

APLICACIÓN SIMULTÁNEA DE MODELOS FÍSICOS Y MATEMÁTICOS AL ESTUDIO DE EROSIÓN EN ESTRIBOS DE PUENTES

Pablo Daniel Spalletti, Patricia Rut Jaime, José Daniel Brea, Luis Rodríguez

Laboratorio de Hidráulica. Instituto Nacional del Agua

Casilla de Correo 46, Apto. Ezeiza, Buenos Aires - CP 1802 - TE: 011 44800457

E-mail: pspallet@ina.gov.ar, pjaime@ina.gov.ar, dbrea@ina.gov.ar, lrodriguez@ina.gov.ar - Web: <http://www.ina.gov.ar>

RESUMEN

En el presente trabajo se presenta el análisis del escurrimiento en torno a un sistema caracterizado por un terraplén y un estribo de un puente, diferenciando la forma en que se desarrollan los procesos de erosión por contracción y local. Para ello se compararon las observaciones en un modelo físico, con el que se obtiene la erosión total debida a los distintos tipos de socavación antes citados, con los resultados de un modelo matemático bidimensional integrado en vertical, en el que no pueden determinarse los procesos erosivos debidos a los vórtices inducidos por el estribo. Se presentan dos situaciones de ensayo para una estructura de 5,25 metros de largo, localizada en un canal de 8,40 metros de ancho, adoptándose tirantes de 25 centímetros y caudales de 200 y 385 litros por segundo. Tanto la construcción y operación del modelo físico como la implementación del modelo matemático están incluidas en el desarrollo de un proyecto de investigación financiado por la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica de Argentina.

ABSTRACT

In the present paper the analysis of the flow around a bridge abutment appears, differentiating the way in which to the processes of contraction erosion and local erosion are developed. In order to make these studies, observations in a physical model in which the total erosion is obtained due to the different types of scour before mentioned, were compared with the results of a bidimensional mathematical model integrated in vertical, in which the erosive processes due to the vortices induced by the abutment cannot be determined. Two situations for a structure with a length of 5.25 meters, located in a channel of 8.40 meters wide, appear, being adopted initial depths of 25 centimeters and discharges of 200 and 385 liters per second. As much the construction and operation of the physical model as the implementation of the mathematical model, are included in the development of an investigation project financed by the National Agency of Scientific and Technological Promotion of Argentina.

INTRODUCCIÓN

La determinación de la erosión máxima en estribos de puentes y en sus terraplenes de aproximación para el diseño hidráulico, plantea ciertas dificultades debido a las limitaciones de las formulaciones de cálculo tradicionales.

En correspondencia con este tipo de estructuras se estará en presencia de diferentes procesos erosivos que si bien ocurren en forma simultánea, para poder proceder a su estudio se tipificarán de acuerdo a sus causas y a sus escalas de tiempo como: erosión generalizada que se corresponde con el movimientos general de sedimentos en el fondo de un río, erosión por contracción donde los sedimentos son puestos en movimiento debido a la contracción del flujo inducida por la estructura, y erosión local debida al flujo tridimensional y vórtices inducidos por el terraplén y el estribo.

La complejidad de estos fenómenos es evidente y por ello el estudio de los procesos erosivos se ha basado históricamente en estudios experimentales a partir de los cuales han sido desarrolladas y publicadas las expresiones de cálculo (Melville, 1992; Lim, 1997; Kothyari - Ranga Raju, 2001; Richardson, 2002). Estas experiencias en general se han realizado para

estribos verticales, con las limitaciones propias de las condiciones de ensayo, tanto en relación a las escalas de los modelos, los materiales granulares que conforman el lecho y los parámetros hidráulicos posibles de ensayar en canales de laboratorio.

Pero una cuestión básica es que en todos los estudios se considera como valor de erosión local, directamente a la observada en las experiencias sin considerar que la misma incluye tanto los efectos de contracción del flujo como los debidos a los flujos tridimensionales inducidos por las estructuras.

En el presente trabajo se presenta el análisis de un escurrimiento en torno a un sistema caracterizado por un terraplén y un estribo de un puente, diferenciando la forma en que se desarrollan los diferentes tipos de erosión, fundamentalmente la local.

