

Análisis Hidráulico con Modelación Numérica CFD – Flow 3D de la Erosión Local en Pilas de Puentes

Hamad, Khaled ^{1,*}  ; Torres, Cristina ¹ 

¹Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, Quito, Ecuador

Resumen: Dentro del Centro de Investigaciones y Estudios en Recursos Hídricos (CIERHI), se realizó el análisis experimental en modelo físico de fenómenos de turbulencia, causantes de erosión alrededor de pilas de puentes (Chiliquinga & Pinto, 2019). Se utilizaron los datos del modelo experimental mencionado, como base de calibración para la modelación numérica tridimensional de la erosión alrededor de pilas de puentes, utilizando el paquete computacional FLOW-3D. Una vez calibrado el modelo, se mejoraron las condiciones con las que se realizó el modelo físico, ya que en los resultados experimentales se determinó que era necesario un lecho de arena más profundo para poder determinar la máxima erosión. En el modelo numérico se colocaron las condiciones óptimas para obtener resultados sin las limitaciones físicas que se tiene en un modelo experimental, obteniendo así resultados de máxima erosión alrededor de pilas de puentes, dichos resultados se compararon con valores calculados en función de diferentes ecuaciones empíricas.

Palabras clave: erosión, pilas, simulación, modelación, socavación, FLOW 3D

Computational Fluid Dynamics CFD – Flow 3D of Local Scour in Pier Bridges

Abstract: Within the Centro de Investigaciones y Estudios en Recursos Hídricos (CIERHI), the experimental analysis was carried out in a physical model of turbulence phenomena, which causes erosion around bridge piers (Chiliquinga & Pinto, 2019). The data of the experimental model was used as a calibration base for the three-dimensional numerical modeling of erosion around bridge piers, using the FLOW-3D computational package. Once the model was calibrated, the conditions with which the physical model was made were improved, since in the experimental results it was determined that a deeper sand bed was necessary to be able to determine the maximum erosion. In the numerical model, the optimal conditions were placed to obtain results without the physical limitations that exist in an experimental model, thus obtaining results of maximum local scour in pier bridge, these results were compared with values calculated based on different empirical equations.

Keywords: Scour, piers, simulation, modelling, undermining, FLOW 3D

1. INTRODUCCIÓN

En el ámbito de la ingeniería hidráulica, el flujo del río y los problemas asociados a éste, tales como: el transporte de sedimentos, las deformaciones del lecho del río, la socavación y las inundaciones, son considerados los principales problemas de un país (Shrestha, 2015). La mayoría de las fallas que se tiene en puentes son por socavación y un ejemplo de ello es el estudio de la U.S. Federal Highway Administration de 1973, donde se determinó que, de 383 casos de fallas en puentes observados, el 97% fueron causados por problemas hidráulicos de erosiones locales: 25% en pilas y 75% en estribos; es decir, solo el 3% de los fallos registrados se debe a causas no relacionadas con la hidráulica (Fernández, 2004).

Dentro del Centro de Investigaciones y Estudios en Recursos Hídricos CIERHI, se realizó el análisis experimental en modelo físico de fenómenos de turbulencia, causantes de erosión alrededor de pilas de puentes (Chiliquinga & Pinto, 2019). En los resultados experimentales, se determinó que era necesario un lecho de arena más alto para determinar la profundidad máxima de erosión. Además, las paredes del canal del modelo físico influyeron directamente en los resultados, debido a que la fricción a lo largo de las paredes del canal incide en la distribución de velocidades de la región central, este fenómeno se podría evitar si se realiza el análisis experimental en un canal abierto ancho (si el ancho es mayor que 5 a 10 veces la profundidad de flujo) (Chow, 2004). En el modelo numérico, se colocaron las condiciones óptimas para obtener resultados sin las limitaciones físicas de un modelo experimental, como lo son la altura del lecho de sedimentos y

*khaled.hamad@epn.edu.ec

Recibido: 08/03/2022

Aceptado: 28/09/2022

Publicado en línea: 02/02/2023

[10.33333/rp.vol51.n1.08](https://doi.org/10.33333/rp.vol51.n1.08)

[CC 4.0](#)

el ancho del canal, que en el modelo físico se colocó con una fricción despreciable en las paredes.

2. METODOLOGÍA

2.1 Modelo Físico (Análisis experimental en modelo físico de fenómenos de turbulencia causantes de erosión alrededor de pilas de puentes utilizando ADV) (Chiliquinga & Pinto, 2019)

Dentro del Centro de Investigaciones y Estudios en Recursos Hídricos CIERHI se analizó de manera experimental el fenómeno de turbulencia que provoca la erosión y socavación del material sólido alrededor de una pila de puente (Chiliquinga & Pinto, 2019). Los ensayos se realizaron en el canal hidrodinámico del CIERHI, se colocó un lecho de sedimentos de 2 metros de largo, 12 cm de alto, ocupando el ancho total del canal de un metro. Se utilizaron dos pilas de hormigón en ensayos separados, para el primer ensayo se utilizó una pila de sección transversal cuadrada de 10 cm de ancho y en el segundo ensayo de sección transversal circular de diámetro 10 cm, las dos pilas de 90 cm de alto. Las pilas se ubicaron a 50 cm del borde del lecho de sedimentos. En la Figura 1 se puede observar la ubicación de las pilas.



