

Evaluación del efecto del paramento inclinado de pilares en la socavación local
Evaluation of effect of inclined face bridge pier on the local scour

Paul Jaramillo-Mejía¹

Jorge Reyes-Salazar²

¹Universidad Privada de Piura, Instituto de Ingeniería Hidráulica, Hidráulica y Sanitaria, Piura, Perú, paul.jaramillo.mejia@gmail.com

²Universidad Privada de Piura, Instituto de Ingeniería Hidráulica, Hidráulica y Sanitaria, Piura, Perú, jorge.reyes@udep.pe

Autor para correspondencia: Paul Jaramillo-Mejía,
paul.jaramillo.mejia@gmail.com

Resumen

Comprender la profundización del cauce alrededor de pilares con el paramento inclinado, como consecuencia del fenómeno de socavación local, requiere del análisis de la interacción entre el flujo y la estructura mediante modelos físicos, numéricos y mediciones en campo. A lo largo de los años se ha experimentado mediante la simulación física y mediciones en campo, sin embargo, este trabajo de investigación contribuye, a través de la modelación numérica, al estudio del efecto en la socavación local del cauce que produce la inclinación del paramento del pilar. Se utilizó el *software* tridimensional *ANSYS CFX*, el cual tiene la capacidad de simular la dinámica del flujo a través del pilar, llegando a poder visualizar velocidades y dirección de líneas de corriente. Por otro lado, se analizó la relación indirecta que estos parámetros del flujo tienen en la socavación local. El estudio se les realizó a dos formas de pilares: el primero reduce la sección transversal desde la superficie hasta la base, y la segunda forma reduce la sección transversal desde la

base hasta la superficie. Los resultados mostraron que el primer tipo de pilar es más favorable para generar socavación local, encontrándose velocidades en la cara del pilar mayores a 50%.

Palabras clave: pilar, socavación local, dinámica computacional de los fluidos.

Abstract

Understanding the channel depth around bridge piers, whose side face is inclined as a consequence of local scour, requires the analysis of the interaction between flow and structure through the physical and numerical simulation and field measurements. Over the years, tests have been performed through physical simulation and field measurements; however, this paper contributes through the numerical simulation to the study of the effect produced by the inclination of the pier face on the phenomenon of local scour. The three-dimensional software *ANSYS CFX* was used which has the capacity to simulate the flow dynamics through the bridge pier. Thus, water flow patterns such as direction and velocity have been analyzed to find the relationship that they have with the local scour. The study was made with two shapes of piers; the first one reduces the transversal section from the top to the smaller bottom base, and the second shape reduces the transversal section from the bottom to the smaller top base. The results show that the first type of shape was favorable to generate greater scour depth, finding velocities greater than 50% in the pier face.

Keywords: Bridge pier, local scour, computational fluid dynamics.

Recibido: 21/02/2018

Aceptado: 19/03/2019

Introducción

Durante los últimos años, varios investigadores han estudiado la socavación local del cauce alrededor de pilares de puentes con el paramento inclinado. La investigación de la inclinación en la cara lateral del pilar permite que los cálculos de socavación local sean más certeros y se incremente la seguridad estructural del puente. Breusers y Raudkivi (1991), Yanmaz (2002), y Jaafar (2005) analizaron mediante modelos físicos a los pilares cuya sección transversal se reduce en la parte alta y la parte baja, respectivamente, evidenciando que con el segundo tipo de pilar se generaba mayor profundización del cauce. Jaafar (2005) dice que la diferencia en el efecto erosivo se puede entender por los componentes vertical y horizontal de la resultante del flujo descendente que colisiona con el paramento de los pilares en la dirección aguas arriba, tal como se muestra en la Figura 1. Por un lado, en el pilar con reducción en la parte alta, la componente horizontal del flujo descendente se encuentra en dirección opuesta al vórtice de herradura, por lo tanto, se produce interferencia y causa una menor capacidad de que estos vórtices puedan transportar el sedimento hacia aguas abajo, mientras que la componente vertical del flujo descendente se debilita hacia el fondo del cauce debido a que su acción incide sobre la cara inclinada del pilar. Sin embargo, en el pilar con reducción en la parte baja, la componente vertical de flujo descendente impacta el fondo de manera directa y se recogen más sedimentos, pero su resistencia disminuye hacia la base debido a la reducción de la sección del pilar.

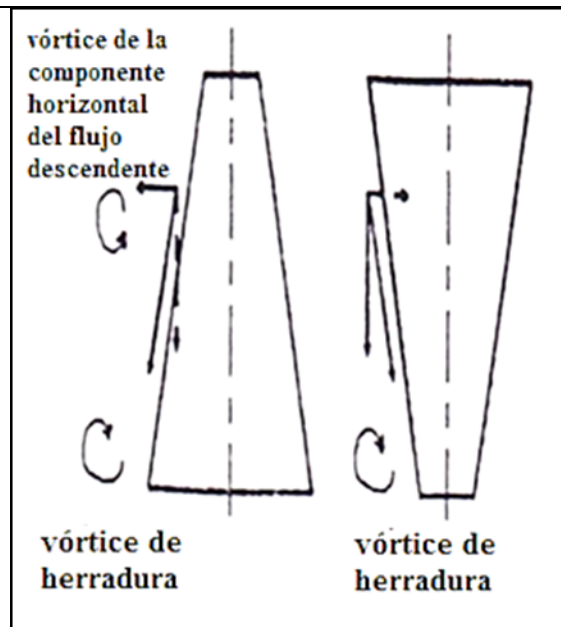


Figura 1. Componentes del flujo en la dirección aguas arriba del pilar con reducción en la parte alta (izquierda) y con reducción en la parte baja (derecha).

Además de los estudios mediante modelo físico y mediciones en campo de los pilares con el paramento inclinado, este artículo contribuye a su conocimiento a través de la modelación numérica, la cual proporciona una visualización tridimensional de la interacción entre el pilar, el agua y el cauce, permitiendo analizar con más detalle las líneas de corriente y velocidades, que en comparación con la dinámica de fluidos analítica y experimental no se ha podido realizar.