Esta tarea se realizó mediante la comparación de las observaciones en un modelo físico, con el que se obtiene la erosión total debida a los distintos tipos de erosión antes citados, con los resultados de un modelo matemático bidimensional integrado en vertical, en el que no pueden determinarse los procesos erosivos debidos al flujo tridimensional.

Restando al valor de la socavación obtenido en el modelo físico el correspondiente a la modelación matemática para las mismas condiciones de ensayo, se dedujo la erosión local. La no linealidad debida a que el desarrollo inicial de la fosa de erosión por la acción local induce un cambio en el flujo en torno al estribo (Scacchi, 2002), trató de tenerse en cuenta mediante el ajuste del modelo numérico, aunque este efecto pierde significación al final de los ensayos cuando los procesos tienden a su equilibrio, que es la condición en la cual se realizó la comparación de los resultados de ambos modelos.

Tanto la construcción y operación del modelo físico como la implementación del modelo matemático están incluidas en el desarrollo de un proyecto de investigación financiado por la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica de Argentina. En dicho proyecto está prevista la realización de ensayos para diversas condiciones de funcionamiento hidráulico y diferentes configuraciones de estribo, tanto respecto del grado de contracción del flujo como de la inclinación de los taludes. En este trabajo, y dado que el proyecto global se encuentra en plena ejecución, se han adoptado sólo dos condiciones para la realización de la comparación entre modelos, una utilizada para calibrar los aspectos hidráulicos del modelo numérico en que la erosión local fue muy baja, y otra con un desarrollo notable de la fosa de erosión.

DESCRIPCIÓN DEL MODELO FÍSICO

El modelo físico está implementado en un canal ubicado en el Laboratorio de Hidráulica del Instituto Nacional del Agua con un ancho de 8,40 metros y un tramo de 8 metros de longitud a fondo móvil, con arena cuyas características se indican en la Tabla 1 de acuerdo con tres muestreos del material, donde se coloca la estructura que representa al terraplén y al estribo (Figura 1). La máxima capacidad de bombeo supera los 500 litros/s y pueden ensayarse tirantes hasta de 30 centímetros.

Tabla 1.- Comportamiento de los flujos

	M1	M2	M3
D ₅₀	380µm	365µm	370µm
σ	1.55		



Figura 1.- Vista general del modelo físico desde aguas arriba.

DESCRIPCIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO

El modelo hidrodinámico utilizado es el código bidimensional de elementos finitos RMA2 (USACE, 2003a) para simulaciones numéricas a fondo fijo. El mismo se acopla a la rutina SED2D para cálculos a fondo móvil (USACE, 2003b). El RMA2 originalmente desarrollado por el U.S: Army Corps of Engineers, resuelve las ecuaciones integradas en la vertical de Navier Stokes, previamente promediadas en el sentido de Reynolds. El SED2D resuelve la conocida ecuación de transporte de un escalar pasivo, acompañado de un cálculo sencillo para el recrecimiento o decrecimiento de la cota del lecho según sea el signo del término fuente presente en la ecuación de transporte. Las ecuaciones que gobiernan el problema analizado, escritas en forma no conservativa, son:

$$\nabla \cdot \bar{u}h = 0 \quad (1)$$

$$\bar{u} \cdot \nabla \bar{u} = -g\nabla h - g\nabla \eta - \frac{\tau_b}{\rho h} + \nu_t \nabla^2 \bar{u} \quad (2)$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \bar{u} \cdot \nabla c = \nabla \cdot (\varepsilon \nabla c) + \frac{c - c_e}{t_c} \quad (3)$$

donde $\bar{u} = (u, v)$ es el campo de velocidades de componentes u y v en las direcciones cartesianas x e y , respectivamente, h es la profundidad local del agua, η es la elevación local del lecho, g es la aceleración de la gravedad, ν_t es el coeficiente de viscosidad de remolino, ρ es la densidad del agua, c es la concentración en peso por unidad de volumen de sedimento transportado en suspensión, c_e es la llamada concentración de equilibrio o saturación que define la capacidad de transporte de la corriente calculada a través de fórmula de Ackers-White (1973), ε es el coeficiente de dispersión mecánica (difusividad), t_c es el tiempo característico o constante de relajación del desbalance entre la concentración actual y la de

equilibrio, ∇ es el operador gradiente bidimensional y τ_b es la tensión de corte del lecho, modelada con una relación de cierre del tipo Manning, siendo n el coeficiente de rugosidad de Manning:

