

VI CONGRESO NACIONAL

MODELACION DE LAS FASES INICIALES DE LA
SOCAVACION AL PIE DE RADIERES

Luis Ayala R. (1)

Aldo Tamburrino T. (2)

RESUMEN

Se presenta el desarrollo y la aplicación de un modelo para simular matemáticamente las fases iniciales del proceso de socavación en un lecho móvil, aguas abajo del radier de un canal. Para modelar el fenómeno se consideran dos etapas en su evolución: (1) una primera etapa que se caracteriza por un flujo paralelo, sin despeque de fondo y que origina una socavación por degradación del lecho, y (2) una segunda etapa caracterizada por la presencia de un vórtice o torbellino de fondo que crece a medida que lo hace la fosa de socavación. La fase inicial de desarrollo de esta etapa, que corresponde a una en la que el flujo externo todavía puede considerarse a filetes paralelos, se modela a partir de la ecuación de continuidad del gasto sólido, diferenciando entre la zona de recirculación dentro del vórtice y la zona de flujo paralelo aguas abajo del punto de reapegue, describiendo la primera de estas zonas con ecuaciones de flujos cortantes libres aplicando el método inductivo de Reichardt y resultados para estelas deducidos por Abramovich. Aguas abajo del punto de reapegue el flujo se considera paralelo.

La aplicación que se presenta muestra algunas de las características del flujo en la zona de recirculación, así como la evolución de la socavación en el tiempo.

-
- (1) Ingeniero Civil, Profesor e Investigador del Centro de Recursos Hidráulicos, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
 - (2) Egresado de Ingeniería Civil, Profesor Auxiliar e Investigador del Centro de Recursos Hidráulicos, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

Introducción

La socavación que se produce en un lecho móvil, al pie del radier de un canal, es un fenómeno que reviste gran importancia práctica en algunas obras hidráulicas. Debido a la complejidad del fenómeno, en el pasado el problema ha sido abordado preferentemente recurriendo a estudios experimentales o en algunos casos particulares, a estudios en modelos físicos. También han habido estudios teóricos, pero estos han sido los menos, además que por las simplificaciones que introducen (no toman en cuenta la zona de recirculación aguas abajo del radier, por ejemplo), conducen en general, a resultados poco reales (Tsuchiya e Iwagaki, 1967) o relacionados con aspectos puntuales del fenómeno como por ejemplo, la socavación máxima.

En la actualidad, el conocimiento adquirido con los estudios experimentales y el gran desarrollo que han alcanzado las técnicas computacionales, posibilitan un enfoque alternativo del problema haciendo uso de modelos de simulación matemática. Con estos modelos en principio es posible incluir diversos otros aspectos del fenómeno, entre ellos la zona de recirculación producida por el despegue de fondo del flujo inmediatamente aguas abajo del radier y también estudiar la evolución espacial y temporal del fenómeno.

En este trabajo se describe un modelo matemático para simular las fases iniciales del proceso de socavación provocado por un flujo bidimensional en un lecho móvil, no cohesivo, al pie de un radier o lecho fijo. Estas fases incluyen un proceso inicial de degradación en que no alcanza a tener influencia el torbellino de fondo, seguida de un proceso de desarrollo pleno en donde es preponderante este torbellino. El modelo se ha elaborado sobre la base de las ecuaciones diferenciales de continuidad del sedimento, y del movimiento para el flujo, las que se resuelven, unas analíticamente y otras, mediante el empleo de técnicas numéricas. La aplicación realizada con el modelo conduce a resultados que muestran una concordancia aceptable con datos experimentales.

Fases de evolución del fenómeno

En la Fig. 1 y 2a aparece un esquema del sistema en estudio. Se trata de un radier seguido de un lecho móvil que se socava debido a la acción de un escurrimiento bidimensional con superficie libre. El desarrollo de la fosa de socavación ocurre aquí de acuerdo con un proceso en el cual es posible distinguir al menos dos etapas. La primera se caracteriza porque el flujo es paralelo al fondo y las partículas sólidas que son removidas, son arrastradas en la misma dirección de la corriente. La segunda se caracteriza por la existencia de un vórtice de gran poder socavante inicial, el cual genera al pie del radier, un movimiento reverso que arrastra las partículas de sedimento en dirección opuesta al flujo principal externo.

La primera etapa constituye la fase inicial de desarrollo del fenómeno donde la profundización de la fosa ocurre debido a un proceso de degradación del lecho, causado por la falta de suministro desde aguas arriba. Esta fase inicial o de degradación pura, se caracteriza además por un escurrimiento a filetes paralelos y distribución hidrostática de presiones en la vertical.