Se utilizó el *software* tridimensional *ANSYS CFX*, que ha mostrado las condiciones del flujo que permiten una mayor degradación del cauce alrededor del pilar que reduce su sección transversal desde la superficie hacia la base.

Materiales y métodos

Con base en la forma de pilar con perfil cónico para evaluar el efecto de la pendiente en la dirección del flujo, se emplearon dos formas de pilares de sección rectangular: el primero reduce su sección desde la superficie hacia su base, y el segundo reduce su sección desde la base hacia la superficie.

El programa experimental se efectuó mediante el *software* tridimensional *ANSYS CFX*, el cual representó tridimensionalmente la dinámica del flujo alrededor de los pilares, llegando a poder visualizar las líneas de corrientes y velocidades. Por otro lado, es importante señalar que *ANSYS CFX* no puede representar el cambio del cauce a través del tiempo de simulación, lo que hubiese permitido observar la erosión local alrededor de los pilares. Sin embargo, el efecto erosivo se pudo evidenciar a través del estudio de los parámetros del flujo. Para ello se analizaron los pilares en dos tipos de escenarios del cauce: el primero, con el fondo del cauce sin erosionar alrededor de los pilares, se denominó fondo plano; el segundo, con una profundización del cauce alrededor de los pilares, se denominó fondo erosionado. De este modo se representaba el proceso de erosión local en dos tiempos.

Los parámetros iniciales del modelo numérico se tomaron del estudio en modelo físico de los pilares del Puente Cáceres en el río Piura, los cuales fueron sometidos a caudales extraordinarios del fenómeno El Niño del año 1998; tal estudio fue realizado por la Universidad de Piura (2001).

Fórmulas generales de transporte

El *software ANSYS CFX* se rige de la metodología CFD (*Computacional Fluid Dynamics*), con la cual obtiene la solución de los problemas de mecánica de fluidos, resolviendo de forma numérica las ecuaciones de Navier-Stokes y promediado de Reynolds, las que se presentan a continuación:

- Conservación de la masa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0$$

- Conservación del momentum:

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + S_M$$

- Conservación de la energía:

$$\frac{\partial(\rho h_{tot})}{\partial t} - \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U h_{tot}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot (U \cdot \tau) + U \cdot S_M + S_E$$

Donde:

$$\tau = \mu(\nabla U + (\nabla U)^T) - \frac{2}{3} \delta \nabla \cdot U$$

$$h_{tot} = h + \frac{1}{2} U^2$$

Donde p es la presión; ρ , la densidad del fluido; U , el vector velocidad; τ , el tensor de tensiones turbulentas; h , la energía; S_M , el término de las fuerzas másicas; S_E , el término fuente; λ , la viscosidad volumétrica; μ , la viscosidad dinámica, y δ es el delta de Kronecker.

Para resolver el problema de clausura (sistema con más incógnitas que ecuaciones) se han desarrollado algoritmos que tienen en cuenta modelos de turbulencia de distintos grados de complejidad, que van desde los modelos algebraicos de vorticidad para la viscosidad ($k - \epsilon$, RNG , $k - \omega$) hasta los modelos de tensión de Reynolds (RMS) (ANSYS CFX, 2006).

Modelo numérico

Las características geométricas de los pilares se tomaron del puente Cáceres (Figura 2). Es evidente que la forma del pilar presenta reducción de su sección en la parte baja, sin embargo, por fines de investigación, se realizó un pilar semejante, pero con reducción en la parte alta.



Figura 2. Modelo físico de los pilares de puente Cáceres (Universidad de Piura, 2001).

En la Figura 3 se observan ambos modelos de pilar, los cuales presentan la sección transversal rectangular y el perfil cónico.

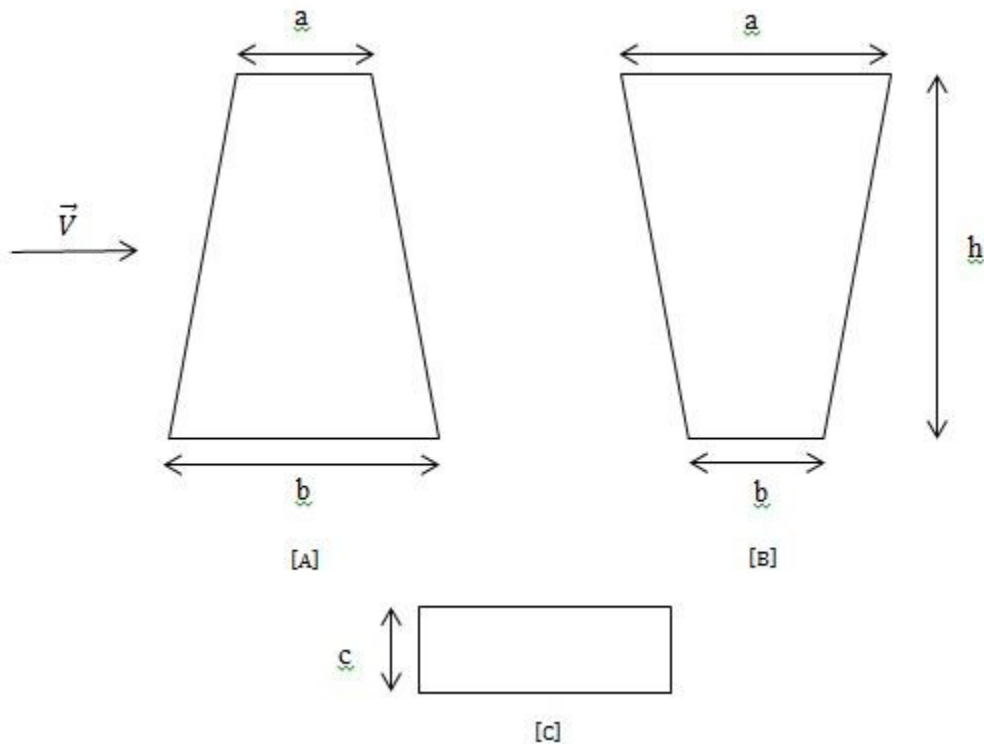


Figura 3. Modelos de pilar: a) pilar con el paramento inclinado hacia aguas abajo; b) pilar con el paramento inclinado hacia aguas arriba; c) sección transversal.