$$\bar{\tau}_b = \rho g n^2 \bar{u} \sqrt{u^2 + v^2} / h^{1/3} \quad (4)$$

El sistema de ecuaciones (1)-(3) es resuelto mediante la formulación totalmente implícita de Galerkin del Método de Residuos Ponderados. La discretización espacial utilizada en la modelación está basada en elementos cuadrados y triangulares previendo una representación detallada en la zona correspondiente a las proximidades del estribo. En la Figura 2 se presenta una planta del modelo con la indicación de los nodos de la malla implementada, indicándose también la localización del estribo y la zona en que se comparan los resultados del modelo matemático con los del físico.

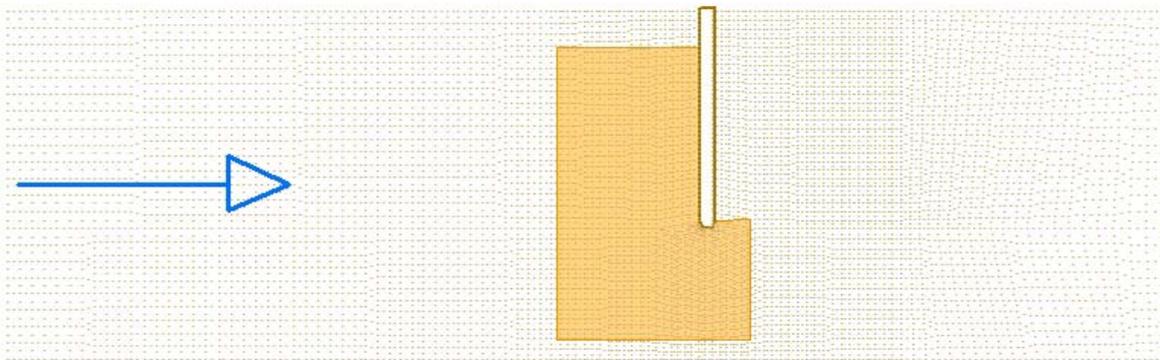


Figura 2.- Planta del modelo numérico implementado. Indicación de la zona próxima al estribo donde se comparan los resultados del modelo matemático y del físico.

Para la descripción del material granular del lecho mediante el modelo matemático, se adoptó un diámetro característico D_{50} de 370 μm .

RESULTADOS

Se presentan los resultados de ambos modelos para las siguientes condiciones:

- Contracción de la sección de 5,25 metros (sobre un ancho total de 8,40 metros), caudal de 200 litros/s y tirante de 25 centímetros.
- Contracción de la sección de 5,25 metros, caudal de 385 litros/s y tirante de 25 centímetros.

La primera se correspondió con una situación en que la erosión local no es significativa y por ello se adoptó como una de las condiciones para ajustar los parámetros de intercambio turbulento del modelo matemático que definen las características del flujo en torno a la estructura.

De esta manera se compararon los campos de flujo obtenidos en ambos modelos, presentándose en la Figura 3 una planta con las isotérmicas en torno al estribo y en la zona de aproximación.

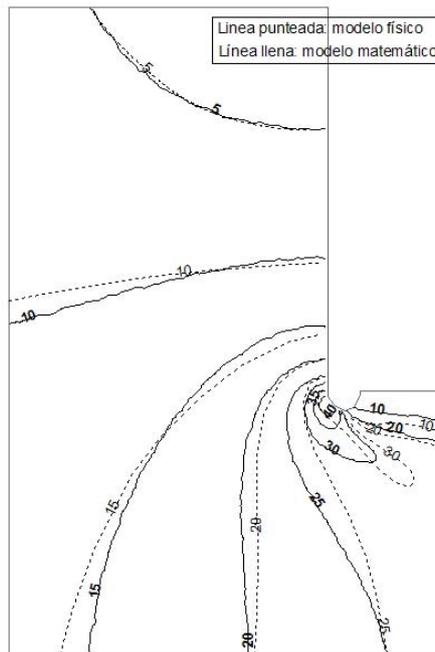


Figura 3.- Comparación de isotáqueas obtenidas de los ensayos en el modelo físico y en el numérico para el ensayo con caudal de 200 litros/s y tirante de 25 centímetros.