La segunda etapa comienza con una fase de profundización de la fosa, mucho más rápida que la anterior, debido al vórtice de fondo que se forma por el despegue del flujo. Este despegue tiene su origen en los gradientes de presiones adversos que se generan al pie del radier, cuando el lecho ha sido socavado suficientemente. En la fase inicial de esta segunda etapa o fase de desarrollo pleno, una vez formado el vórtice, las líneas de corriente presentan pequeña curvatura, pudiéndose en consecuencia considerar el escurrimiento a filetes paralelos. En un estado más avanzado de evolución de la fosa, el escurrimiento se deforma considerablemente, perdiéndose la propiedad original de paralelismo de filetes. Esta condición marca la fase final o de estabilización de la segunda etapa del fenómeno.

Las fases de evolución descritas han sido identificadas en diversos estudios experimentales como los de Tsuchiya e Iwagaki

(1967) y Watkins (1969).

Modelación de la fase inicial o de degradación pura

Para modelar la degradación del lecho se considera primariamente la ecuación de continuidad del gasto sólido :

$$- S_t + \frac{1}{(1 - \lambda) \gamma_s} (g_s)_x = 0 \quad (1)$$

donde S representa la socavación, t el tiempo, λ la porosidad del material, γ_s el peso específico seco del material; g_s el gasto sólido por unidad de ancho expresado en peso seco/tiempo y x la abscisa. Los subíndices t y x denotan derivadas parciales con respecto al tiempo y espacio, respectivamente.

El gasto sólido puede evaluarse de una ecuación del tipo Meyer-Peter y Müller :

$$g_s = C (\tau - \tau_c)^E \quad (2)$$

donde C y E son constantes y, τ y τ_c los esfuerzos de corte de fondo y crítico del material, respectivamente.

Si τ se expresa en función de la velocidad media del flujo (\bar{u}) y del factor de fricción f, se cumple :

$$\tau = \frac{1}{8} \rho f \bar{u}^2 \quad (3)$$

Por otra parte, la velocidad media \bar{u} puede calcularse del caudal unitario y expresarla en función de h y S :

$$\bar{u} = \frac{q}{h + S} \quad (4)$$

Al introducir las ec. (4) en (3) y esta última en la ecuación de gasto sólido (ec. (2)), se puede calcular la derivada $(g_s)_x$ e introducirla en la ec. (1) de continuidad, obteniéndose una ecuación diferencial a derivadas parciales para S :

$$S_t - K_1 \left(\frac{\rho f}{8} \left(\frac{q}{h + S} \right)^2 - \tau_c \right)^{E-1} \cdot \left(\frac{1}{(h + S)^2} \frac{\partial f}{\partial S} - \frac{2f}{(h + S)^3} \right) S_x = 0 \quad (5)$$

donde
$$K_1 = \frac{CE \rho q^2}{8(1 - \lambda) \gamma_s}$$

La ecuación anterior puede compararse con la diferencial total :

$$\frac{dS}{dt} = S_t + \frac{dx}{dt} S_x \quad (6)$$

de donde resultan dos ecuaciones diferenciales ordinarias :

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= K_1 \left(\frac{\rho f}{8} \left(\frac{q}{h + S} \right)^2 - \tau_c \right)^{E-1} \frac{2f}{(h + S)^3} \\ \frac{dS}{dt} &= K_1 \left(\frac{\rho f}{8} \left(\frac{q}{h + S} \right)^2 - \tau_c \right)^{E-1} \frac{1}{(h + S)^2} f_x \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Por otra parte, el esfuerzo de corte τ , de acuerdo a investigaciones diversas (Antonia y Luxton, 1971; Schofield, 1981; Aguirre Pe, 1982), debido al cambio de rugosidad que significa el paso del radiier fijo al lecho móvil, varía bruscamente en la sección de cambio de rugosidades; después de un rápido crecimiento, dicho esfuerzo decrece paulatinamente hasta alcanzar asintóticamente el valor que le corresponde para la rugosidad del lecho móvil.

Despreciando la variación en el tiempo que significa la evolución del perfil (lo cual se justifica por la corta duración de esta fase inicial del proceso), la variación de τ con x puede expresarse en función del factor de fricción f como sigue :

$$f = f_R (1 + A e^{-Bx}) \quad (8)$$

donde f_R es el factor de fricción del lecho móvil, y A y B constantes.