Ya se ha mencionado que *ANSYS CFX* no puede representar la erosión del cauce en el tiempo, por ello se emplazaron los pilares dentro de dos escenarios: el primero con el fondo del cauce sin erosionar o fondo plano (Figura 4), representando una condición inicial del flujo cuando no ha erosionado el cauce; y por otro lado, con un foso o fondo erosionado (Figura 5), representando una condición final del flujo cuando ya erosionó el cauce.

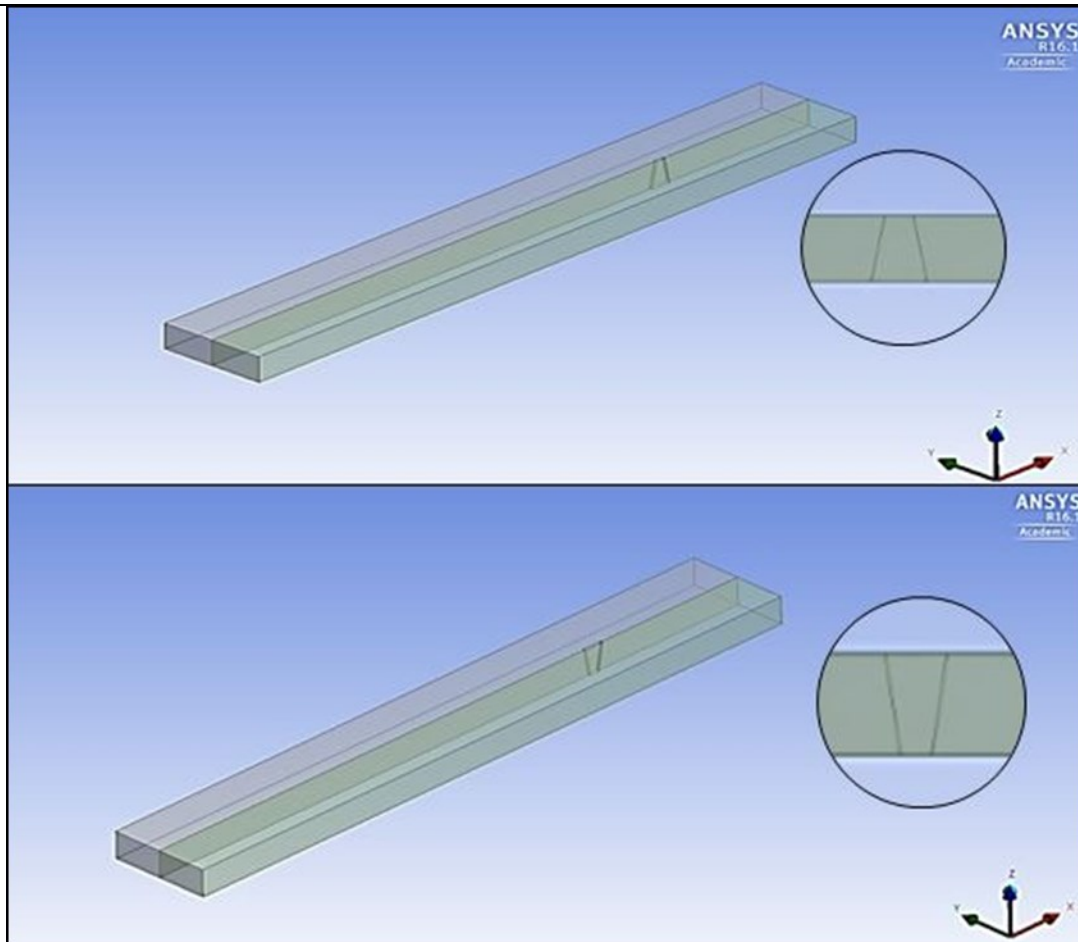


Figura 4. Escenario del cauce con el fondo sin erosionar alrededor del pilar.