Puede observarse que en los dos modelos el campo de velocidades en el plano horizontal son semejantes, a excepción de un sector localizado en la zona donde se desarrolla la pequeña fosa de erosión en el modelo físico. La similitud entre ambos modelos se obtuvo adoptando un coeficiente de difusión turbulenta de $5 \text{ m}^2/\text{s}$ en la modelación matemática.

Una vez ajustados los parámetros del modelo matemático de forma tal de asegurar una adecuada representación del campo de flujo bidimensional en planta en torno a la estructura, se procedió a analizar para la segunda condición de ensayo, es decir un caudal de 385 litros/s y tirante de 25 centímetros, tanto el campo de velocidades como el desarrollo de los procesos de erosión y depósito en el entorno del estribo.

En la Figura 4 se observan los campos de velocidades en el plano horizontal para esta condición de ensayo, en la que puede apreciarse que si bien el patrón general del escurrimiento está bien representado, y que pone de manifiesto la adecuada selección de los parámetros de ajuste del modelo matemático, se observan diferencias en la zona cercana al estribo, en donde en el modelo físico se desarrolla la fosa de erosión debida en parte al flujo tridimensional y al vórtice de eje horizontal inducido por la estructura.

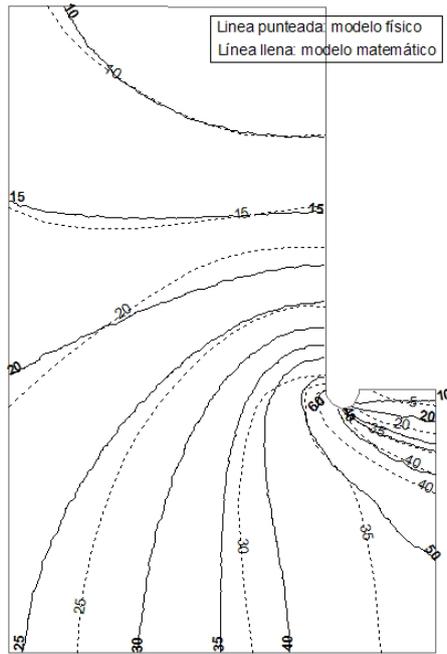


Figura 4.- Campos de velocidades en el plano horizontal (V_{xy}) para los modelos físico y matemático. $Q=385$ lt/s, $h=25$ cm.

A partir de la nivelación del fondo en el modelo físico (Figura 5) se procedió a digitalizar la batimetría resultante, lo que permitió a su vez determinar un modelo digital de la configuración del fondo una vez finalizado el ensayo (Figura 6), el que tuvo una duración del orden de las 20 horas.



Figura 5.- Configuración final del fondo móvil del modelo físico. Ensayo: $Q=385$ lt/s, $h=25$ cm.

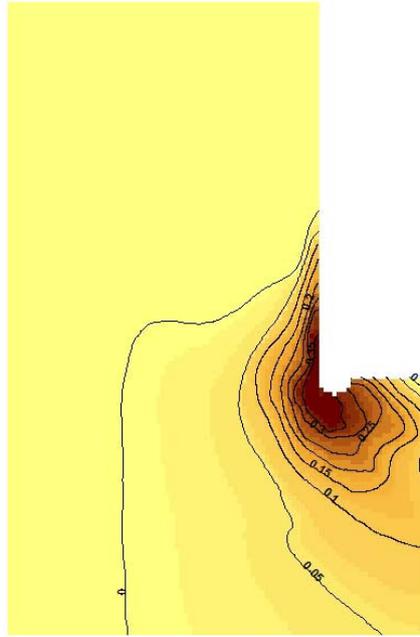


Figura 6.- Modelo digital del fondo móvil del modelo físico. Ensayo: $Q=385$ lt/s, $h=25$ cm.

A partir de la implementación del módulo morfológico del modelo matemático, se determinó la conformación del fondo resultante de la simulación, volcándose también dicha información a un modelo digital, que se presenta en la Figura 7.