El reemplazo de la ec. (8) en la ec. (7) conduce en definitiva a la ecuación diferencial ordinaria siguiente :

$$\frac{dx}{dS} = - \frac{2}{h + S} \cdot \frac{1 + A e^{-Bx}}{AB e^{-Bx}} \quad (9)$$

Integrando e imponiendo la condición de borde $x = x_0$ ($t = t_0$)
 $S = 0$ resulta :

$$S = h \left(\sqrt{\frac{1 + A e^{-Bx}}{1 + A e^{-Bx_0}}} - 1 \right) \quad (10)$$

Esta ecuación representa la variación de S con x, para un observador que se desplaza con la velocidad de desplazamiento del punto de socavación nula que está dada por ($\frac{dx}{dt}$), evaluada de la ec. (7) con $S = 0$.

De lo anterior resulta que el tiempo en el cual la socavación ha alcanzado una distancia x_0 está dada por :

$$t_0 = \int_0^{x_0} \frac{dx_0}{K_1 \left(\rho \frac{f_R}{8} (1 + A e^{-Bx_0}) \left(\frac{q}{h} \right)^2 - \tau_c \right) E^{-1} \frac{2f_R(1 + A e^{-Bx_0})}{h^3}} \quad (11)$$

Las ecs. (10) y (11) permiten calcular el perfil de socavación en cualquier instante. En general, la integración de la ec. (11) requiere hacerse numéricamente. El tiempo de duración del proceso está determinado por el crecimiento de la zona de separación inmediatamente al pie del radier. Imponiendo la condición de que esta zona no se extienda más allá de un límite $x = L$, se tiene el tiempo $t = T$ que corresponde al término de la fase inicial o de degradación pura.

Modelación de la fase intermedia o de desarrollo

Como se ha señalado anteriormente, esta etapa se caracteriza por la presencia de un vórtice o remolino, producto del despegue de fondo del escurrimiento. El vórtice genera una zona de recirculación que termina en el punto de "reapegue" de la vena viva; aguas abajo de este punto el flujo es paralelo al fondo y el proceso de socavación se asemeja al de la fase inicial, es decir, a de-

gradación pura del lecho.

Debido a lo anterior, para la modelación de esta fase es preciso considerar dos zonas y por consiguiente, dos procesos diferenciales. En la zona de recirculación del flujo, aguas arriba del punto de reapegue, es posible considerar al flujo como un chorro en expansión. En la segunda zona, es decir, la ubicada aguas abajo del punto de reapegue, el flujo es a filetes paralelos, salvo muy cerca de dicho punto.

a) Socavación en la zona de recirculación

En la Fig. 2 aparece un esquema que muestra el escurrimiento al pie de un radier durante la fase de desarrollo de la fosa de socavación. Para determinar el perfil de socavación en la zona de recirculación, es preciso escribir la ecuación de continuidad para el sedimento e integrarla desde el punto de reapegue hacia aguas arriba. Para ello, además de ser necesario contar con una ecuación de gasto sólido, se requiere conocer las características del flujo en esta zona, en particular, los esfuerzos de corte o las velocidades a nivel del lecho.

Para determinar las condiciones medias de escurrimiento en la zona de recirculación, partiendo de la hipótesis que el flujo es semi permanente, se hacen dos supuestos básicos : (1) que el escurrimiento sobre la zona de recirculación puede modelarse como un flujo cortante libre al cual se le puede aplicar el método inductivo de Reichardt (Breusers, 1975) y (2) que el escurrimiento dentro de la zona de recirculación es asimilable al flujo detrás de un obstáculo el cual puede modelarse utilizando las relaciones de estelas derivadas por Abramovich (1963).

La aplicación del método inductivo de Reichardt, suponiendo filetes paralelos y rectilíneos, conduce a la siguiente ecuación diferencial :

$$C_{\xi} - C_{yy} = 0 \quad (12)$$

donde

$$C = u^2 + \frac{\hat{p}}{\rho} \quad \xi = \int_0^x \Lambda(x') dx'$$

y $p = \hat{p} + \rho g Z$, siendo Z un eje vertical hacia arriba y Λ un parámetro que define la longitud de transferencia de momentum normal a la dirección del escurrimiento. Para chorros, Λ depende linealmente de x.

Las condiciones de borde para integrar la ec. (12) son:

$$\begin{aligned} y = 0 & \quad C_y = 0 \\ y = h(x) & \quad C = 0 \end{aligned}$$

y la condición inicial:

$$x = 0 \quad C = C(0, y)$$

Resolviendo la ecuación diferencial mediante el método de separación de variables, se obtiene la siguiente expresión para C:

$$C(\xi, y) = \frac{2}{h} \sum_{m=1}^{\infty} e^{-a_m^2 \xi} \cos(a_m y) \int_0^h C(0, y) \cos(a_m y') dy' \quad (13)$$

$$a_m = \frac{\pi(2m-1)}{2h}$$

Esta expresión permite calcular la distribución vertical de las velocidades suponiendo $\hat{p}/\rho = 0$ (para el sistema de ejes de la Fig. 2a), hipótesis que se deriva del supuesto de filetes rectilíneos y paralelos, y conocida la función $h(x)$. Esta función representa la línea donde las velocidades medias dentro de la zona de recirculación son nulas.