Figura 1. Ubicación de la pila cuadrada y circular en el lecho de arena

Se determinaron las condiciones del umbral del movimiento experimentalmente y a través del cálculo del umbral o principio de movimiento con el diagrama de Shields, con la finalidad de que la arena no se mueva sin la presencia de la pila y analizar la erosión que sufre el lecho alrededor de una pila por la presencia de dicha estructura. Experimentalmente, el inicio de movimiento de partículas se dio con un calado de 0.205 m, utilizando el diagrama de Shields para el cálculo del

umbral o principio de movimiento se determinó un calado de 0.21m, verificando valores coincidentes experimental y analíticamente.

Las condiciones de contorno que se utilizaron en el modelo físico son: Caudal 52,47 l/s, calado 0,25 m lo que da una velocidad de 0,21 m/s.

El sedimento utilizado en el modelo físico presenta las siguientes propiedades (Chiliquinga & Pinto, 2019):

Peso específico del sedimento = 2.65 t/m^3

$D_{16} = 0,403 \text{ mm}$

$D_{50} = 0,739 \text{ mm}$

$D_{84} = 1,072 \text{ mm}$

$D_{90} = 1,142 \text{ mm}$

Los tamaños representativos del sedimento son: diámetro 0.85mm con un 20.4%, diámetro 0.71 mm con un 36.7% y 0.6 mm con un 36.6%.

De acuerdo con la clasificación de sedimentos (arena) por tamaño el grupo y clase de sedimento corresponde a arena gruesa. El cálculo de la desviación típica granulométrica del material arroja un resultado de 1,63 (Chiliquinga & Pinto, 2019), la desviación típica granulométrica permite determinar el tipo de granulometría de la muestra. En este caso se obtiene un valor menor a tres lo que indica que la granulometría es uniforme, condición típica en sedimentos de uso en laboratorio (material sintético) (Vide, 2010).

En el modelo físico sin colocar las pilas, se determinaron las condiciones del principio de movimiento experimentalmente, variando el calado con la ayuda de una compuerta ubicada aguas abajo del lecho, se mantuvo el caudal, y se disminuyó la altura de agua hasta que se dé inicio al movimiento de las partículas.

También se realizó el cálculo del umbral o principio de movimiento de las partículas mediante el uso del diagrama de Shields el cual se genera cuando la tensión del fondo y la tensión crítica son iguales. Este procedimiento se realiza para garantizar la condición de Aguas Claras (lo que significa que el flujo no alcanza la velocidad crítica, y al no tener suficiente fuerza para movilizar las partículas del lecho, no existe movimiento si se encuentra un obstáculo, por tanto, la única erosión posible es la local). Se colocó un calado que no genere el movimiento de partículas sin la pila ya que lo que se quiere evaluar es precisamente la erosión que sufre el lecho alrededor de una pila por la presencia de dicha estructura (Chiliquinga & Pinto, 2019).

No fue posible determinar los resultados de máxima erosión en el modelo físico debido a que a las cuatro horas de ensayo la socavación alrededor de la pila cuadrada y circular alcanzó los 12 cm del lecho de arena.

2.2 Modelo Numérico (calibración)

La Dinámica de Fluidos Computacional CFD (Computational Fluid Dynamics) utiliza técnicas numéricas especialmente

desarrolladas para resolver las ecuaciones de movimiento de fluidos y obtener soluciones tridimensionales (FLOW- 3D, s.f.).

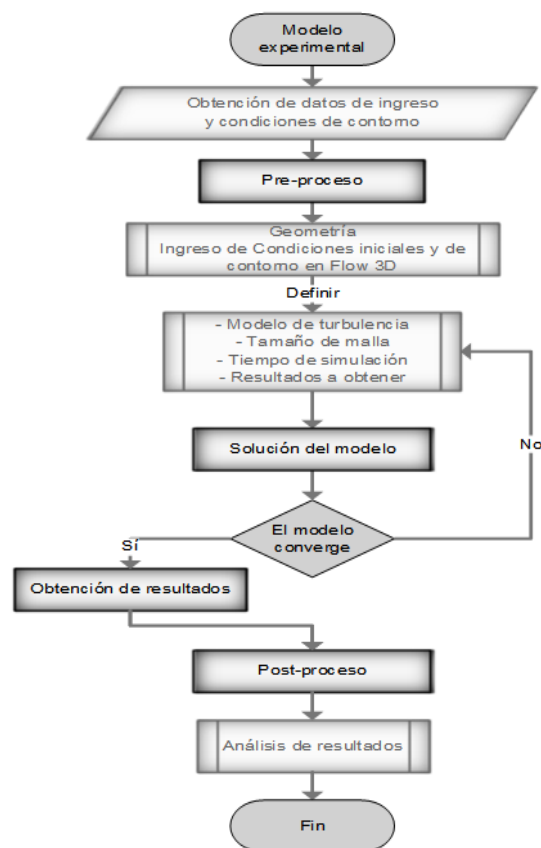


Figura 2. Diagrama de flujo del modelo experimental
Fuente: Jurado y Oñate (2020)

En este proyecto, se utilizó el software comercial FLOW 3D. Se trata de un programa de modelación hidráulica en tres dimensiones (3D) desarrollado en el año 2000 por Flow Science; que resuelve mediante aproximaciones numéricas las ecuaciones de Navier-Stokes (FLOW- 3D, s.f.). FLOW 3D es el software comercial más utilizado para modelación de flujo a superficie libre, genera una simulación precisa de varios problemas en la ingeniería relacionados al agua y medio ambiente. En FLOW-3D es posible determinar los procesos de transporte de sedimentos, por ejemplo: transporte de lecho, transporte de sólidos en suspensión, arrastre y depósito (Weig et al., 2014).

