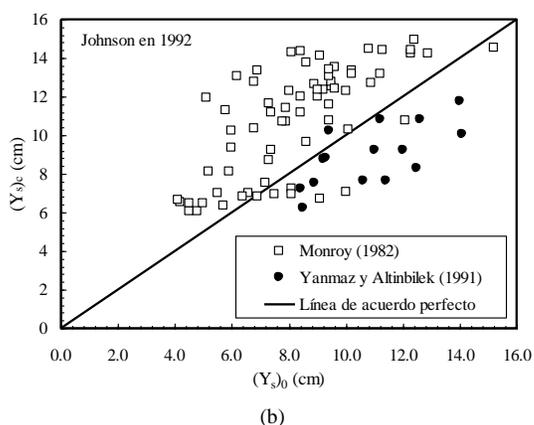
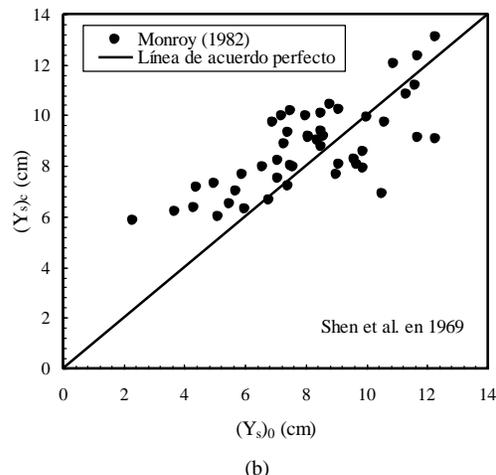
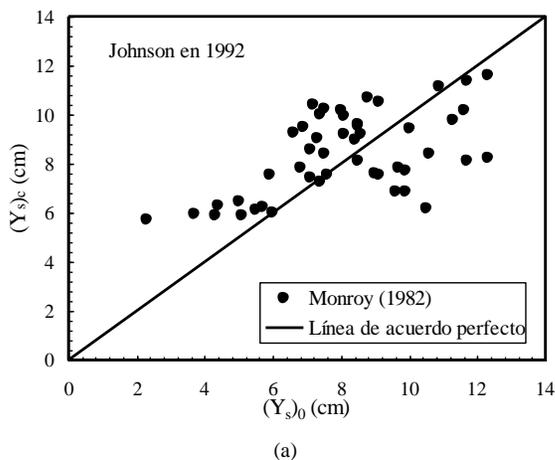


Fig. 3. Comparación de la Fórmula de Johnson en 1992 con Datos de Socavación Disponibles. a) Pilas Redondeadas. b) Pilas Rectangulares

En pilas circulares y redondeadas, la ecuación de Shen et al. en 1969 entrega una predicción razonable, como se muestra en la Fig. 4(a, b). En el caso de pilas rectangulares, la ecuación tiene menor precisión. Genera mayor dispersión de los datos alrededor de la línea de acuerdo perfecto.

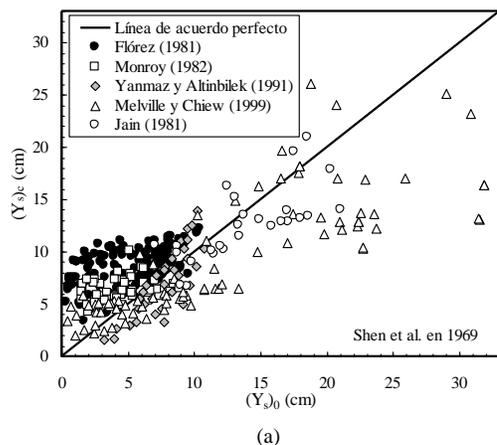
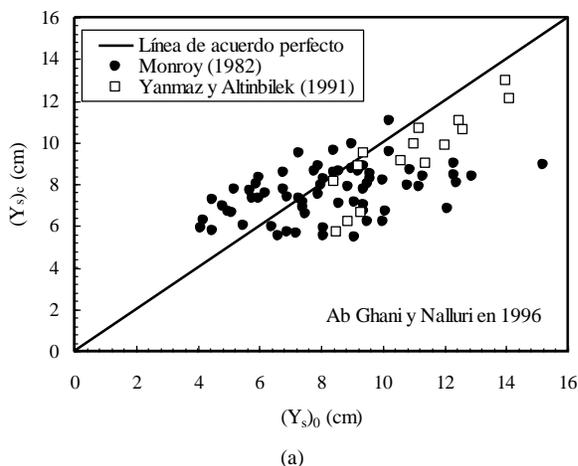