Como se ha señalado anteriormente, la modelación dentro de la zona de recirculación ha sido hecha basándose en las relaciones de Abramovich para flujos detrás de obstáculos. En la Fig. 2b aparece ilustrado el flujo detrás de un obstáculo de espesor $2B$ en el interior de una canalización de ancho $2H$. Para la aplicación

de las ecuaciones que se deducen de esta figura, B corresponde a la socavación en el punto de reapeque y H a la altura de escurrimiento sobre el radier.

En la zona de recirculación se identifican dos curvas: una que define el límite de la masa de fluido que está recirculando (curva 03N) y otra determinada por los puntos con velocidad horizontal nula (curva 04N).

Abramovich distingue dos regiones en la zona de recirculación. La primera, de longitud l_1 , se caracteriza porque las líneas de corriente tienen una curvatura pequeña, lo que permite suponer que la variación de la presión es pequeña (sólo en las cercanías de la curva 04N la curvatura es grande, debido al cambio de sentido del flujo). Por el contrario, en la segunda región no es posible suponer una variación de presión pequeña, debido a la gran curvatura de las líneas de corriente.

Para la primera región de la zona de recirculación, se tiene que su longitud adimensional $\bar{l}_1 = l_1/B$ es aproximadamente 5.0. Las coordenadas adimensionales de las curvas que caracterizan dicha región están dadas por las funciones gráficas de la Fig. 3.

Las coordenadas que determinan las curvas en la segunda región están dadas, en forma paramétrica, por las siguientes relaciones:

Curva de velocidad horizontal nula:

$$\left. \begin{aligned} \frac{x_4}{h} &= \frac{H}{\pi h} \ln \left(\frac{H/h}{\sqrt{(H/h)^2 - 2(1+\epsilon)(H/h-1)}} \right) \\ \frac{y_4}{b} &= \frac{1}{\pi} \left(\arctg \frac{\sqrt{1-\epsilon^2}}{\epsilon} + \frac{H}{h} \arctg \frac{\sqrt{1-\epsilon^2}}{H/h-1-\epsilon} \right) \end{aligned} \right\} (14)$$

donde ϵ es el parámetro y $h = 0.46 B$.

Curva que define el límite exterior de la zona de recirculación:

$$e^{\frac{\pi x_3}{h}} \left(\cos \frac{\pi y_3}{h} + i \operatorname{sen} \frac{\pi y_3}{h} \right) = (1 + i\eta) \left[\frac{1 - 2 h/H + i\eta h/H}{(1 - 2 h/H)^2 + (h/H)^2 \eta^2} \right]^{H/h}$$

con η como parámetro e $i = \sqrt{-1}$. Los subíndices de las variables x e y corresponden a los puntos indicados en la Fig. 2b.

Se demuestra que la longitud adimensional de esta región, $\bar{l}_2 = l_2/B$, es poco sensible a las variaciones de H/h , siendo su valor menor, pero cercano a 1.0.

Ahora bien, conocidas las características del escurrimiento tanto fuera como dentro de la zona de recirculación, es posible proseguir con el cálculo de la socavación. Para estos efectos se integra la ecuación de continuidad del sedimento (ec. (1)), haciendo uso de la misma ecuación de gasto sólido empleada anteriormente (ec. (2)), pero utilizando para evaluar τ una velocidad representativa local cerca del lecho móvil \bar{u}_k :

$$\tau = \frac{1}{8} \rho f \bar{u}_k^2 \quad (16)$$

donde $\bar{u}_k = C_u \bar{u}_R$. La velocidad \bar{u}_R se define como la velocidad media en la zona de recirculación entre las curvas $h(x)$ (curva 04N, Fig. 3) y $g(x)$ (curva 03N)

$$\bar{u}_R = \frac{\int_0^h h(x) u dy}{g(x) - h(x)} \quad (17)$$

donde u viene dado de la ec. (13).

La integración de la ecuación de continuidad del sedimento se hace numéricamente, agregándole un término correctivo que considera que parte del gasto sólido que sale de una cierta zona se integra a la fase en suspensión debido a la gran turbulencia del flujo en la zona de recirculación. El término correctivo es la tasa de salida de sedimento dada por:

$$\left(\frac{dg_{susp}}{dx} \right)_R = D(\bar{u}_k^2 - C_v v_s^2)^F \quad (18)$$

donde D , C_v y F son constantes y v_s la velocidad de sedimentación.