Para resolver un modelo hidráulico tenemos tres fases: preproceso, se refiere a los datos de ingreso previo a la corrida como la geometría, mallado en la geometría, propiedades físicas, condiciones iniciales y de contorno; preproceso se refiere a la corrida del modelo y post - proceso es el análisis de resultados.

Para la calibración del modelo numérico se utilizó la geometría, condiciones de contorno y propiedades del sedimento del modelo físico.

2.2.1 Geometría

Se ingresó la geometría del modelo físico para la calibración del modelo numérico de la pila cuadrada y circular.

El fondo del canal se ingresó como un sólido de 10 cm de alto y las pilas se colocaron como un sólido con las dimensiones del modelo físico, mientras que el material granular se ingresó con la opción sedimento empaquetado.

2.2.2 Mecanismos Físicos

• Gravedad. - aplica al modelo una fuerza constante que se refiere al efecto de la gravedad, se ingresó el valor de -9.81 en dirección del eje z.

• Transporte de sedimentos. - El software FLOW-3D, permite utilizar un modelo de transporte de sedimentos con múltiples diámetros de sedimento granular, hasta un número máximo de 10 tamaños de partícula en el mismo lecho. Calcula el movimiento de partículas por (FLOW- 3D, s.f.):

- Suspensión
- Sedimentación por gravedad
- Arrastre de material debido al cizallamiento del lecho o perturbaciones del flujo
- Transporte de sedimento de fondo (rodando, deslizando o saltando)

Para esto se consideran dos estados sedimento suspendido y sedimento compactado. El sedimento en suspensión se transporta por la turbulencia del flujo. A continuación, se presentan los parámetros de ingreso del modelo de transporte de sedimentos que muestra el software FLOW-3D y los parámetros seleccionados para la calibración y corrida final dentro del proyecto: Para la simulación se incluyeron los siguientes mecanismos físicos al cálculo:

Tabla 1. Parámetros de ingreso – Transporte de sedimentos

	Parámetro de ingreso	Valor o ecuación
a	Número Crítico de Shields	Soulsby-Whitehouse
b	Ecuaciones de transporte de fondo	Meyer Peter & Muller
c	Coefficiente multiplicador de Richardson-Zaki	1
	Difusión de sedimentos en suspensión	0 kg/m/s
	Multiplicador de difusión turbulenta	1.43
d	Fracción de compactación máxima	0.64
e	Relación rugosidad del lecho / D50	2.5
		0.85mm (20.4%)
		0.71mm (36.7%)
f		0.60mm (36.6%)
	Densidad de la partícula	2650 kg/m ³
	Coefficiente de arrastre	0.018
	Coefficiente de carga del lecho	13
	Ángulo de reposo	25 grados

a. Número Crítico de Shields

El numero crítico de Shields es un parámetro adimensional utilizado para calcular el inicio del transporte de sedimentos o umbral del principio de movimiento de sedimentos en el flujo de un fluido (Shields, 1936). Se seleccionó la opción de

cálculo utilizando la ecuación de Soulsby-Whitehouse (Soulsby, 1997):

$$\theta_{cr,i} = \frac{0.3}{1+1.2d_i} + 0.055 (1 - e^{-0.02d_i}) \quad (1)$$

Donde:

$$d_i = D \left[\frac{\rho_f(\rho_i - \rho_f)g}{\mu^2} \right] \quad (2)$$

$\theta_{cr,i}$ = Parámetro de Shields

D = Diámetro de los tipos de sedimento

ρ_f = Densidad del fluido

ρ_i = Densidad del sedimento

g = Magnitud de la aceleración de la gravedad

μ = Viscosidad dinámica del fluido

b. Ecuaciones de transporte de fondo:

Para el cálculo del sedimento de fondo se pueden utilizar las siguientes ecuaciones:

Meyer Peter Muller

Es la ecuación más utilizada en el transporte de sedimentos, es una ecuación empírica para el cálculo de transporte de fondo. Los experimentos para obtener esta ecuación se desarrollaron en canales de arena y grava, se utilizaron materiales naturales y sintéticos de un rango de diámetro entre 0,4 y 30 mm (Meyer-Peter & Muller, 1948):

La ecuación de Meyer Pete Muller establece las siguientes hipótesis (Bravo, Osterkamp, & Lopes, 2004):

- La capacidad del flujo para transportar sedimentos en el lecho granular está directamente relacionado con la diferencia del esfuerzo hidráulico sobre las partículas de sedimento y el esfuerzo cortante crítico del inicio de movimiento.
- La pérdida de energía está en función de la resistencia del sedimento a ser movido.
- El flujo que actúa sobre el lecho disminuye la fuerza de tracción del transporte de sedimentos
- Los diferentes tamaños de partículas se representan por el diámetro medio
- El transporte de sedimento no consolidado ocurre sobre el lecho, genera dunas y otras formas.
- El transporte de sedimento de fondo se genera en partículas con diámetros mayores a 0.4 mm.