Fig. 4. Comparación de la Fórmula de Shen et al. en 1969 con Datos de Socavación Disponibles. a) Pilas Circulares. b) Pilas Redondeadas

En pilas rectangulares y cuadradas, la ecuación de Ab Ghani y Nalluri en 1996 presenta la mejor estimación, como se ilustra en la Fig. 5a. Se observa en la Fig. 5b que la ecuación entrega una predicción adecuada en pilas circulares, ya que presenta una mayor dispersión en los puntos, lo que conduce a mayores errores de predicción. Para los datos analizados, no predice bien la socavación en pilas redondeadas, entrega un valor constante. Adicionalmente, a partir del análisis comparativo de la base de datos examinada, se obtuvo que en el caso de pilas circulares, rectangulares y redondeadas, la ecuación de Hancu en 1971 no predice bien la profundidad de socavación. Presenta gran dispersión en los puntos, lo que conduce a grandes errores de predicción. En pilas redondeadas y circulares entrega un valor de socavación constante, dependiendo del banco de datos. En pilas rectangulares mostró gran dispersión en los puntos.



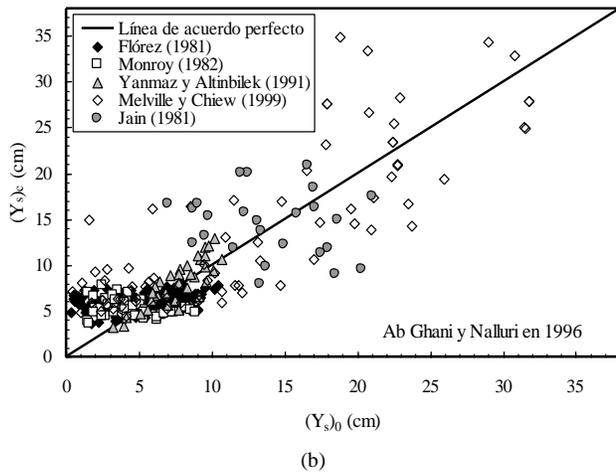


Fig. 5. Comparación de la Fórmula de Ab Ghani y Nalluri en 1996 con Datos de Socavación Disponibles. a) Pilas Rectangulares. b) Pilas Circulares

Para estos flujos analizados, la ecuación de Jain y Fischer en 1979 no predice adecuadamente la profundidad de socavación. En el caso de pilas circulares y rectangulares, la ecuación sobreestima en gran proporción la profundidad de socavación, mientras que en pilas redondeadas entrega un valor constante, dependiendo del banco de datos. En el caso de pilas circulares, la ecuación de Melville en 1997 no estima adecuadamente la profundidad de socavación. Presenta gran dispersión en los datos para números de Froude altos. Se encontró que la ecuación sobreestima la socavación. En pilas rectangulares, la ecuación también sobreestima la profundidad de socavación y genera dispersión alrededor de la línea de acuerdo perfecto. En pilas redondeadas, la ecuación de Melville genera gran dispersión en los datos, lo que indica que ésta no es un buen estimador de la profundidad de socavación. La ecuación de CSU (HEC-18) no predice adecuadamente la profundidad de socavación en pilas rectangulares y redondeadas. Tiende a sobreestimar la profundidad de socavación.

Para esta base de datos, en el caso de pilas circulares y rectangulares, la ecuación de Breusers y col., en 1977 resultó ser un buen estimador de la socavación. Se encontró muy buena correlación entre los valores medidos y estimados. En el caso de pilas redondeadas, la ecuación de Breusers y col., en 1977 presenta un comportamiento similar a las ecuaciones de Johnson en 1992 y Shen et al. en 1969.

Estas observaciones están sustentadas por las pruebas estadísticas aplicadas a las fórmulas seleccionadas. En la Fig. 6 se muestra en un gráfico de barras los valores de ID de las 10 ecuaciones seleccionadas para los datos experimentales en pilas circulares.