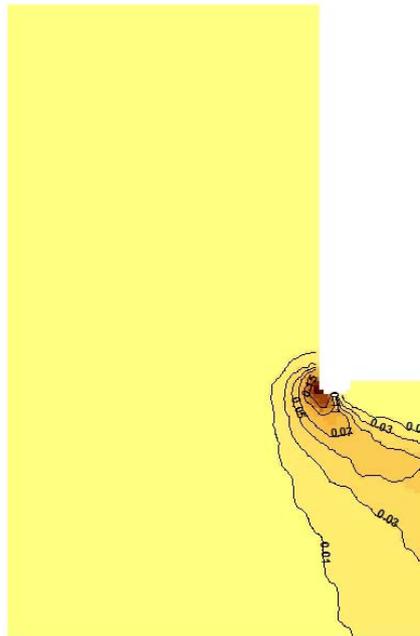


Figura 7.- Configuración final del fondo móvil. Ensayo: $Q=385$ lt/s, $h=25$ cm.

Operándose con los resultados de los dos modelos, se calculó la diferencia entre ambos para las dos situaciones analizadas, obteniéndose los gráficos de las Figuras 8 y 9 para las experiencias con 200 y 385 litros/s respectivamente.

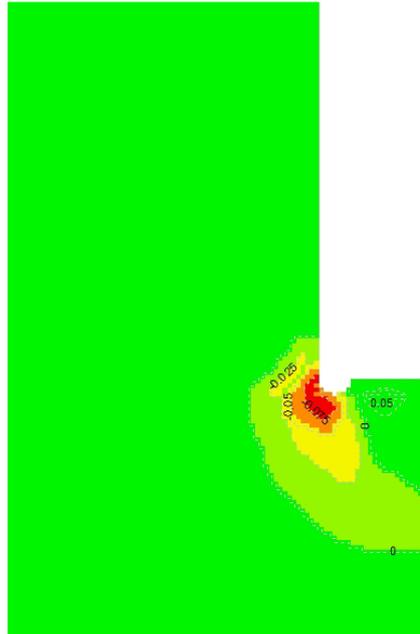


Figura 8.- Diferencia en la configuración del fondo al final del tiempo de ensayo y simulación.
 Ensayo: $Q=200$ lt/s, $h=25$ cm.

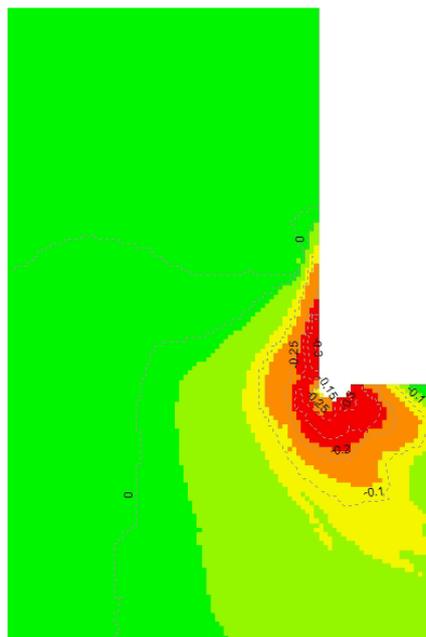


Figura 9.- Diferencia en la configuración del fondo al final del tiempo de ensayo y simulación.
 Ensayo: $Q=385$ lt/s, $h=25$ cm.

Las diferencias en la situación del fondo se asociaron con los procesos que no pueden evaluarse en un modelo bidimensional integrado en la vertical, pero que sí afectan los resultados del modelo físico, como ser los fenómenos vinculados al desarrollo del flujo tridimensional y vórtices inducidos por la estructura.

Para analizar la forma en que se desarrolla el vórtice de eje horizontal generado aguas arriba del estribo por la curvatura del flujo en la zona de aproximación y cuya esquematización se

indica en la Figura 10, se evaluó la componente de la velocidad en la vertical registrada en los puntos de medición en el modelo físico.

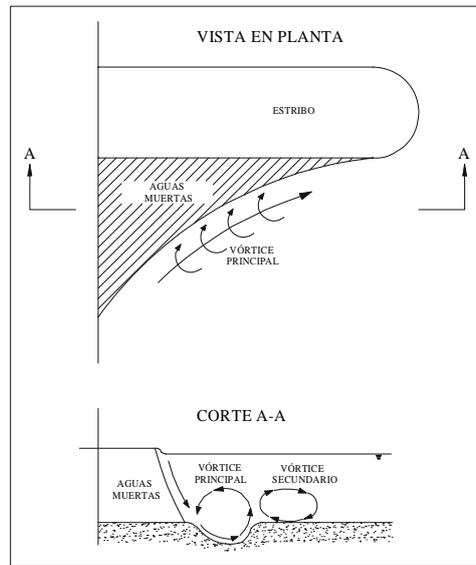


Figura 10.- Esquema del desarrollo de vórtices al pie de estribos.