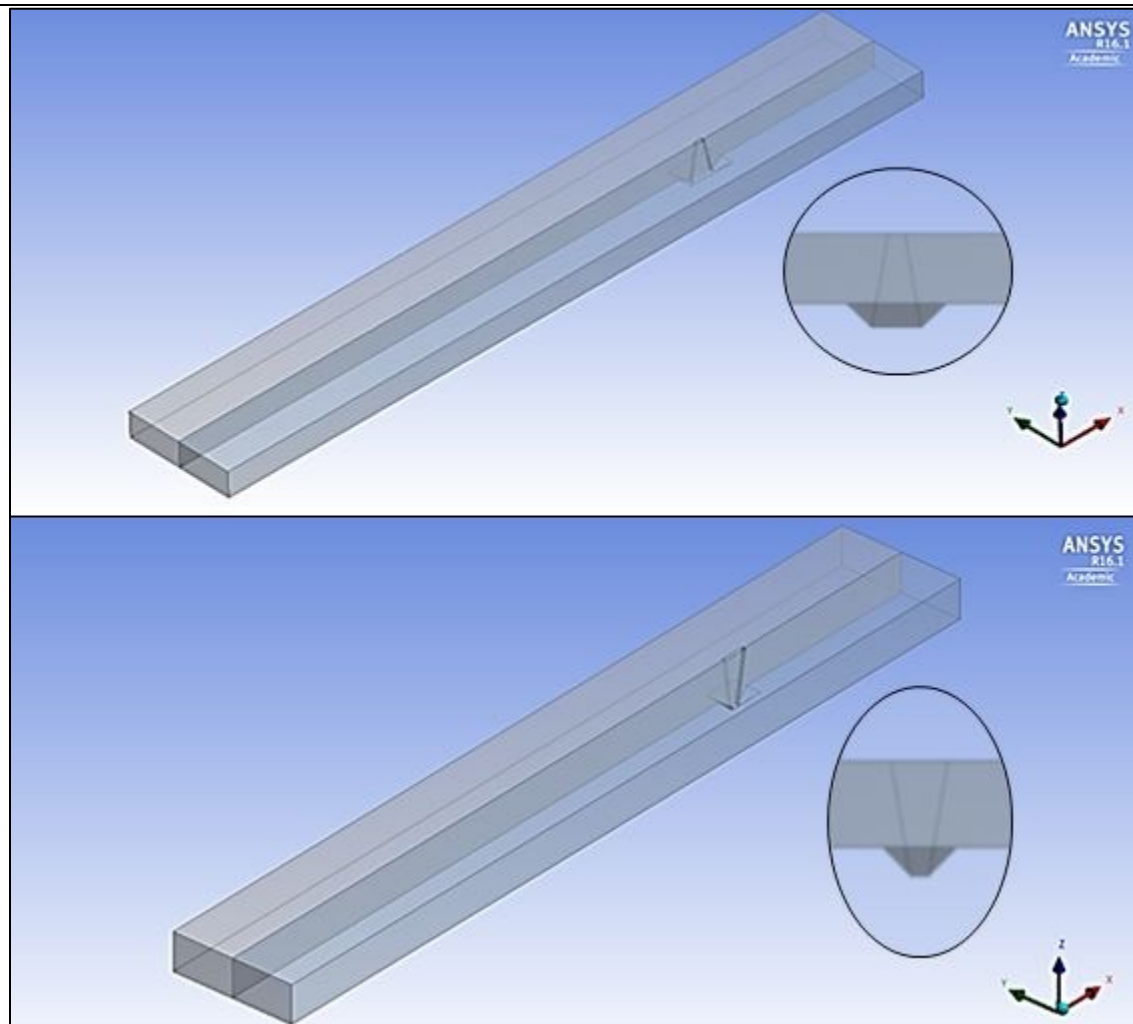


Figura 5. Escenario del cauce con el fondo erosionado alrededor del pilar.

En la Tabla 1 se muestran los parámetros geométricos de los pilares en ambos escenarios.

Tabla 1. Parámetros geométricos de los pilares.

Ensayo	Tipo de escenario	Modelo de pilar	Parámetro geométricos				
			Largo		Ancho	Altura	
			a (m)	b (m)	c (m)	h (m)	

1	Fondo plano	A	3	6	1	9
2		B	6	3	1	9
3	Fondo erosionado	A	2	6	1	12
4		B	6	2	1	12

Las condiciones iniciales del flujo se tomaron del estudio en modelo físico del puente Cáceres (Universidad de Piura, 2001), el cual se sometió a caudales extraordinarios de 3 900 m³/s, observándose aguas arriba una velocidad promedio de 4 m/s y un tirante de 6 m. Asimismo, se observó una profundidad promedio de erosión de 3 m alrededor de los pilares, la cual se representa en el escenario de fondo erosionado de forma semejante para ambos tipos de pilar.

Además, se utilizaron modelos numéricos complementarios que representaron el problema en cuestión: el modelo de turbulencia k- ϵ , el modelo multifase y el modelo de flotabilidad.

Resultados y discusión

Es la primera vez que se realiza la modelación numérica aplicada al estudio de pilares con el paramento inclinado, por ello se espera que los resultados sean de valiosa utilidad como referencia para análisis posteriores.

Líneas del flujo

Se analizaron las líneas del flujo en un plano de corte paralelo a la dirección del flujo y en el centro de los pilares. Se muestran los

resultados en los escenarios de fondo plano (Figura 6 y Figura Figura 7),
y fondo erosionado (Figura 8 y Figura Figura 9).

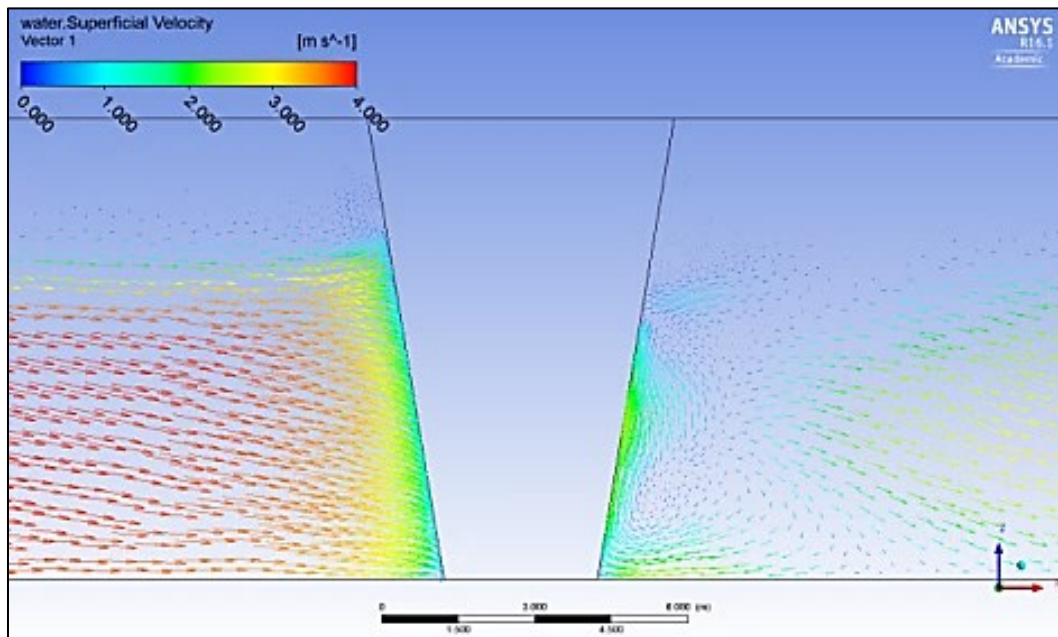


Figura 6. Líneas del flujo a través del pilar con reducción en la parte baja en el escenario sin fondo erosionado.