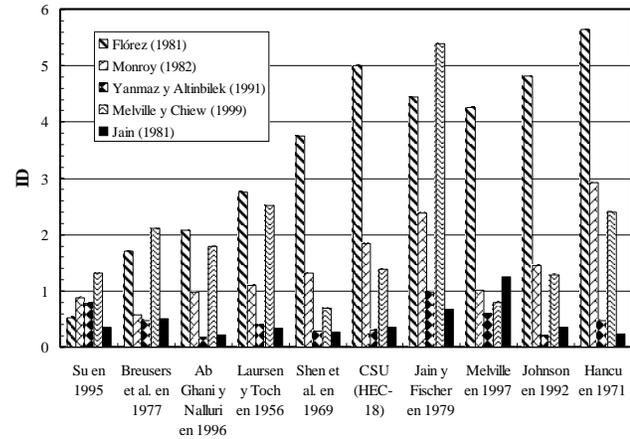


Fig. 6. Índices de Dispersión ID de los 10 Modelos de Socavación Para Datos Experimentales en Pilas Circulares

En el caso de pilas circulares, los valores de las pruebas estadísticas U y MPF no entregan una tendencia definida, ya que los valores son muy próximos. Los valores de ID para las ecuaciones comparadas con los datos en pilas rectangulares, mostraron que las ecuaciones de Laursen y Toch en 1956 y Ab Ghani y Nalluri en 1996 son los mejores predictores de la profundidad de socavación. Los valores de U y MNE también confirman lo antes indicado. En el caso de pilas redondeadas se obtuvo que las ecuaciones de Shen et al. en 1969 y Johnson en 1992 son las que predicen con mayor precisión la profundidad de socavación. Esta afirmación está sustentada por los valores de las pruebas estadísticas ID y U aplicadas a los modelos. En el análisis se eligió como criterio de comparación el índice de dispersión ID . Se consideró este parámetro porque toma en cuenta el error medio normalizado MNE y el factor medio de predicción MPF , lo que permite una rápida y sencilla evaluación de la calidad del estimador. A menor valor de ID , mayor será la exactitud de estimación de los modelos.

A continuación, se presenta el análisis empleando la base de datos total de campo ($n = 624$) y laboratorio ($n = 358$), para pilas circulares. Aquí también, con el fin de facilitar la comparación, se presentan gráficos de la profundidad de socavación $Y_{s(m)}$ estimada a partir de la fórmula seleccionada y la medida en laboratorio o campo. La Fig. 7(a, b) muestra la comparación de la fórmula CSU con datos experimentales y de campo, respectivamente. Se observa que, para el banco total de datos analizado, la ecuación predice razonablemente bien la socavación.

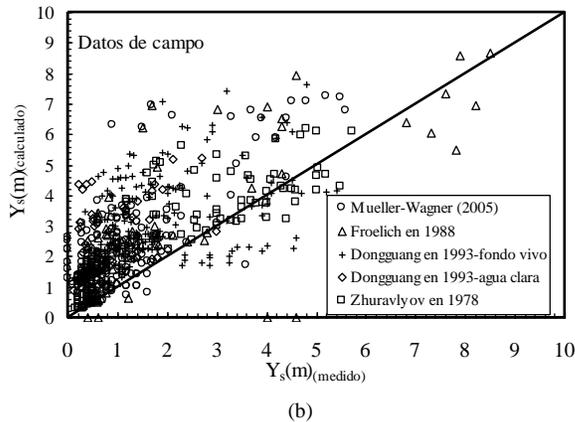
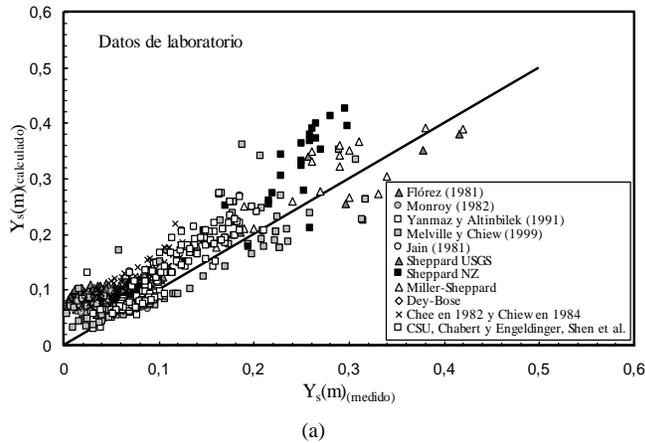


Fig. 7. Comparación de la Fórmula CSU (HEC-18) con: a) Datos experimentales, b) Datos de Campo

La Fig. 8(a, b) muestra la comparación de la fórmula de Ab Ghani y Nalluri en 1996 con datos de laboratorio y de campo, respectivamente. Se observa que esta ecuación entrega una predicción adecuada. Sin embargo, presenta una mayor dispersión en los puntos, lo que conduce a mayores errores de predicción.

