

Reducción de la socavación local al pie de una pila de puentes en ríos

Lucio Fragoso Sandoval

E-MAIL: luciofragosos@gmail.com

Sección de Estudios de Posgrado e investigación. Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura. Unidad Adolfo López Mateos. Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, México

Jaime Roberto Ruiz y Zurvia

E-MAIL: jaruizz@ipn.mx

Sección de Estudios de Posgrado e investigación. Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura. Unidad Adolfo López Mateos. Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, México

RESUMEN

Se describe un proyecto cuyo objetivo fue reducir experimentalmente la socavación local al pie de pilas de puentes en ríos, a través de adicionarle a la pila una transición en forma de V, al frente de la pila, se probaron tres diferentes ángulos en el vértice de la "V". Para obtener dicho objetivo, se diseñó, construyó, calibró y operó un modelo físico de una pila circular en un canal de arrastre de arenas y se determinó la geometría que redujo significativamente la socavación al pie de la pila, misma que requirió de otra transición también en V de 40°, aguas abajo de ésta. Con los resultados del proyecto se redujo la profundidad de socavación máxima que causa al pie de una pila una avenida hasta en un 93%.

**PALABRAS
CLAVES:**

Pilas de puentes, profundidad de socavación local, reducción, transiciones en V.

Local scouring reduction at foot of a bridges pile in rivers

ABSTRACT

A project is described, whose objective was experimentally to reduce local scour at the foot of a bridge's piles in rivers, by adding a V shaped transition to the pile. Three different angles were tested at the vertex of the "V", at front of the pile. To obtain this objective, a physical model of a circular pile in a sand drag channel was designed, built, calibrated and operated and the geometry that significantly reduced the scour at the foot of the pile was experimentally determined, which required another transition also in V of 40°, downstream of the pile. With the results of the project, the maximum scour depth caused by a flood at the foot of a pile was reduced until to 93%.

KEYWORDS: Bridges piles, local scouring depth, reduction, V transitions.

01 INTRODUCCIÓN

Para asegurar la estabilidad de los puentes que interactúan con ríos, el ingeniero civil tiene una gran tarea ante sí; tanto en la ubicación conveniente del puente, como en el cálculo de las profundidades de socavación producidas al pie de las pilas.

Puede afirmarse que la mayoría de colapsos en puentes que cruzan cauces fluviales de lechos formados generalmente por material no cohesivo, son provocados por la socavación local en sus pilas o estribos, que al paso de una avenida pierden apoyo y se asientan provocando la falla de la estructura, (Ettema et al, 2004, Melville and Coleman, 2000 y Fragoso et al, 2023).

Es primordial determinar con precisión la magnitud de socavación máxima al pie de pilas, o bien, obtener cómo reducir significativamente ésta, ya que de ello dependerá la posibilidad de reducir sus efectos y construir puentes más estable, y económicos. Por lo que considerando los buenos resultados que se tuvo para reducir la socavación local al pie de estribos verticales y cortos de puentes utilizando una transición en V, con un ángulo en su vértice de 20° , al frente del estribo, (Fragoso et al, 2023), se decidió realizar este proyecto, para probar los efectos que se tienen al poner una transición en V aguas arriba de la pila y colocando una segunda transición de 40° en su vértice, aguas abajo de la misma, en la socavación local que genera un cierto flujo al pie de dicha pila.

En México, no se tienen estadísticas precisas de fallas en puentes, pero el aumento de casos hace necesario obtener una forma de reducir significativamente la socavación local al pie de pilas de puentes, mediante dos transiciones en V que, al integrarlas a la pila, aumente la seguridad de dichas estructuras al reducir significativamente la socavación máxima que genera un cierto flujo.

Este proyecto se realizó en el Laboratorio de Ingeniería Hidráulica de la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Unidad Zacatenco, del Instituto Politécnico Nacional, en un canal de arenas. En este se construyó y estudió el modelo físico reducido de una pila y transiciones en V, en el que se han considerado y probado los parámetros de tirante, velocidad, profundidad máxima de socavación y gasto.

El objetivo central fue reducir la socavación local al pie de pilas de puentes, usando dos transiciones en "V", una al frente y otra atrás de la pila; y el objetivo específico fue obtener experimentalmente la geometría de las transiciones que reducen significativamente la socavación máxima local al pie de éstas.

La hipótesis de partida del presente, es que a través del estudio en modelo físico reducido de una pila circular de puente en un río, realizado en un canal con fondo de arena gruesa, al que se somete a diferentes condiciones de flujo y probando cambios en la geometría de las transiciones en V, una aguas arriba de la pila, con ángulos en su vértice de 40° , 30° y 20° ; y una segunda transición con un ángulo en su vértice de 40° aguas abajo de la pila, se reduce significativamente la profundidad de socavación local al pie de la pila.