La condición inicial para integrar la ecuación es el perfil resultante al término de la fase inicial o de degradación. La condición de borde se debería imponer en el punto de reapegue como $s_s = 0$. Sin embargo, en este punto y en una zona vecina a él, los fuertes gradientes de velocidad (Ver Fig. 4, por ejemplo) existentes ahí, conducen a resultados irreales que obligan a iniciar la integración una cierta distancia aguas arriba (aproximadamente $1/5(l_1 + l_2)$) donde la distribución de velocidades muestra variaciones más graduales. La condición impuesta es $g_s(x - dx) = a g_s(x)$ donde a es un coeficiente de proporcionalidad, que se incluye como parámetro del modelo.

b) Socavación aguas abajo del punto de reapegue

Dado que en esta zona el escurrimiento es prácticamente paralelo al fondo, el proceso de socavación es asimilable a uno de degradación, en forma análoga al de la fase inicial pero considerando términos de corrección en las ecuaciones básicas al igual que en la zona de recirculación, debido a la turbulencia adicional que se genera en la zona vecina al punto de reapegue.

Suponiendo que el gasto sólido está dado por la ec. (2) y que en el balance interviene una tasa de salida de sedimento en suspensión dada por:

$$\left(\frac{dg_{susp}}{dx} \right) = D_1 (\bar{u}^2 - C_{v1} v_s^2)^{F_1} \quad (19)$$

donde D_1 , C_{v1} y F_1 son constantes, se obtiene la siguiente ecuación diferencial para evaluar la socavación.

Definiendo $Z = h_n + S$ (Fig. 2a)

$$Z^{2(E+F_1)+1} Z_t + \alpha(\beta - \tau_c Z^2)^{E-1} \cdot Z^{2F_1} Z_x + \gamma(\epsilon - \delta Z^2)^F Z^{2E+1} = 0 \quad (20)$$

siendo $\alpha = 2 C \cdot E \beta / ((1 - \lambda) \gamma_s)$

$$\beta = \frac{1}{8} \rho f d^2$$

$$\gamma = D_1 / ((1 - \lambda) \gamma_s)$$

$$\delta = C_{v1} v_s^2$$

Para integrar la ec. (20) se utilizan las siguientes condiciones de borde e inicial :

- Condición de borde. $Z = Z_R$ en $x = x_R = l_1 + l_2$ donde $Z_R = h_n + S_R$, siendo S_R la socavación en el punto de reapegue determinada por el modelo de socavación de la zona de recirculación para cualquier tiempo.
- Condición inicial. $Z = Z_T$ donde $Z_{T0} = h_n + S_T$, siendo S_T el perfil de socavación resultante de la fase inicial o de degradación.

Aplicación del modelo

Con el objeto de poder comparar los resultados del modelo desarrollado, se aplicó a un caso para el cual existen mediciones experimentales. De este modo fue posible fijar los parámetros que en él intervienen y verificar la fidelidad del modelo con el fenómeno físico. La experimentación se llevó a cabo en el laboratorio del Centro de Recursos Hidráulicos y en ella se midió la socavación con un palpador de fondo electrónico. El canal de experimentación tiene 29,5 cm de ancho y 50,0 cm de alto, con una de sus paredes de vidrio, lo cual permite observar el fenómeno. El material del lecho móvil fue un sedimento arenoso de $d_{50} = 1.2$ mm y desviación geométrica $\sigma_G = 1.99$. Se consideraron dos experiencias, en una de las cuales la altura de escurrimiento fue 21,30 cm y el caudal 29,47 l/s y en la otra, 20,25 cm la altura y 30,16 l/s el caudal.

Para la operación del modelo matemático se consideraron las siguientes condiciones medias :

- Caudal : 30 l/s
- Altura de escurrimiento : 20 cm
- Tamaño del sedimento : $d_{50} = 1.25$ mm
- Esfuerzo de corte crítico : 0.066 Kg/m²
- Velocidad de sedimentación del sedimento : 0.15 m/s
- Porosidad : 0.25
- Peso específico : 2600 Kg/m³

- Factor de fricción del lecho móvil : 0.034 (resulta de suponer una distribución logarítmica de velocidades)

Además, sobre el radier se consideró una distribución logarítmica de velocidades con pared hidrodinámicamente lisa.

Para la aplicación llevada a cabo se procedió a fijar algunos parámetros y a ajustar otros, de manera de conseguir una coincidencia relativa entre las magnitudes de la socavación observada y calculada.

Los parámetros que se fijaron y los valores correspondientes utilizados aparecen indicados en la Tabla 1. Los parámetros ajustados se dan en la Tabla 2.