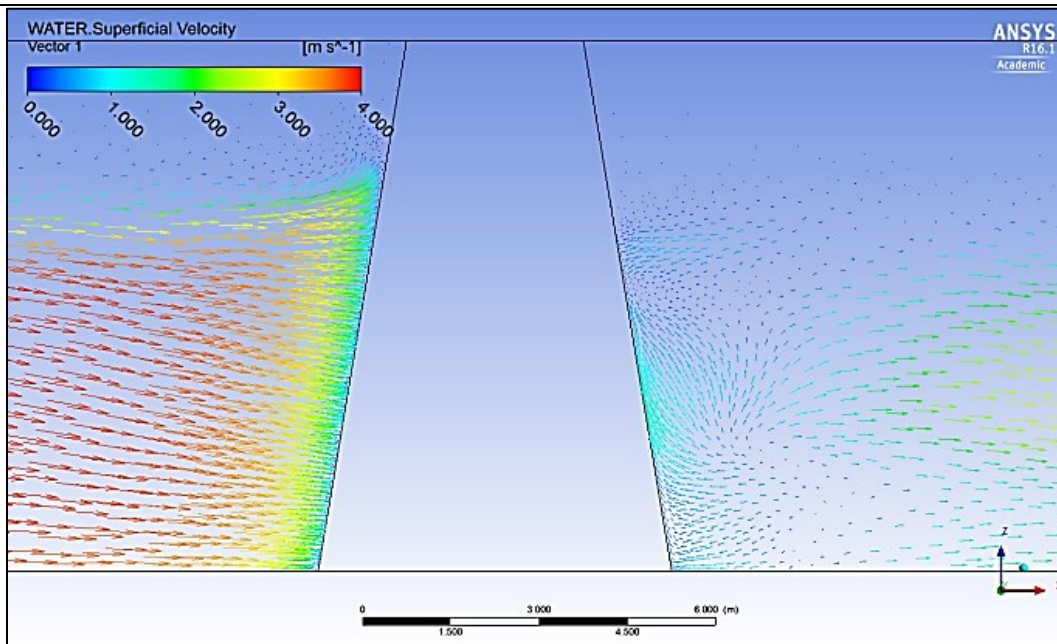


Figura 7. Líneas del flujo a través del pilar con reducción en la parte alta en el escenario sin fondo erosionado.

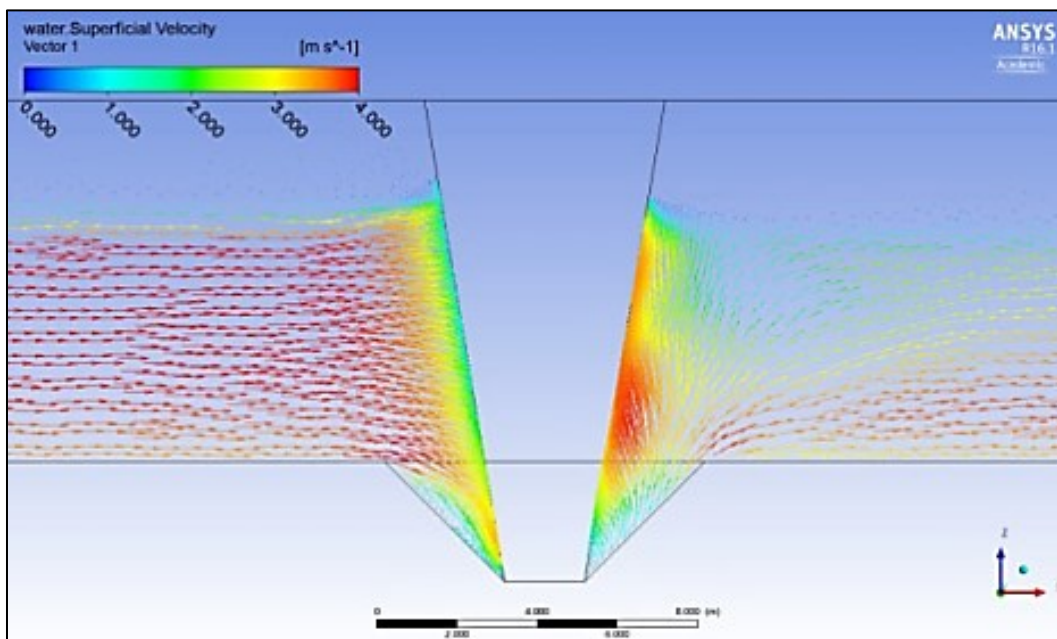


Figura 8. Líneas del flujo a través del pilar con reducción en la parte baja en el escenario con fondo erosionado.

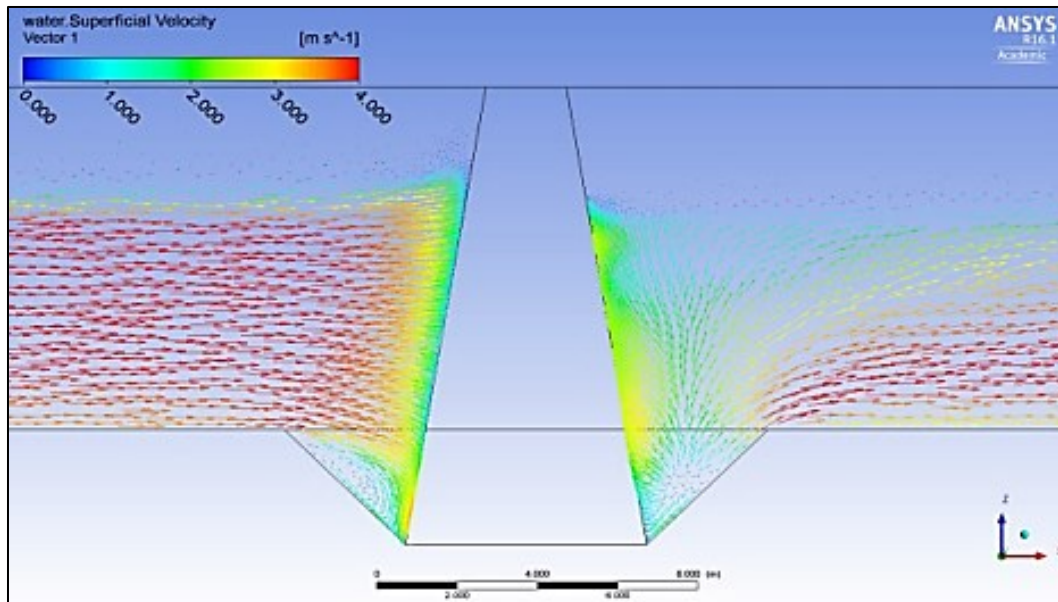


Figura 9. Líneas del flujo a través del pilar con reducción en la parte alta en el escenario con fondo erosionado.