Con los resultados de este proyecto de investigación, se reduce la profundidad de socavación máxima al pie de una pila circular, hasta en un 93 %, al instalarle a la pila circular las transiciones en V, una al frente con un ángulo de 20° en su vértice y otra atrás de la misma, con un ángulo de 40° en su vértice.

02 ANTECEDENTES

SOCAVACIÓN LOCAL EN PILAS DE PUENTES

La socavación que se desarrolla al pie de una pila de puente se le denomina socavación local y esta se debe a que cerca de la pila se presentan velocidades locales mayores a la velocidad media de la corriente y a la velocidad crítica o de inicio de movimiento de los sedimentos del lecho del cauce, las velocidades al interactuar con la pila generan vórtices frontales, laterales (de herradura) y de estela detrás de la pila, este sistema de vórtices producen la socavación, ver figura 1, Richarson y Davis (1995).

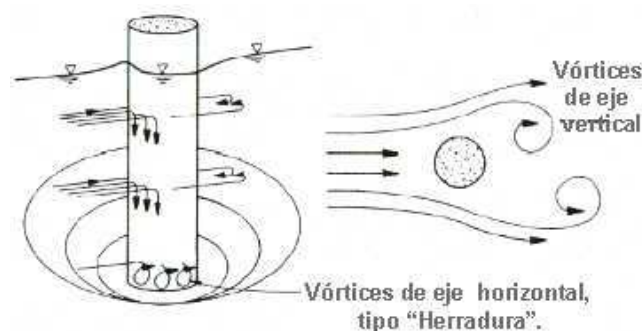


Figura 1. Vórtices alrededor de una pila circular. Richarson y Davis (1995).

Para estudiar el fenómeno de socavación en pilas de puente es necesario tener presente a las variables que interactúan en éste. Se ha probado que la profundidad máxima de socavación es función de los siguientes factores (Melville y Coleman, 2000), (Richarson y Davis, 1995) y publicado por Guevara (2016):

- Densidad del agua (ρ)
- Velocidad de aproximación del flujo (V)
- Tirante o profundidad del flujo (Y)
- Diámetro medio de los sedimentos (D)
- Diámetro de la pila o ancho efectivo de la pila (B)
- Aceleración de la gravedad (g)
- Viscosidad cinemática del flujo (ν)
- Peso específico del material del lecho (γ_s)
- Forma de la pila (K_f)
- Alineación de la pila con la dirección del flujo

La profundidad de socavación al pie de la pila depende del tipo de transporte de sedimentos que se tenga, ya sea de agua clara o de lecho vivo y es el parámetro de (V/V_c) el que da la diferencia, donde V_c es la velocidad crítica o de inicio de movimiento del sedimento.

Una de las fórmulas más utilizada en Estados Unidos para calcular la profundidad de socavación máxima es la de Richarson y Davis (1995), ecuación 1.

$$e = 2.0k_1k_2B_0^{0.65}y_1^{0.35}Fr_1^{0.42} \quad (1)$$

Donde: e: erosión máxima (m), B_0 : ancho o diámetro de la pila, k_1 : constante de forma de la pila, k_2 : constante de ángulo de ataque, y_1 : tirante o profundidad del flujo, Fr_1 : Número de Froude del flujo aguas arriba.

PARÁMETROS CONSIDERADOS EN EL ESTUDIO

- Velocidad del flujo de aproximación.
- Tirante o profundidad.
- Dimensiones de la pila.
- Tamaño, granulometría y peso específico del material del fondo.
- Gasto.
- Número de Froude del flujo (F).
- Tiempo de duración de los ensayos.

METODOLOGÍA

La metodología considerada en este proyecto fue integrada por las siguientes actividades:

1. Recopilación y análisis bibliográfico sobre socavación local al pie de pilas de puentes en ríos.
2. Preparación del canal de arrastre de arena del Laboratorio de Ingeniería Hidráulica de la ESIA Unidad Zacatenco (LIHESIAZ).
3. Diseño y construcción del modelo de la pila y de sus transiciones en V.
4. Instrumentación, calibración del modelo y diseño del programa de ensayos.
5. Desarrollo de los ensayos en cinco series, las 4 primeras con tiempo de duración de 30 minutos y la última (5ª serie), con un tiempo de 60 minutos.

Serie 1.-Pila original

Serie 2.-Pila con transición en V al frente con un ángulo interior de 40°

Serie 3.-Pila con transición al frente con ángulo interior de 30° y otra transición atrás con ángulo de 40°

Serie 4.-Pila con transición al frente con un ángulo interior de 20° y otra atrás con ángulo de 40°.

Serie 5.-Igual que serie 4, pero con un tiempo de duración de 60 minutos.