TABLA 1. PARAMETROS DEL MODELO FIJADOS

Ecuación	Ec. N°	Parámetros	Observaciones
Gasto Sólido (Etapa 1)	2	C = 1.287 E = 1.5	Valores que toman el coeficiente y el exponente según Meyer-Peter y Müller
Gasto Sólido (Etapa 2), zona de recirculación y aguas abajo de ella.	2	E = 1.5	

TABLA 2. PARAMETROS DEL MODELO AJUSTADOS

Ecuación	Ec. N°	Parámetros	Observaciones
Factor de fricción con cambio de rugosidad en el lecho (Etapa 1)	8	A = 4.06 B = 0.101	Obtenidos a partir del análisis de los trabajos consultados y los resultados que arroja el modelo
Gasto Sólido (Etapa 2), zona de recirculación y aguas abajo de ella	2	C = 0.01	

TABLA 2. (Continuación)

Ecuación	Ec. N°	Parámetros	Observaciones
Gasto Sólido en suspensión	18	D = 4.0 F = 1.0 C = 0.1	
	19	D ^v = 0.005 F ¹ = 1.0 C _{v1} ¹ = 0.1	
Coeficiente de la velocidad en el cálculo del esfuerzo de corte (Etapa 2), zona de recirculación y aguas abajo de ella	16	C _u = 6.5	El valor para el cual no hay arrastre es 4.8
Factor de proporcionalidad del gasto sólido (Etapa 2), zona de recirculación		a = 1.0	

En cuanto a la discretización de x y t para la resolución de las ecuaciones diferenciales mediante diferencias finitas, se concluyó que con $\Delta t = 30$ s y $\Delta x = 2$ mm las soluciones convergen satisfactoriamente.

Hay que hacer notar que si bien según Abramovich la longitud de la zona de recirculación es aproximadamente 6 veces el semi-espesor del obstáculo, se consideró que debido a la presencia de una frontera, esta longitud se veía disminuída, usándose una razón de 5.

Presentación y análisis de los resultados

En las Figs. 4 y 5 aparecen ilustrados algunos de los resultados que arroja el modelo para las condiciones de operación descritas en los párrafos precedentes.

La Fig. 4 corresponde a las distintas distribuciones de la velocidad media dentro de la zona de recirculación que se obtie

nen a medida que progresa la socavación en el tiempo. Lo más destacable de estas distribuciones es : (1) los fuertes gradientes que muestra en las vecindades del punto de reapegue, que como se explicó anteriormente, imposibilitan efectuar un balance de masa de sedimentos realista en esta región, y (2) el rápido crecimiento de la velocidad media de recirculación a medida que transcurre el tiempo. Esto último significa que en las primeras fases del desarrollo del vórtice, éste aumenta rápidamente su poder socavante, tanto por su mayor extensión como por su mayor intensidad (circulación). Aunque no existe una exacta comprobación experimental de ello, este tipo de crecimiento resulta lógico puesto que explica el notable aumento (lineal) de la socavación en las fases iniciales de desarrollo que ha sido observada en otros estudios (Tsuchiya, 1963).

El desarrollo y forma de la fosa de socavación que se obtiene del modelo, para distintos tiempos, aparece ilustrado gráficamente en la Fig. 5. El eje x de esta figura coincide con el lecho original ($t = 0$) y la curva correspondiente a $t = 110$ s es la resultante del modelo de la etapa 1 (fase de degradación pura). Estos perfiles muestran, al menos cualitativamente, una forma similar a la que se observa en la realidad (esto podría comprobarse con perfiles medidos y ajustar los parámetros del modelo si es necesario), salvo junto al radier ($x = 0$), donde se produce una acumulación de material que no es físicamente posible. Esta deficiencia puede ser atribuida a la distribución de velocidades de la zona de recirculación, que en este punto muestra un fuerte gradiente producto de una velocidad local nula y que posiblemente no es tal.

Por último, en la Fig. 6 aparecen los valores de la socavación máxima en función del tiempo (de 0 a 1200 s) calculada con el modelo (círculos vacíos) y los correspondientes valores experimentales (triángulos llenos) obtenidos para un par de condiciones similares a las de operación del modelo ($q = 30$ lt/s y $h_n = 20$ cm). La buena concordancia entre valores teóricos y medidos es evidente, sobre todo si se toma en consideración la dispersión propia de los datos experimentales. Sin embargo, lo más destacable de estos re-

sultados es que muestran que la tasa de crecimiento de la socavación durante las fases iniciales del proceso simulado resulta constante, salvo al comienzo, lo cual concuerda no sólo con las observaciones experimentales del Centro sino también con las del estudio de Tsuchiya (1963), mencionado anteriormente.