Se observó en todos los casos que las líneas del flujo se desordenan aguas abajo después del impacto con los pilares hasta nuevamente direccionarse en el mismo sentido. Asimismo, se debe notar que para el escenario de fondo erosionado, el orden se origina después de salir del foso. Por otro lado, las líneas del flujo, al impactar sobre el paramento del pilar con reducción en la parte baja, se dirigen con mayor libertad hacia el cauce, esto evidencia que la forma de la cara lateral facilita que el flujo se direcciona hacia el cauce con mayor caudal y velocidad. En cambio, la forma de la cara lateral del pilar con ampliación en la parte baja evita que el flujo se dirija hacia el fondo y más bien lo haga hacia la superficie.

Fue necesario calcular en la dirección aguas arriba de los pilares el porcentaje dentro del ancho promedio del foso (Figura 8 y Figura 9) de las líneas que poseen velocidades inferiores a 1 m/s, pues se consideró que aquellas no generan un efecto considerable sobre el cauce. En el pilar con reducción en la parte baja es de 20%, por lo tanto, el otro 80% podría seguir generando un efecto erosivo; en el pilar

con ampliación en la parte baja es de 40%, por lo tanto el 60% podría seguir generando un efecto erosivo.

Velocidad del flujo

De la misma forma que las líneas del flujo, se analizaron las velocidades en un plano de corte paralelo a la dirección del flujo y en el centro del pilar. Se muestran los resultados en los escenarios de fondo plano (Figura 10 y Figura 11) y fondo erosionado (Figura 12 y Figura 13).

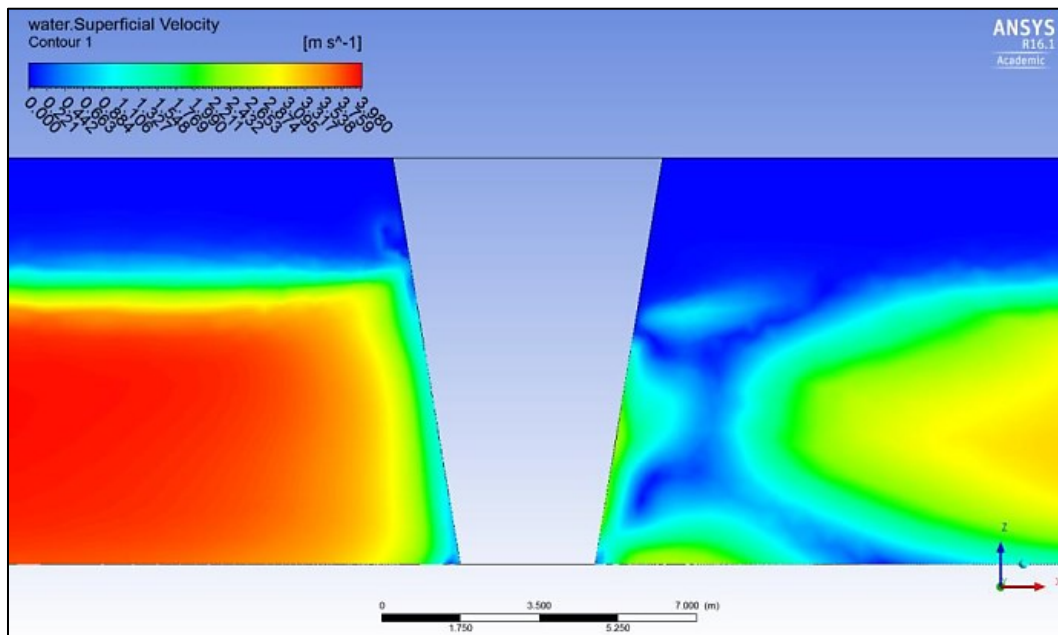


Figura 10. Velocidad del flujo a través del pilar con reducción en la parte baja en el escenario sin fondo erosionado.

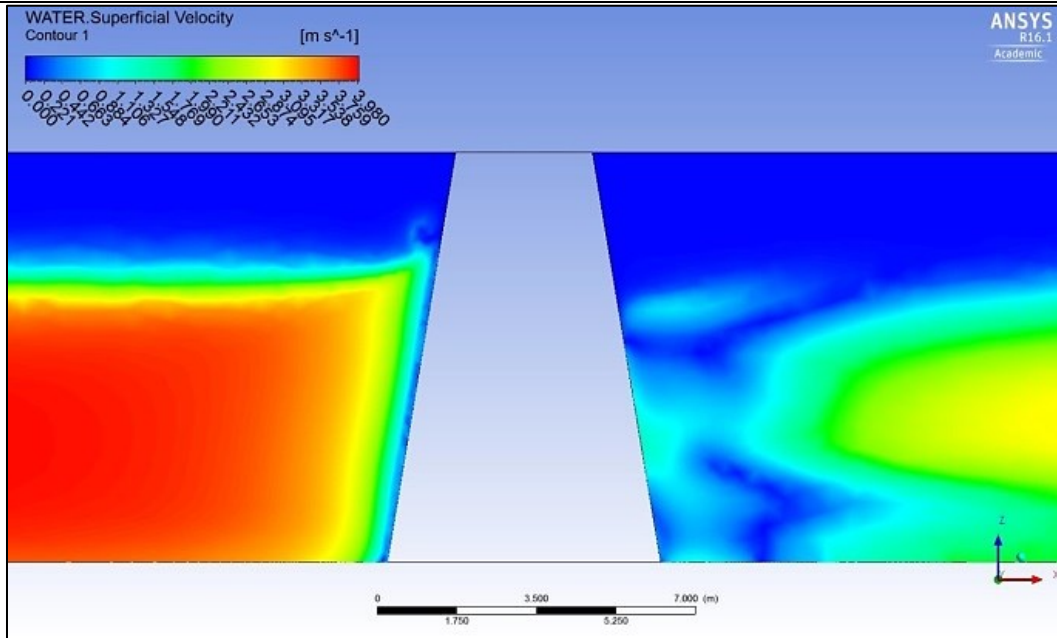


Figura 11. Velocidad del flujo a través del pilar con reducción en la parte alta en el escenario sin fondo erosionado.