6. Procesamiento y análisis de resultados.
7. Formulación de conclusiones y recomendaciones del estudio
8. Redacción y elaboración de reporte final.

03 DESARROLLO

EQUIPO E INSTRUMENTACIÓN

La etapa experimental del presente trabajo de investigación, se realizó en las instalaciones del Laboratorio de Ingeniería Hidráulica de la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Unidad Zacatenco (ESIA-UZ), del Instituto Politécnico Nacional. La instalación en la que se construyó el modelo es el canal de arenas (ver figura 2), de sección rectangular, de fondo plano, de 16.50 m de largo, 2.00 m de ancho y 0.60 m de profundidad.

El suministro del agua al canal es a través de dos tuberías, una de 8" y otra de 6" de diámetro, controladas con válvulas de compuerta de igual diámetro y alimentada desde el tanque elevado de carga constante, que a su vez se le suministra de agua a través, de dos bombas, una de 30 HP y otra de 20 HP; desde la cisterna de almacenamiento, ubicada abajo de dicho tanque. El rango del gasto de operación y disponible es de: $Q_{\max} = 131.32$ lps y $Q_{\min} = 51.42$ lps. Este rango de gasto cubre con las necesidades para proporcionar las velocidades requeridas en la experimentación programada.



Figura 2. Canal de arenas del Laboratorio de Hidráulica.

INSTRUMENTOS PARA MEDIR LA PROFUNDIDAD DE SOCAVACIÓN

Las mediciones de la profundidad del foso de socavación, se efectuaron utilizando un limnómetro de punta móvil, ver figura 3.

INSTRUMENTOS PARA MEDIR EL GASTO

El gasto se midió con un vertedor de pared delgada tipo Rehbock, de 2 m de largo y 0.20 m de carga máxima, cubriendo el rango de gastos requeridos. El vertedor se colocó en el extremo final del canal de arenas. La carga sobre el vertedor se midió con un limnómetro de gancho, con una aproximación de ± 0.1 mm, instalado dentro del canal de arenas a 2 m, aguas arriba del vertedor, ver figura 4.

INSTRUMENTOS PARA MEDIR EL TIRANTE

El tirante también se midió con el limnómetro de gancho, descrito en el párrafo anterior, mismo que está colocado en la pared izquierda del canal, ver figura 4.



Figura 3. Limnómetro móvil, para medir la profundidad de socavación.



Figura 4. Limnómetro de gancho.

INSTRUMENTOS PARA MEDIR LA VELOCIDAD

Para medir la velocidad, se utilizó un velocímetro electrónico digital de mini hélice de 1 cm de diámetro.

MODELO FÍSICO HIDRÁULICO

ESCALA DEL MODELO

Generalmente la selección de la escala de líneas, se hace en forma independiente, buscando que el modelo resulte lo más grande posible (Vergara, 1993), siempre y cuando lo permita el presupuesto, el espacio, el tiempo, la instrumentación, las rugosidades a reproducir, así como la alimentación de agua. En la selección de la escala es recomendable tomar en consideración que, durante la operación del modelo, el efecto de escala sea lo más reducido posible.

El efecto de escala se puede definir como la diferencia resultante entre las condiciones del modelo y las del prototipo, causadas por la imposibilidad práctica de lograr que actúen simultáneamente todas las fuerzas del prototipo en el modelo.

Por lo anterior y, teniendo en cuenta proyectos previos realizados, se seleccionó la escala de longitudes, E_L , de 1:20, para la construcción del modelo, que está dentro del rango de escalas recomendadas, (Vergara, 1993); para este tipo de estudios en modelos sin distorsión.

Ahora bien, como la socavación al pie de pilas es un fenómeno de flujo a superficie libre, las fuerzas que predominan en él son: las fuerzas de inercia y de gravedad, por lo que otras escalas se obtuvieron aplicando el Criterio de Similitud de Froude, resultando las siguientes escalas requeridas en el estudio:

$$E_L = 20 ; E_V = 4,472 ; E_T = 4,472 \text{ y } E_Q = 1778,85$$

Mismas que son la escala de líneas, de velocidades, de tiempos y de gastos; respectivamente.

CONSTRUCCIÓN DEL MODELO

La geometría y dimensiones de la pila, que, en sí, consistieron propiamente el modelo, corresponden a una tubería de PVC hidráulico, de sección circular de 16.8 cm de diámetro (Fragoso et al, 2017). Esta dimensión se eligió en función del ancho del canal, considerando, de manera conservadora, que es la mayor permisible para evitar efectos de escala y fenómenos perturbadores ocasionados por el rebote de las estelas del agua en la pared del canal. Ver figura 5.

En el caso de la construcción de las transiciones en “V” en madera tratada, sus dimensiones estuvieron en función del ángulo interior de éstas y del diámetro de la pila, ver figura 6.