Comentarios finales y conclusiones

El modelo desarrollado permite simular las fases iniciales del proceso de socavación que ocurre en un lecho móvil, al pie de un radier, debido a la acción de un flujo bidimensional con superficie libre, y tiene las siguientes características principales:

- a) Considera dos etapas en la evolución del proceso. La primera que coincide con la fase inicial de desarrollo del fenómeno donde la socavación es debida a un proceso de degradación y la segunda, en que interviene en forma dominante el torbellino que se forma al pie del radier.
- b) Para modelar el fenómeno en la etapa inicial o fase de degradación pura, se hace uso de la ecuación diferencial de continuidad para el sedimento y una ecuación de gasto sólido de fondo tipo Meyer-Peter y Müller, bajo el supuesto que el flujo es rectilíneo y paralelo al lecho. Esta fase termina cuando ha transcurrido un tiempo límite sobre el cual no puede despreciarse el efecto del vórtice de fondo.
- c) Para modelar el fenómeno en la segunda etapa, se distinguen dos fases, la primera de las cuales (fase de desarrollo pleno) se caracteriza por el vórtice al pie del radier y una zona de recirculación asociada a él que no modifica sustancialmente el flujo externo. El escurrimiento en esta fase es descrito, para el flujo externo, por ecuaciones deducidas para flujos cortantes libres de aplicar el método inductivo de Reichardt y para el flujo en la zona de recirculación, por ecuaciones deducidas para estelas por Abramovich (1963). Aguas abajo del punto de reapegue de la zona de recirculación, el flujo se considera paralelo y rectilíneo.
- d) Las ecuaciones que describen la fase de desarrollo son básica-

mente ecuaciones diferenciales de continuidad de sedimento que incluyen términos correctivos para tomar en cuenta la parte que se integra al gasto sólido en suspensión, y de gasto sólido de fondo. Estas ecuaciones se integran numéricamente considerando el flujo semipermanente y tomando como condición inicial el perfil resultante de la primera etapa y como condición de borde, la condición de gasto sólido nulo en el punto de reapegue.

- e) La aplicación realizada con el modelo, consistente en reproducir el fenómeno observado en un canal experimental con un radier seguido de un lecho arenoso, conduce a resultados satisfactorios que avalan las bases conceptuales y matemáticas sobre las que se sustenta el modelo.

Referencias bibliográficas

- Abramovich G.N., 1963, The theory of turbulent jets, The MIT Press, MIT, Cambridge, Massachusetts.

- Aguirre-Pe J., 1982, Capa límite interna producida por un cambio de rugosidad, X Congreso Latinoamericano de Hidráulica, AIIH, México.

- Antonia R.A. y Luxton R.E., 1971, The response of a turbulent boundary layer to a step change in surface roughness, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 48.

- Breusers H.N.C., 1975, Computation of velocity profiles in scour holes, Delf Hydraulics Laboratory, Pub. N° 152.

- Tsuchiya Y., 1963, Basic studies on the criterion for scour resulting from flows downstream of an outlet, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto Univ., Bull. N° 63.

- Tsuchiya Y. e Iwagaki Y., 1967, On the mechanism of the local scour from flows downstream of an outlet, IAHR, XII Congress, Fort Collins, Colorado USA.

- Schofield W.H., 1981, Turbulent shear flows over a step change in surface roughness, Journal of Fluid Engineering, Trans ASME, Vol. 103, N° 2.

- Watkins R.D., 1968, Local scour in beds of sand and gravel downstream from a solid apron, Civil Engineering Transactions, The Institution of Engineers, Australia, Vol. CE 10, N° 1, April.