Nielsen

Ecuación semiempírica para el cálculo de transporte de fondo (Nielsen, 1992). Los experimentos para obtener esta ecuación se realizaron con sedimento fino, de menor tamaño a los utilizados en la deducción de la ecuación de Meyer Peter Muller (Higgins et al., 2017)

Van Rijn

Ecuación empírica basada en experimentos de transporte de sedimentos realizados con material granular en un rango de tamaño de 0,2 a 2 mm. De acuerdo con los parámetros que

intervienen en la ecuación el movimiento de fondo en el lecho inicia cuando la fuerza efectiva del fluido supera la resistencia de las partículas a ser movidas (peso y fricción) estableciendo una condición final en función del ángulo de reposo de las partículas (Rijn, 1984). En el caso de que el material esté compuesto por un porcentaje importante de arcillas o limos es necesario considerar los efectos de cohesión (Rijn, 1993).

Se seleccionó la ecuación de Meyer Peter & Muller para el cálculo del transporte de sedimentos de fondo, ya que los diámetros de sedimento utilizados en el modelo físico y numérico se encuentran dentro del rango recomendado en el uso de la ecuación. La ecuación es la siguiente (Meyer-Peter & Muller, 1948):

$$q_{b,i} = \Phi_i \left[g \left(\frac{\rho_i - \rho_f}{\rho_f} \right) D^3 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

Donde:

$q_{b,i}$ = fracción de transporte volumétrico del arrastre de fondo

Φ_i = fracción adimensional de transporte de carga del fondo

$$\Phi_i = \beta_{MPM,i} (\theta_i - \theta_{cr,i})^{1.5} c_{b,i} \quad (4)$$

D = Diámetro de los tipos de sedimento

ρ_f = Densidad del fluido

ρ_i = Densidad del sedimento

g = Magnitud de la aceleración de la gravedad

$\beta_{MPM,i}$ = coeficientes igual a 8.0 $c_{b,i}$

θ_i = Parámetro local de Shields

$$\theta_i = \frac{\tau}{g * D (\rho_i - \rho_f)} \quad (5)$$

τ = Tensión cortante de fondo

$c_{b,i}$ = fracción de volumen de material i en el lecho

c. Coeficiente multiplicador de Richardson-Zaki, difusión de sedimentos en suspensión y multiplicador de difusión turbulenta

El coeficiente multiplicador de Richardson-Zaki es un coeficiente que controla el efecto del arrastre sobre las partículas de sedimentos que se van asentando a medida que se concentran. El valor por defecto es 1,0.

La difusión de sedimentos en suspensión se considera si el coeficiente de difusión molecular o la difusión turbulenta se define con un valor distinto de cero.

El multiplicador de difusión turbulenta es el inverso del número de Schmidt, normalmente se define alrededor de 1,43 (FLOW- 3D, s.f.).

Se ha tomado los valores predeterminados por el software ya que no se dispone de un análisis específico en el modelo físico relacionado a los coeficientes en mención.

d. Fracción de compactación máxima

Este valor controla la fracción sólida máxima cuando el sedimento se compacta. El valor predeterminado es 0,64, el

cual corresponde a la fracción máxima de compactación de esferas. Para sedimentos multidispersos, este número puede ser mayor para partículas de sedimentos irregulares y mono dispersas (Jurado & Oñate, 2020).

e. Relación rugosidad del lecho / D_{50}

El d_{50} es el tamaño de sedimento tal que el 50% del peso del material es menor que él, se calcula para cada paso de tiempo y para cada celda de malla con sedimento. El valor recomendado para el multiplicador de dicha relación es 2,5 (FLOW- 3D, s.f.), este valor se ha adoptado en el modelo.

f. Tipos de sedimento

El número máximo de tipos de sedimentos que se pueden definir en el software es 10 (FLOW- 3D, s.f.), se colocó en el modelo numérico la granulometría del sedimento del modelo físico.

Para el modelo numérico se seleccionó los tres tamaños de sedimento con el mayor porcentaje de peso retenido, que corresponde al sedimento de 0,85, 0,71 y 0,6 mm, con 20,4, 36,7 y 36,6% respectivamente. Se ingresan los pesos sin decimales y el programa automáticamente calcula los porcentajes.

Para cada tipo de sedimento, es opcional ingresar el *nombre*, si no se proporciona un nombre, el nombre predeterminado es “Sediment #”, en este caso se ha colocado el número de tamiz.

El *diámetro* de cada tipo de sedimento es el tamaño medio de la partícula en metros.

La *densidad de la partícula* debe ser especificada por el usuario, ya que no se utiliza ningún valor predeterminado. El valor de la densidad de las partículas en el modelo físico es 2650 kg/m³ (Gallardo, 2019).

El *número crítico de Shields* se calcula usando la ecuación de Soulsby-Whitehouse (Soulsby, 1997). El número crítico de Shields se puede modificar celda por celda en cada paso de tiempo, para tener en cuenta el efecto de pendiente del lecho. En un interfaz de lecho inclinado, la gravedad aplica un componente tangencial de fuerza para hacer que la cama de sedimentos sea más o menos estable dependiendo de la dirección del flujo. En este caso, se tiene una pendiente de lecho cercana a la horizontal por lo que no es necesaria dicha consideración.