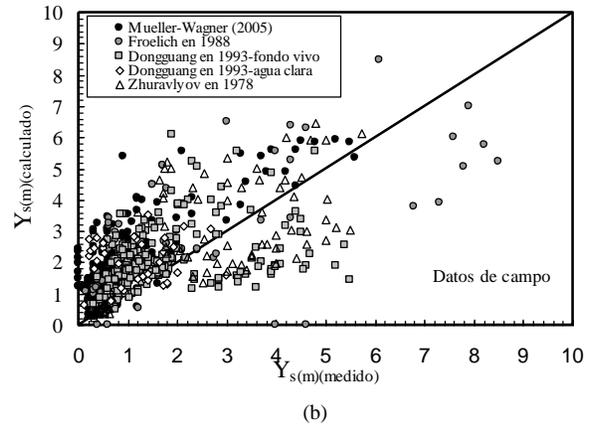
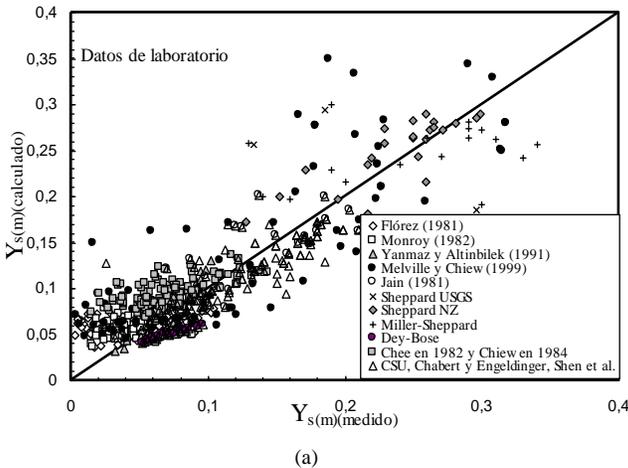


Fig. 8. Comparación de la Fórmula de Ab Ghani y Nalluri en 1996 con: a) Datos experimentales, b) Datos de Campo

En las Figs. 7 y 8 se observa que las ecuaciones CSU (HEC-18) y Ab Ghani y Nalluri en 1996 entregan resultados satisfactorios cuando se compara con los datos de socavación disponibles, al igual que la ecuación de Jain y Fisher en 1979 y Johnson en 1992. El análisis comparativo muestra buena correlación entre los valores medidos y calculados. Sin embargo, comparando con los datos de campo, las ecuaciones de Hancu en 1971 y Melville en 1997, sobreestiman en gran medida la profundidad de socavación, como se muestra en las Figs. 9 y 10.