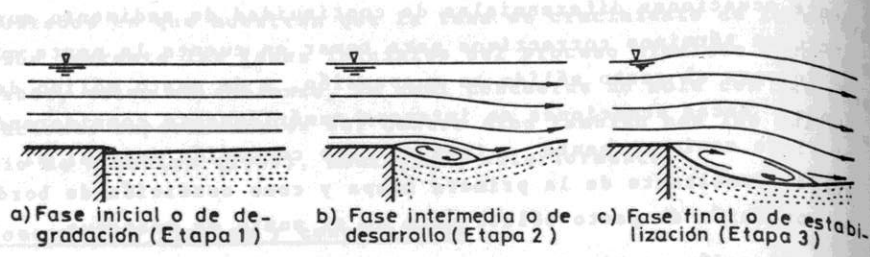


FIG.1 FASES DE LA EVOLUCION DE LA SOCAVACION AL PIE DE RADIERES

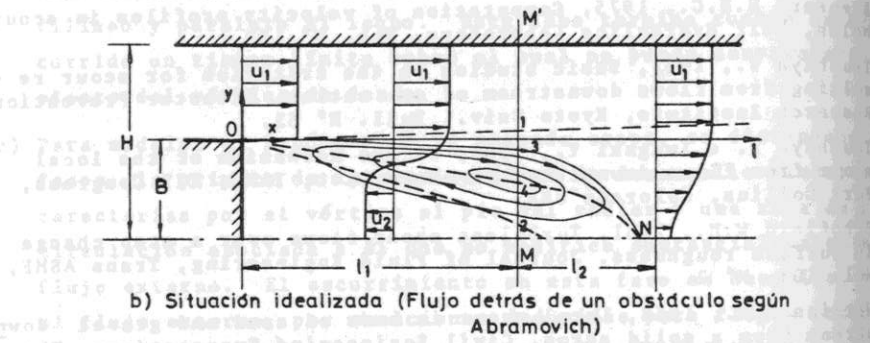
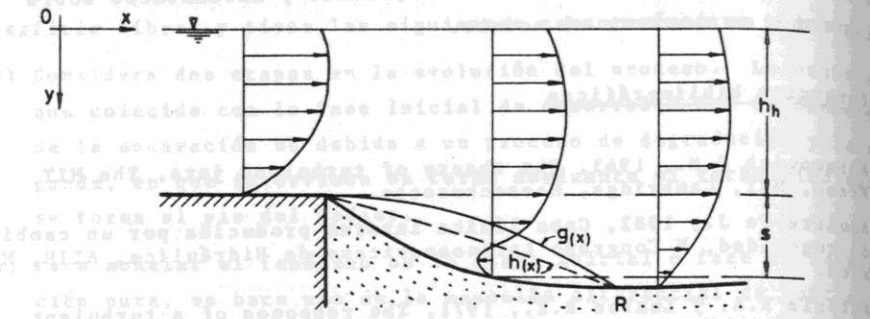


FIG.2 ESQUEMAS PARA LA MODELACION DEL FLUJO FUERA Y DENTRO DE LA ZONA DE RECIRCULACION

d) Las ecuaciones que describen la fase de desarrollo

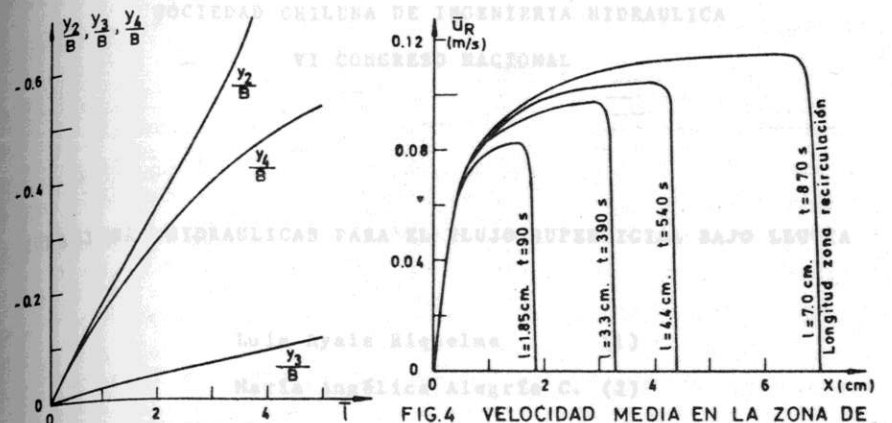


FIG.3 CURVAS QUE CARACTERIZAN LA PRIMERA REGION DE LA ZONA DE RECIRCULACION (Abramovich)

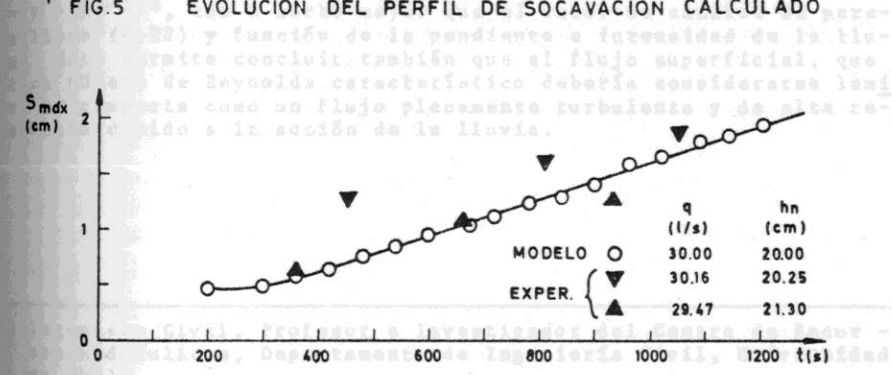


FIG.6 SOCAVACION MAXIMA EN FUNCION DEL TIEMPO