El *coeficiente de arrastre* controla la velocidad a la que el sedimento se erosiona a un esfuerzo cortante dado mayor que el esfuerzo cortante crítico. Se puede utilizar para escalar las tasas de transporte o ajustar los datos experimentales. El valor predeterminado es 0,018 (Mastbergen & Van Den Berg, 2003). Un valor de cero desactiva completamente el modelo de arrastre. Se ha colocado el valor predeterminado.

El *coeficiente de carga del lecho* controla la velocidad a la que se produce el transporte de la carga del lecho a un esfuerzo cortante dado mayor que el esfuerzo cortante crítico. El valor depende de la ecuación de transporte de fondo seleccionada.

Un valor de cero apaga el modelo de transporte de sedimento. Para la ecuación de Meyer-Peter y Mueller, investigadores han sugerido valores que van desde 5,0 para transporte bajo hasta 13,0 para transporte de arena muy alto (Fernández & Van Beek, 1976; Ribberink, 1998), se ha seleccionado el valor de 13,0 ya que se tiene transporte de arena en valores altos de acuerdo con el modelo físico (Chiliquinga & Pinto, 2019).

El *ángulo de reposo* describe el ángulo máximo de reposo del material del lecho, se recomienda para arenas valores entre 25 y 35 grados y para grava entre 30 y 40 grados (Vide, 2010), puesto que el material del lecho es arena y se ha colocado un valor de ángulo de reposo de 25 grados.

- **Turbulencia y viscosidad:** El transporte de sedimentos requiere estimaciones precisas de los esfuerzos cortantes, por lo que se debe seleccionar un modelo de turbulencia para flujos turbulentos (FLOW- 3D, s.f.). Se colocó la opción fluido viscoso y se adoptó el modelo de turbulencia de dos ecuaciones k-w, ya que dicho modelo de turbulencia se recomendó en el proyecto: “ANÁLISIS DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS AGUAS ABAJO DE PANELES SUMERGIDOS APLICANDO EL PROGRAMA FLOW 3D” posterior a la comparación de resultados y análisis de sensibilidad entre los modelos k-E, k-w y RNG (Jurado y Oñate, 2020). Se analizaron los parámetros: tiempo de solución del modelo, número de Reynolds, velocidades entre el modelo físico y experimental, llegando a la conclusión que el modelo de turbulencia k-w es el que mejor se ajusta al modelo físico (Jurado & Oñate, 2020).
- **Variación de la densidad:** de forma predeterminada, el modelo de densidad variable se activará para permitir que la densidad del fluido se calcule en función del sedimento en suspensión arrastrado (FLOW- 3D, s.f.).

2.2.3 Selección del Fluido

Se seleccionó como fluido: agua a una temperatura de 20 °C, con una densidad de 1000 kg/m³ y con una viscosidad constante.

2.2.4 Mallado

Para colocar un mallado adecuado se realizó un análisis de sensibilidad, los resultados se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 2. Resumen del análisis de sensibilidad del mallado

Pila cuadrada	Malla general (m)	Malla pila (m)	Tiempo de simulación (hh:mm:ss)	Observaciones
Análisis 1	0,01	0,01	-	Modelo sin convergencia
Análisis 2	0,05	0,05	15:02:59	Mallado total de la geometría No se calibró el modelo
Análisis 3	0,05	0,01	40:00:00	Mallado total de la geometría No se finalizó la simulación
Análisis 3	0,05	0,01	15:16:23	Mallado optimizado, desde el centro de la pila 30 cm en el eje X y Y a cada lado. Se logró la calibración

El análisis de sensibilidad tiene como objetivo conocer el comportamiento del modelo y su respuesta a cambios inducidos en parámetros físicos y numéricos. En este caso se buscó optimizar el modelo para obtener el tamaño límite de mallado cuyos resultados se ajusten a la calibración optimizando tiempos de simulación. Se concluyó que el mallado óptimo es un mallado estructurado hexaédrico de 0,05x0,05 m general y 0,01x0,01 m en la pila. Se optimizó el mallado para lograr un menor tiempo de corrida con resultados adecuados, el modelo numérico se aproximó al físico, logrando un error entre 0.0 y 10.0% en diferentes horas. Se colocó la malla desde el centro de la pila 30 cm en el eje X y Y a cada lado y para las pilas se colocó el mallado de 10 cm cada lado. En el eje z se colocó la malla desde el fondo del canal hasta 28 cm sobre el lecho de arena.

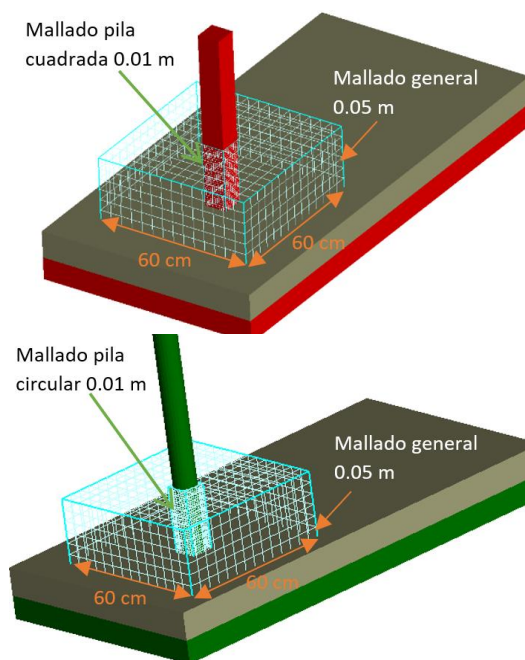


Figura 3. Mallado para la pila cuadrada y circular

2.2.4 Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno para el modelo numérico se ingresan basándose en las condiciones de análisis establecidas en el modelo físico.