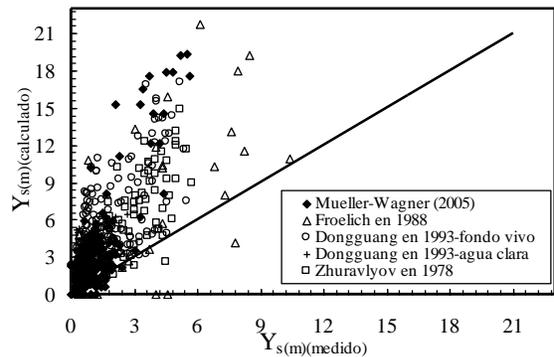


Figura 9. Comparación de la Fórmula de Hancu en 1971 con Datos de Campo

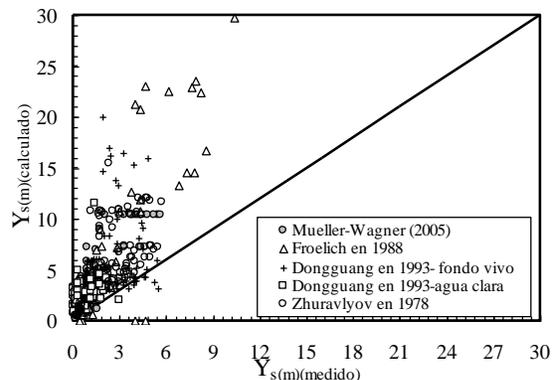
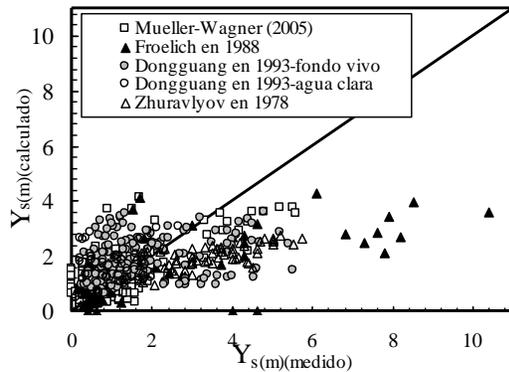
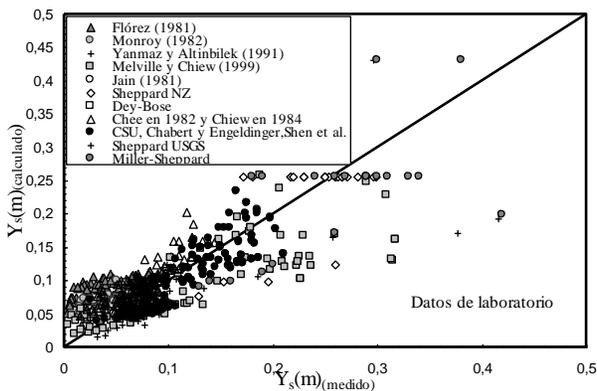


Fig. 10. Comparación de la Fórmula de Melville en 1997 con Datos de Campo

Se observa que estas ecuaciones no estiman adecuadamente la profundidad de socavación. Se muestra muy poca correlación entre los valores medidos y calculados. Por otro lado, la ecuación de Shen et al. en 1969 entrega valores muy pequeños para la profundidad de socavación en comparación con los observados. En la mayoría de los datos analizados, la ecuación subestima la socavación, como se observa en la Fig. 11(a, b).



(a)



(b)

Fig. 11. Comparación de la Fórmula de Shen et al. en 1969 con: a) Datos de Campo, b) Datos Experimentales

En las Figs. 12 y 13 se ilustra la comparación de las ecuaciones de Laursen y Toch en 1956 y de Jain y Fisher en 1979 con los datos de campo disponibles.

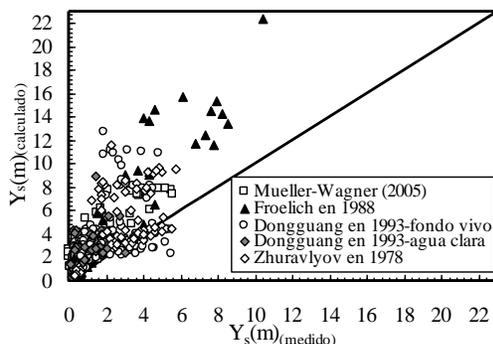


Fig. 12. Comparación de la Fórmula de Laursen y Toch en 1956 con Datos de Campo

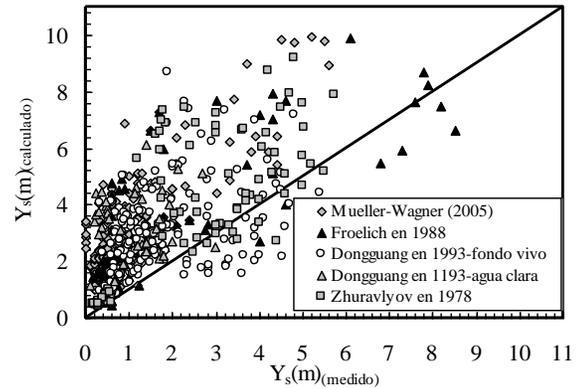


Fig. 13. Comparación de la Fórmula de Jain y Fisher en 1979 con Datos de Campo

La ecuación de Johnson en 1992 entrega resultados similares a los de Laursen y Toch en 1956. Ambas ecuaciones sobreestiman la profundidad de socavación.

A partir del análisis comparativo se obtiene que, para este banco total de datos analizado, entre las ecuaciones que mejor predicen la profundidad de socavación, experimental y de campo, se tienen las ecuaciones de Ab Ghani y Nalluri en 1996, CSU (HEC-18) y de Jain y Fisher en 1979. Las ecuaciones de Laursen y Toch en 1956 y Johnson en 1992 también entregan buenos resultados, pero sobreestiman en mayor proporción la profundidad de socavación en algunos de los flujos analizados. Para esta base de datos, la ecuación de Breusers y col., en 1977 presenta gran dispersión en los puntos, lo que conduce a grandes errores de predicción.