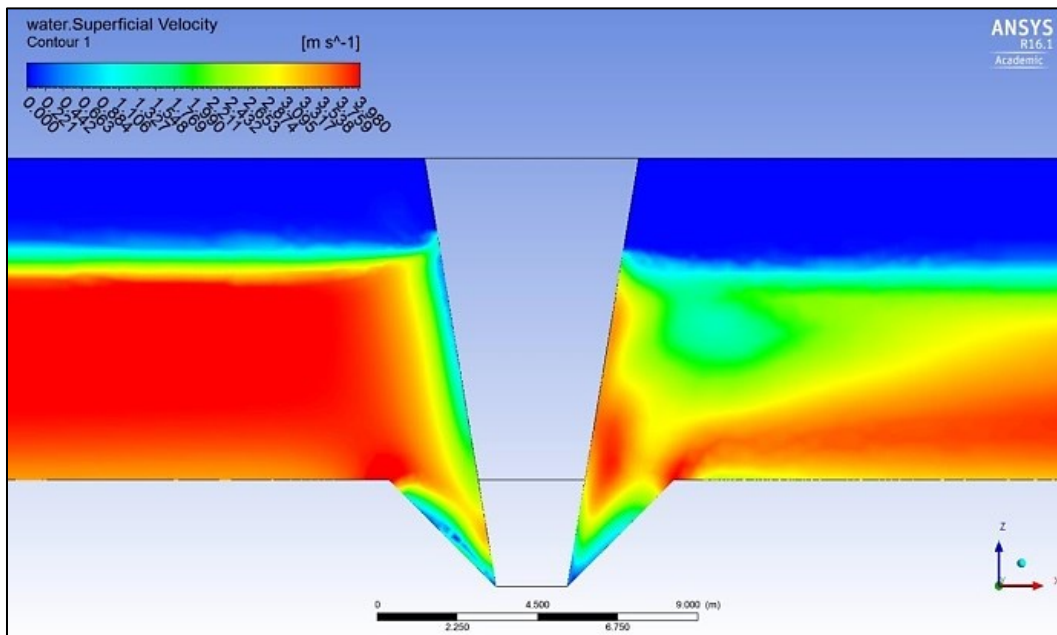


Figura 12. Velocidad del flujo a través del pilar con reducción en la parte baja en el escenario con fondo erosionado.

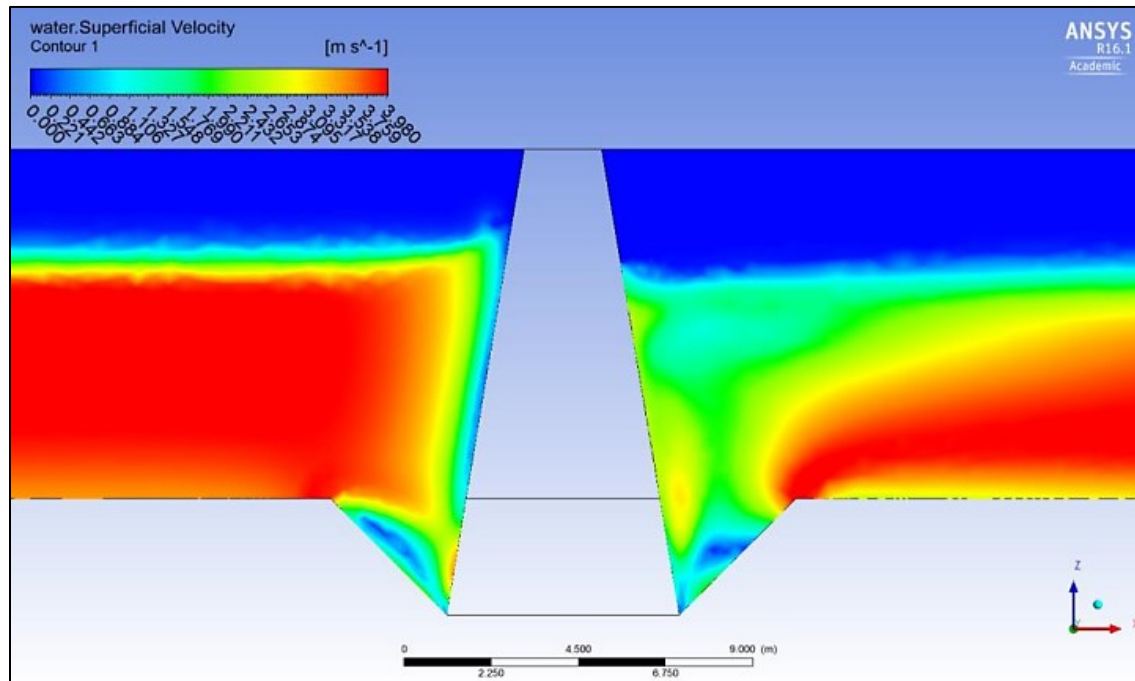


Figura 13. Velocidad del flujo a través del pilar con reducción en la parte alta en el escenario con fondo erosionado.

En todos los casos, se observa en el sentido aguas arriba que el flujo pierde velocidad de forma uniforme hasta llegar al paramento; en el sentido aguas abajo, el campo de velocidades es desordenado o no uniforme después de colisionar con los pilares. Sin embargo, el flujo vuelve a acelerar y uniformizarse en el escenario de fondo plano a una distancia considerable hasta recuperar su velocidad inicial; en el escenario de fondo erosionado, lo hace inmediatamente después de salir del foso.

Para poder determinar la influencia de la forma de los pilares en las velocidades, éstas se calcularon muy cerca del paramento aguas arriba de los pilares. Se exponen los resultados correspondientes al escenario de fondo plano (Figura 14) y fondo erosionado (Figura 15). En el primer escenario, las velocidades son mayores en el pilar con reducción en la parte baja, apreciándose que cerca del fondo es 1.12 veces mayor y lejos del fondo es 1.64 veces mayor. En el segundo escenario, también las velocidades son mayores en el pilar con reducción en la parte baja, apreciándose que cerca del fondo es 1.18 veces mayor y lejos del fondo

es 1.42 veces mayor. Según las gráficas, se evidencia que se produce un mayor efecto en las velocidades al utilizar los pilares con reducción en la parte baja, generándose una mayor fuerza en el flujo para erosionar el cauce.