X mínimo. - se colocó Caudal de ingreso (Q), con un Caudal constante de 52,47 l/s, calado de 25 cm sobre la superficie del lecho de arena

X máximo. - se colocó Presión (P), con una elevación de fluido 25 cm (condición que especifica la presión en la frontera de salida mediante la elevación del fluido)

Y mínimo, Y máximo y Z mínimo. - se colocó Simetría (S), para que los límites del mallado y la base del canal no interfieran con los resultados de la corrida.

Z máximo. - se colocó Presión (P), con elevación del fluido cero para indicar que en la frontera Z máxima la presión manométrica es cero

Se colocó como condición inicial un calado de 25cm sobre el lecho de arena para evitar perturbaciones del sedimento durante el ingreso del flujo.

2.2.5 Tiempo de simulación

El tiempo de simulación es el lapso durante el cual ocurre el fenómeno y define el final de la simulación, se corrió el modelo numérico durante 4 horas, que corresponde al tiempo de análisis del modelo físico. Para la salida de resultados se ingresó un intervalo de un segundo.

3. RESULTADOS

3.1 Calibración

Para realizar la calibración del modelo físico, se comparó los resultados de máxima erosión alrededor de la pila del modelo numérico y del modelo físico en diferentes tiempos, en la siguiente tabla se presentan los valores obtenidos:

3.1.1 Resultados de calibración para la pila cuadrada

Tabla 3. Resultados de calibración para la pila cuadrada

TIEMPO (HORAS)	MÁXIMA EROSIÓN (cm)		DIFERENCIA (%)
	MODELO FÍSICO	MODELO NUMÉRICO	
0	0	0	0,00%
1	5	5,5	10,00%
2	10	10,25	2,50%
3	12	11,83	1,42%
4	12	12	0,00%

El modelo numérico de la pila cuadrada se calibró con un porcentaje máximo de 10% de diferencia entre los resultados de erosión máxima entre el modelo físico y numérico. En la Figura 4, se presenta el nivel del lecho de arena en 4 horas de modelación en ejes colocados en la dirección X y Y en la zona de máxima erosión alrededor de la pila.

En la Figura 5, se observa la similitud de máxima erosión alrededor de la pila cuadrada en el modelo físico y numérico, la elevación del lecho presenta un valor mínimo de 0,10 m alrededor de la pila, este valor representa la cota de la base del canal, por lo tanto, la máxima erosión es 12 cm.

3.1.2 Resultados de calibración para la pila circular

En el modelo numérico de calibración, se evidenció que la malla utilizada en la zona de la pila circular no se acopla de forma adecuada al mallado general, debido a su forma; se realizaron varios intentos de mallado para lograr una correcta interpretación geométrica en el espacio matemático sin lograr que el modelo converja. El paquete computacional genera resultados en el mallado general que no se relacionan con los resultados del mallado alrededor de la pila; por esta razón, no fue posible realizar la comparación entre el modelo físico y el modelo matemático para la calibración. En la siguiente figura se observa la separación de los mallados.

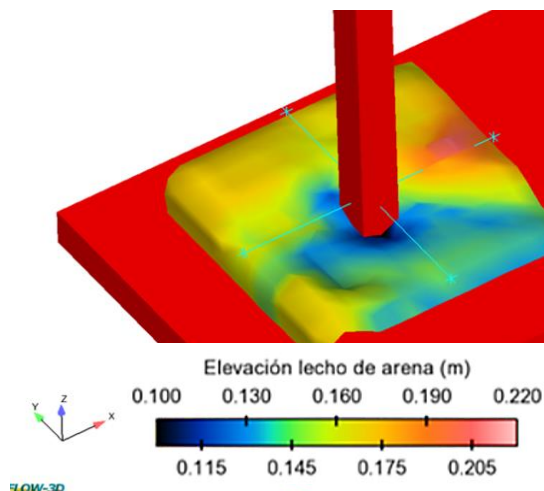
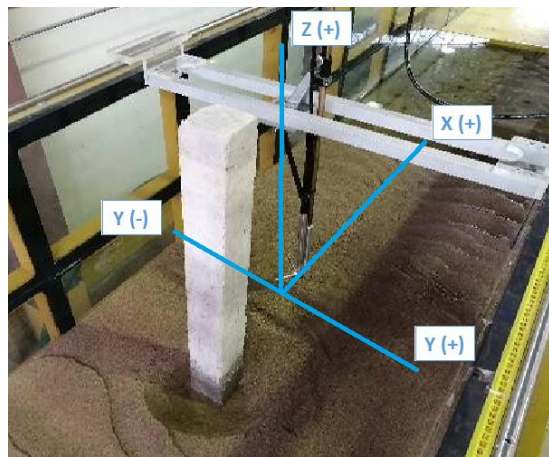