7 Conclusiones

Para la mayoría de los flujos experimentales analizados, la ecuación de Su en 1995 predice razonablemente bien la profundidad de socavación en pilas circulares. Las ecuaciones de Laursen y Toch en 1956 y Ab Ghani y Nalluri en 1996 presentan la mejor estimación de la socavación en pilas rectangulares y cuadradas, mientras que en pilas redondeadas, las ecuaciones de Shen et al. en 1969 y Johnson en 1992 la predicen con gran precisión.

Las ecuaciones de Ab Ghani y Nalluri en 1996, CSU (HEC-18) y Jain y Fisher en 1979 entregan la mejor predicción de la profundidad de socavación, experimental y de campo. Estas predicen razonablemente bien la socavación en el mayor número de los flujos. Sin embargo, se obtuvo que para los datos de campo, en pilas circulares, la fórmula CSU (HEC-18) y la de Jain y Fisher en 1979 sobreestiman la profundidad de socavación. Las ecuaciones de Laursen y Toch en 1956 y Johnson en 1992 entregan buenos resultados, pero también sobreestiman en mayor proporción la socavación en algunos de los flujos.

Las ecuaciones de Hancu en 1971 y Melville en 1997 sobreestiman en gran medida la profundidad de socavación. Éstas no predicen adecuadamente la socavación. Hay muy poca correlación entre los valores medidos y calculados.

Para la base de datos total, la ecuación de Breusers y col., en 1977 presenta gran dispersión en los puntos. Para la mayoría de los flujos no entrega resultados satisfactorios. La mayoría de las fórmulas examinadas sobreestiman la profundidad de socavación, mientras que la ecuación de Shen et al. en 1969 la subestima en la mayoría de los flujos.

Estas observaciones se aprecian cuando se comparan las pruebas estadísticas aplicadas a cada fórmula.

Recibido: 13 de julio de 2017

Aceptado: 15 de febrero de 2018

Moncada, Alix: Ingeniero Civil, MSc. en Obras Hidráulicas. Profesor de la Facultad de Ingeniería, ULA. Área de investigación: mecánica de fluidos e hidráulica fluvial y general.

8 Agradecimiento

Los autores agradecen al “Consejo de Desarrollo Científico, Humanístico y Tecnológico” de la Universidad de los Andes por su apoyo financiero a través de Programa CVI-ADG-I-07-95C.

Referencias

- Farias HD, Pilán MT, Pece FJ, Olmos LA, 2004, Socavación Local en Pilas de Puentes: De la Abrumadora Complejidad a la Excesiva Simplificación, XXI Congreso Latinoamericano de Hidráulica, São Pedro, Estado de São Paulo, Brasil, CD Rom, p. 10.
- Flórez I, 1981, Socavación Local en Condiciones de Flujo Torrencial, Trabajo presentado como requisito para ascender a la categoría de Profesor Agregado. Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela, p. 166.
- Jain SC, 1981, Maximum Clear-Water Scour Around Circular Piers, Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 107, No. HY5, pp. 611-626.
- Johnson PA, 1995, Comparison of Pier-Scour Equations Using Field Data, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 121, No. 8, pp. 626-629.
- Melville BW, Chiew YM, 1999, Time Scale for Local Scour at Bridge Piers, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 125, No. 1, pp. 59-65.
- Mohamed TA, Noor MJ, Ghazali AH, Huat BB, 2005, Validation of Some Bridge Pier Scour Formulae Using Field and Laboratory Data, American Journal of Environmental Sciences, Vol. 1, No. 2, pp. 119-125.
- Monroy FR, 1982, Socavación Local Alrededor de Estructuras Hidráulicas en Flujo Torrencial. Tesis para optar al grado de Magister Scientiae en Obras Hidráulicas. CIDIAT. Univ. de Los Andes, Mérida, Venezuela, p. 159.
- Mueller DS, Wagner CR, 2005, Field Observations and Evaluations of Streambed Scour at Bridges. Report No. FHWA-RD-03-052. U. S. Geological Survey. Water Resources Division, p. 134.
- Nalluri C, Saldarriaga JG, Plata F, 1998, Revisión de Ecuaciones que Predicen la Socavación Local Alrededor de Pilas de Puente, Universidad de Los Andes, Colombia, Información de Web, pp. 52-60.
- Yanmaz AM, Altınbilek HD, 1991, Study of Time-Dependent Local Scour Around Bridge Piers, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 117, No. 10, pp. 1247-1268.