De esta manera se generaron las Figuras 11 y 12 para las dos condiciones de ensayo analizadas, en las que se indican las isotáqueas de la velocidad en la vertical y donde se destacan los sectores del modelo con velocidades descendentes y ascendentes, a partir de donde es posible estimar la posición y el desarrollo de la corriente helicoidal responsable de los procesos de erosión local en torno a la estructura.

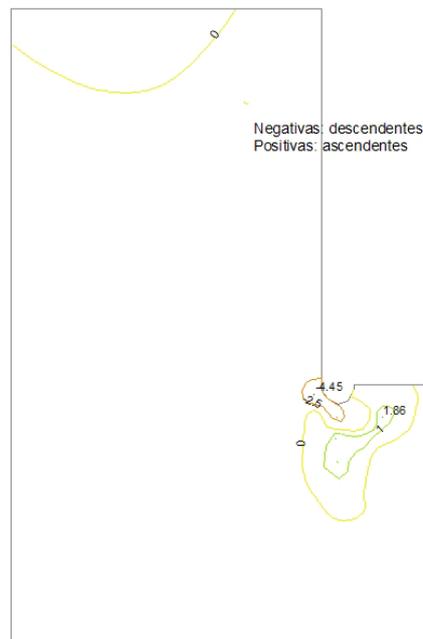


Figura 11.- Velocidades verticales (V_z) en el modelo físico. $Q=200$ lt/s, $h=25$ cm.

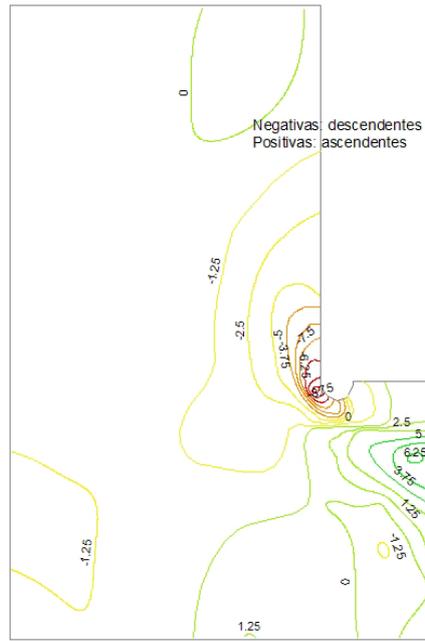


Figura 12.- Velocidades verticales (V_z) en el modelo físico. $Q=385$ lt/s, $h=25$ cm.

Si se superponen los registros de velocidades en vertical con las diferencias entre las conformaciones del lecho al final de los ensayos para el modelo físico y numérico (Figuras 13 y 14), se observa que hay un alto grado de concordancia entre máximas diferencias con la localización de la corriente helicoidal.

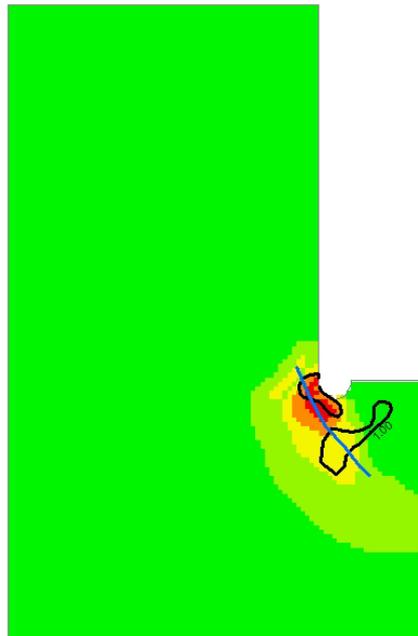


Figura 13.- Velocidades verticales (V_z) en el modelo físico y diferencias en el lecho con ambos modelos. $Q=200$ lt/s, $h=25$ cm.