Figura 4. Calibración del modelo numérico pila cuadrada

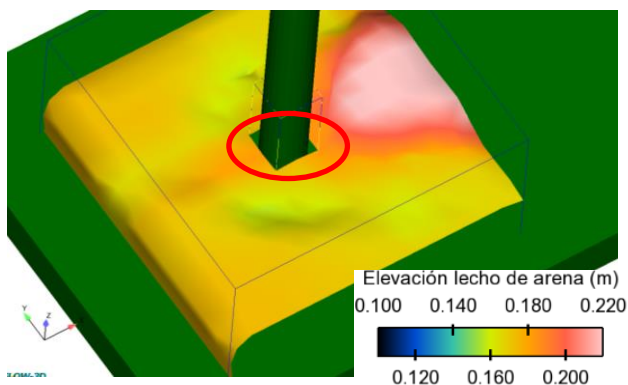


Figura 5. Modelo numérico pila circular

3.2 Modelo mejorado (pila cuadrada)

Ya que en el modelo físico no fue posible determinar la erosión máxima alrededor de la pila debido a que el lecho de sedimentos contaba con 12 cm de altura, en el modelo numérico mejorado se colocó un lecho de 20 cm de alto y se conservó las mismas características geométricas, físicas y de contorno del modelo calibrado, para evaluar la máxima erosión alrededor de la pila cuadrada se aumentó el tiempo de corrida a 8 horas. Los resultados del modelo mejorado se presentan a continuación:

Tabla 4. Resultados de erosión máxima alrededor de la pila cuadrada

Tiempo (horas)	Máxima erosión (cm)
0	0
1	4,7
2	9,8
3	12
4	14,4
5	14,6
6	14,7
7	14,8
8	15

A las 8 horas el modelo numérico se estabiliza alcanzando una máxima erosión de 15 cm. En el proyecto en el que se realizó el modelo físico (Chiliquinga & Pinto, 2019), se estimó la máxima erosión mediante el uso de ecuaciones empíricas de varios autores, a continuación, se presenta la comparación de los resultados del modelo mejorado y la estimación de erosión máxima:

Tabla 5. Resultados de erosión máxima alrededor de la pila cuadrada

	MÁXIMA EROSIÓN (cm)	DIFERENCIA (%)
Modelo Físico	15	-
Ecuación Laursen y Toch	20	25,00%
Ecuación Maza - Sánchez	18	16,67%
Ecuación Melville y Coleman	21,12	28,98%
Ecuación CSU	13,87	8,15%
Ecuación Froehlich	16,35	8,26%

Fuente: Chiliquinga y Pinto (2019)

El resultado de máxima erosión alrededor de la pila cuadrada en el modelo físico se aproxima a los valores calculados con las ecuaciones de CSU y Froehlich con porcentajes de similitud de 91,85% y 91,74% respectivamente.

4. CONCLUSIONES

- Para la modelación numérica del análisis de la erosión alrededor de pilas de puentes, se utilizó el paquete computacional FLOW-3D, este software permite calcular el movimiento de sedimentos prediciendo la erosión, advección y sedimentación.
- El modelo FLOW-3D se limita al uso de computadores de gran capacidad de procesamiento y almacenamiento, por esta razón se utilizó una work station con un procesador Intel Xeon de velocidad base de 2,2 GHz, este procesador cuenta con 12 núcleos y 24 procesadores lógicos, RAM instalada de 64 Gb y un procesador gráfico de 4Gb.
- Para determinar el mallado óptimo, se realizó un análisis de sensibilidad con diferentes tamaños de malla, obteniendo como resultado un mallado general de 0,05x0,05m y mallado de pila de 0,01x0,01m para que el programa interprete adecuadamente la geometría de la pila.
- El modelo numérico de la pila cuadrada se calibró comparando la máxima erosión alrededor de la pila entre el modelo físico y numérico, obteniendo una diferencia máxima de 10% en una hora y 0% en cuatro horas.
- El modelo numérico de la pila circular no se calibró debido a que el mallado general y el mallado de la

pila no se acoplan adecuadamente, se recomienda utilizar un software que permita realizar un mallado no estructurado para que la interpretación geométrica se adapte a la forma circular.

- El modelo numérico de la pila cuadrada se estabiliza a las 8 horas de simulación, con un resultado de máxima erosión alrededor de la pila de 15 cm. Al comparar el resultado con el cálculo de estimaciones de máxima erosión utilizando varias ecuaciones empíricas propuestas, se evidencia que el resultado se ajusta en 91,85% con el resultado de la ecuación CSU y un 91,74% con el resultado de la ecuación de Froehlich.
- Al representar adecuadamente un modelo numérico del fenómeno de erosión alrededor de pilas de puente, también es posible simular soluciones, por ejemplo, el uso de paneles sumergidos colocados individualmente, en serie o en paralelo, con diferentes ángulos de ataque hacia la pila. Estos resultados permitirían solucionar fallas de puentes por socavación relacionados a problemas hidráulicos. Por esta razón, con los resultados de la presente investigación se tiene la base para continuar con la investigación de la propuesta de soluciones.