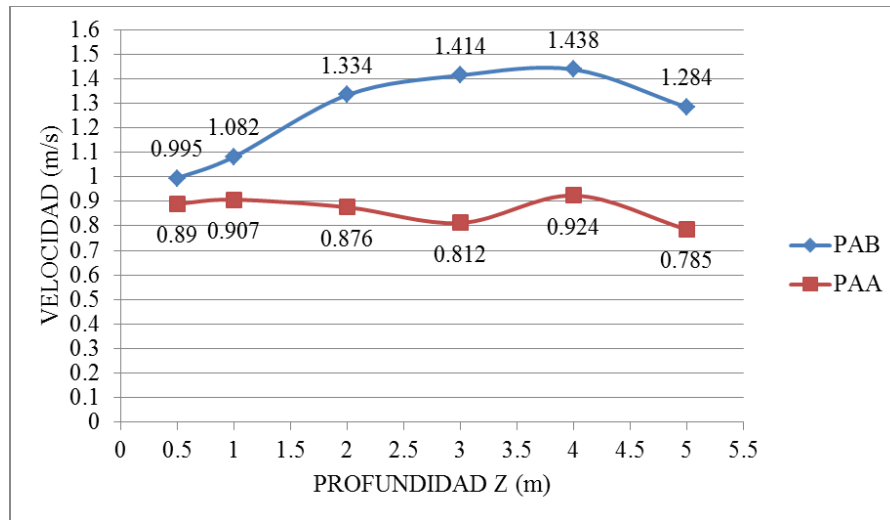


Figura 14. Valores velocidad en el paramento del pilar para el escenario de fondo plano. Pilar con reducción hacia la parte baja (PAB); pilar con la reducción en la hacia la parte alta (PAA).

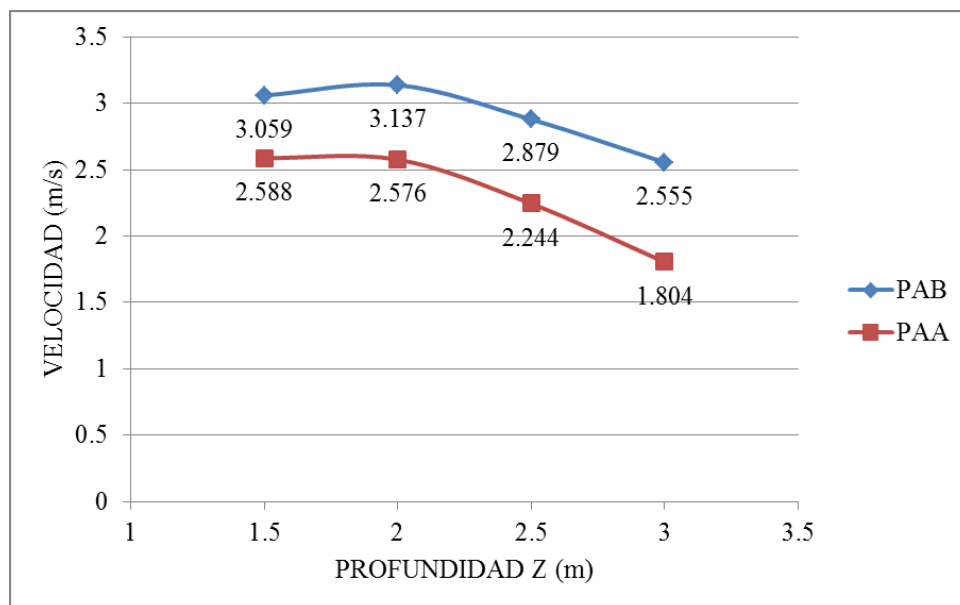


Figura 15. Valores velocidad en el paramento del pilar para el escenario de fondo erosionado. Pilar con reducción hacia la parte baja (PAB); pilar con reducción hacia la parte alta (PAA).

Conclusiones

Este trabajo de investigación contribuye al conocimiento del tipo de pilares con el paramento inclinado, el cual se realizó a través de la herramienta de modelación numérica.

Los cálculos del *software ANSYS CFX* permitieron visualizar la dinámica del flujo alrededor de los pilares y también analizar de forma detallada y precisa los parámetros hidráulicos, tales como líneas de corriente y velocidad del flujo, con la finalidad de comprender el efecto en la socavación local del cauce que produce la inclinación de la cara lateral del pilar.

En cuanto a las velocidades, en ambos escenarios de cauce son mayores en el pilar con reducción en la parte baja; en el primer escenario se apreció que cerca al fondo es 1.12 veces mayor y lejos del fondo es 1.64 veces mayor; en el segundo escenario se apreció que cerca del fondo es 1.18 veces mayor y lejos del fondo es 1.42 veces mayor. En cuanto a las líneas de corriente, el pilar con reducción en la parte baja invita al flujo a dirigirse hacia el fondo del cauce, generando mayores concentraciones de esfuerzo en el fondo y velocidades. Entonces, el proceso de erosión desde que inicia se muestra con mayor fuerza en el pilar con reducción en la parte baja.

Con las observaciones del modelo físico de los pilares del puente Cáceres y las investigaciones en formas de pilares similares se concluye que el pilar con reducción en la parte baja favorece al fenómeno de socavación local. Se sugiere proteger con enrocado el cauce alrededor del pilar para disminuir la energía cinética producida por el efecto del flujo.

Referencias

- ANSYS CFX. (2006). *Solver theory guide*. Canonsburg, USA: ANSYS, Inc.
- Breusers, H., & Raudkivi, A. (1991). *Scouring, hydraulic structures design manual*. Florida, USA: CRC Press.
- Jaafar, S. (Oct., 2015). Reduction of scour by using tapered pier. *2nd International conference of building and environmental engineering*. Simposio llevado a cabo en la conferencia de la University of Technology, Iraq and American University of Beirut, Líbano.
- Universidad de Piura. (2001). Estudio del tratamiento integral del río Piura entre la presa los Ejidos y el puente Cáceres. Piura, Perú: Universidad de Piura.
- Yanmaz, A. (2002). *Köprü Hidroliği*. Ankara, Turquía: METU Press.