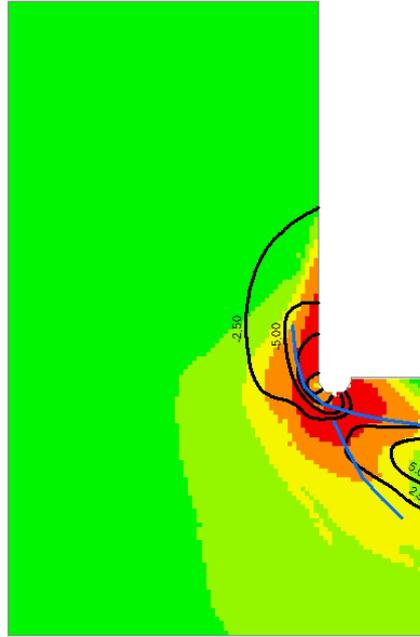


Figura 14.- Velocidades verticales (V_z) en el modelo físico y diferencias en el lecho con ambos modelos.
 $Q=385$ lt/s, $h=25$ cm.

De esta manera podría asumirse, al menos en forma preliminar hasta analizar un mayor número de condiciones de ensayo, que la estimación de la erosión por contracción estaría razonablemente bien representada mediante los resultados del modelo matemático, y que la diferencia entre los registros en el modelo físico y las estimaciones del fondo del lecho con el modelo matemático indicaría la erosión local en el estribo debida a los vórtices inducidos por la estructura.

CONCLUSIONES

Se ha presentado una metodología para estudiar los procesos erosivos en torno a estribos de puentes, basado en la aplicación simultánea de modelos físicos y matemáticos, con el objeto de evaluar la forma en que se desarrollan los diferentes tipos de erosión que tienen lugar en torno a estas estructuras.

A partir de los resultados presentados en el presente trabajo, para dos situaciones de ensayo con diferentes caudales de un estribo vertical con nariz redondeada, puede expresarse que la erosión local en el estribo debida a los vórtices inducidos por la estructura puede estimarse mediante la diferencia entre los registros del fondo del lecho en el modelo físico y los resultados del modelo matemático morfológico bidimensional.

El análisis presentado para un par de casos particulares, se realizará para todas las condiciones de ensayo previstas en el proyecto global en que se enmarca el estudio, con el objeto de dar sustento a la metodología y obtener expresiones para cuantificar los procesos de erosión local independizándolos de la erosión por contracción.

LISTA DE SÍMBOLOS

h : profundidad hidráulica

u, v :	componentes de la velocidad promediada en la vertical en las direcciones x e y
Q :	caudal
g :	aceleración de la gravedad
τ_b :	tensión de corte del lecho
η :	elevación local del lecho
ρ :	densidad del agua
D_{50} :	tamaño del sedimento que no es superado por el 50 % del material
c :	concentración en peso por unidad de volumen de sedimento en suspensión
c_e :	concentración de equilibrio
ν_i :	coeficiente de viscosidad de remolino
t_c :	tiempo característico
n :	valor de rugosidad de Manning
ε :	coeficiente de dispersión mecánica (difusividad)
∇ :	operador gradiente bidimensional
V_{xy} :	velocidad en el plano horizontal
V_z :	velocidad vertical

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Kothyari, U.C.; Ranga Raju K.G. (2001). “Scour Around Spur Dikes and Bridge Abutments”. *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 39, No. 4.

Lim, S.Y. (1997). “Equilibrium Clear-Water Scour Around an Abutment”. *Journal of Hydr. Eng*, March 1997.

Lim, S.Y.; Cheng N.S. (1998). “Prediction of Live-Bed Scour at Bridge Abutments”. *Journal of Hydraulic Engineering*, June 1998.

Melville, B.W. (1992). “Local Scour at Bridge Abutments” Paper and Discussion. *Journal of Hydraulic Engineering*, April 1992.

Richardson E.V. (2002). “United States Practice for Bridge Scour Analysis”.

Scacchi, G.; Martín Vide, J.P., Schreider, M. (2002). “Incidencia del Tirante y de la Erosión Local en Estribos sobre la Distribución de Caudales en Secciones de Puentes”. *XX Congreso Latinoamericano de Hidráulica – La Habana. Cuba.*

US Army, Engineer Research And Development Center Waterways Experiment Station Coastal and Hydraulics Laboratory (2003a): Users Guide To SED2D WES Version 4.5.

US Army, Engineer Research And Development Center Waterways Experiment Station Coastal and Hydraulics Laboratory (2003b): Users Guide To RMA2 WES Version 4.5.