5. REFERENCIAS

- Bateman, A. (2004). Modelo Morfodinámico para evaluar la Evolución Temporal de la Erosión Local en Pilas Cuadradas de Puentes. Sao Pablo: *Congreso Internacional de Hidráulica de la IAHR*.
- Bravo, M., Osterkamp, P., & Lopes, L. (2004). Transporte de sedimentos en corrientes naturales. *Terra Latinoamericana*, 22(3), 377-386. <https://www.redalyc.org/pdf/573/57322315.pdf>
- Chiliquinga, J., & Pinto, C. (2019). *Análisis experimental en modelo físico de fenómenos de turbulencia causantes de erosión alrededor de pilas de puentes utilizando acoustic doppler velocimeter ADV* [Tesis de pregrado, Escuela Politécnica Nacional]. Repositorio digital institucional de la Escuela Politécnica Nacional. <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20363>
- Chow, V. (2004). *Hidráulica de canales abiertos*. Nomos S.A.
- Fernández Luque, R., & Van Beek, R. (1976). Erosion and transport of bed-load sediment. *Journal of Hydraulic Research*, 14(2), 127 - 144. <https://doi.org/10.1080/00221687609499677>
- Fernández, M. (2004). *Estudio de la evolución temporal de la Erosión Local en Barcelona* [Tesis]: UPCommons. <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/3343>
- FLOW- 3D. (s.f.). Flow 3D Hydro user manual. Obtenido de <file:///C:/flow3d/HYDROv1.0u1/help/index.html>
- Gallardo, K. (2019). *Demostración experimental del efecto de los paneles sumergidos en la erosión local de pilas de puentes cuadradas*. Quito, Pichincha, Ecuador [Tesis de pregrado, Escuela Politécnica Nacional]. Repositorio digital institucional de la Escuela Politécnica Nacional. <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20172?locale=de>
- García, F., & Maza, A. (1998). Clasificación de sedimentos por tamaño. *American Geophysical Union*.
- Hamad, K. (2015). *Submerged Vanes Turbulence Experimental Analysis* [Tesis doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya]. TDX. <http://hdl.handle.net/10803/377436>
- Higgins, A., Restrepo, J., Otero, L., Ortiz, J., & Conde, M. (2017). Distribución vertical de sedimentos en suspensión en la zona de desembocadura. *Latin american journal of aquatic research*, 45(4), 724-736. <http://dx.doi.org/10.3856/vol45-issue4-fulltext-9>
- Jurado, L., & Oñate, V. (Julio de 2020). *Análisis del transporte de sedimentos aguas abajo de paneles sumergidos aplican*. Quito, Ecuador [Tesis de postgrado, Escuela Politécnica Nacional]. Repositorio digital institucional de la Escuela Politécnica Nacional. <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20172?locale=de>
- Mastbergen, D., & Van Den Berg, J. (2003). Breaching in fine sands and the generation of sustained turbidity currents in submarine canyons. *Sedimentology*, 50(4), 625 - 637. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3091.2003.00554.x>
- Meyer-Peter, E, y R Muller. (1948). Formulas for Bed-Load Transport. *Proceedings of the 2nd Meeting the International Association for Hydraulic Structures Research*, Delft, 39-64. <http://resolver.tudelft.nl/uuid:4fda9b61-be28-4703-ab06-43cdc2a21bd7>
- Nielsen, P. (1992) *Coastal Bottom Boundary Layers and Sediment Transport*. World Scientific. <https://doi.org/10.1142/1269>
- Rijn, Van. (1984). Sediment transport, Part I: bed load transport. *Journal of Hydraulic*, 110(10). 1613-1641. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1984\)110:10\(1431\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1984)110:10(1431))
- Rijn, Van. (1993). *Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas*. Aqua, Amsterdam Publications.
- Shields, A. (1936). Application of similarity principles and turbulence research to bed-load movement. *Mitteilungen der Preußischen Versuchsanstalt für*

Wasserbau. <http://resolver.tudelft.nl/uuid:a66ea380-ffa3-449b-b59f-38a35b2c6658>

Soulsby, C. (1997). Bed load transport. In *Dynamics of Marine Sand*. Thomas Telford Publications.

Weig, G, J Brethour, M Grunzner, y J. Burnham. (2014). The sediment Scour Model in Flow 3D. *Flow Science*.

BIOGRAFÍA



Khaled Mohamed Ahmed Hamad. Ingeniería Hidráulica –Escuela Politécnica Nacional desde 2015, Ingeniero Civil –Universidad del Cairo y Escuela Politécnica Nacional 2008, Máster en Ingeniería Hidráulica (MSc) – Escuela Politécnica Nacional 2011, y Doctor en Filosofía (Ph.D.) en Transporte de Sedimentos y Morfodinámica Fluvial –Escuela Superior Técnica

de Puertos, Caminos y Canales de Barcelona – Universitat Politècnica de Catalunya – España y la Universidad de Iowa – USA 2015. Ha realizado investigaciones en transporte de sedimentos con el Dr. Jacob Odgaard – Universidad de Iowa USA – IIHR, galardonado el mejor docente de la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental – EPN 2017 y 2021 por el Colegio de Ingenieros Civiles de Pichincha.



Cristina Alexandra Torres Jacobowitz. Ingeniera Civil, Magister en Recursos Hídricos con mención en “Diseño de Proyectos Hidráulicos” de la Escuela Politécnica Nacional. Experiencia en diseño y evaluación de obras hidráulicas, modelación física y numérica de fenómenos hidráulicos, diseño vial, programación y dirección de obras

civiles. Actualmente trabaja como Profesora Ocasional a tiempo completo de la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental de la Escuela Politécnica Nacional. Sus intereses de investigación se enfocan en: Mecánica Teórica y Computacional de Fluidos, Modelación Física de Fenómenos Hidráulicos, Diseño de Obras Hidráulicas y Transporte de Sedimentos.