Figura 5. Modelo hidráulico de la pila.

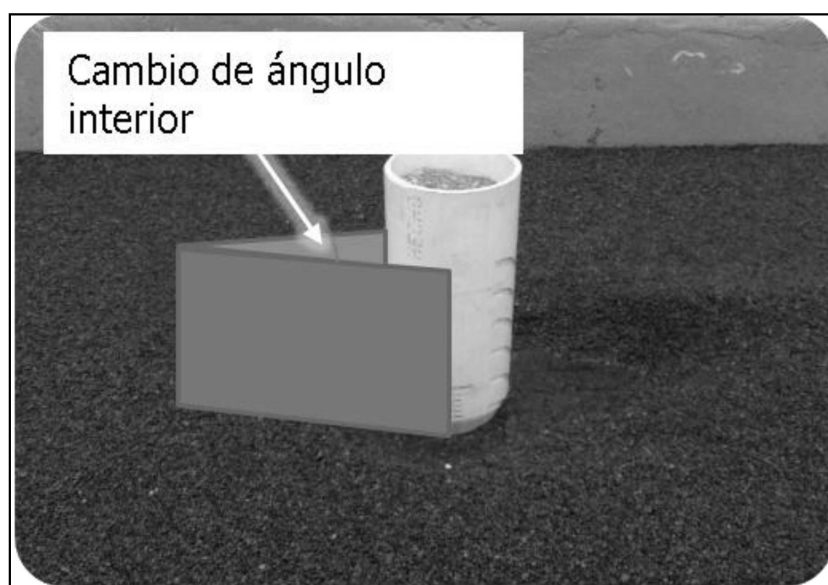


Figura 6. Modelo de la pila con la transición propuesta.

Determinación de la granulometría del material del fondo: la granulometría del material seleccionado para representar el fondo erosionable, se determinó mediante un análisis mecánico.

Los diámetros característicos obtenidos son:

- $D_{90} = 4,190 \text{ mm}$
- $D_{70} = 2,896 \text{ mm}$
- $D_{50} = 2,120 \text{ mm}$

Su peso específico relativo seco es de:

- $\gamma' = 1,302$

Determinación de la velocidad crítica o de inicio de movimiento del material del fondo: la velocidad crítica o de inicio de movimiento del material del fondo, se obtuvo experimentalmente en un canal de pendiente variable, resultando una velocidad de inicio de movimiento de 0,28 m/s.

CALIBRACIÓN DEL MODELO

Esta consistió en verificar que el equipo de bombeo y la instalación en que se estudió el modelo, estuviese en condiciones de proporcionar el flujo de agua requerido para los ensayos, en un rango de gastos comprendido entre 51,42 a 135,5 l/s y además el tiempo de duración de los ensayos, de 30 minutos, se tomó de un estudio anterior, que se realizó en la misma instalación y en general muy similar a éste, Fragoso et al (2023), de forma tal, que se pudiera determinar la profundidad de socavación máxima al pie de la pila, solo con “lecho vivo” (con velocidades medias mayores a la velocidad crítica), en el modelo.

Primero se efectuó la calibración de las dos válvulas, con las que se controlaba la alimentación de agua al modelo, de 6” y 8” de diámetro, y se verificó que el vertedor rectangular, de pared delgada, tipo Rehbock, previamente calibrado en el laboratorio cumpliera con la ecuación 2.

$$Q = 1,85(H)^{3/2} \quad (2)$$

PROGRAMA DE ENSAYOS

Una cuestión importante es la del número total de ensayos. Es evidente de que cuantas más pruebas adecuadas se realicen, mayor es la precisión de las conclusiones a que se lleguen y de las leyes matemáticas que se obtengan. Así que se eligió un número que fuera representativo utilizando al máximo los recursos disponibles.

Se efectuarán 10 ensayos por serie; con duración de 30 minutos cada ensayo para las series 1 a 4 y la serie 5 sus 10 ensayos tuvieron una duración de 60 minutos, todos en un modelo de fondo plano y lecho vivo. Como ya se mencionó anteriormente, los ensayos se realizaron en 5 series, resultando un total de 50 ensayos.

METODOLOGÍA DE LOS ENSAYOS

La metodología para llevar a cabo los ensayos de laboratorio, está basada en las siguientes dos consideraciones: i) todos los ensayos se efectuaron en condiciones de lecho vivo; ii) con el fin de tener un rango aceptable de valores del número de Froude, se estableció un mínimo de diez tirantes y diez gastos por serie, estos se fueron incrementando gradualmente (Fragoso et al 2017).

Por lo que la metodología para el desarrollo de cada uno de los ensayos está integrada por las siguientes actividades:

- a) Nivelar con auxilio de un escantillón y una regla metálica, la zona de lecho móvil.
- b) Colocar y asegurar la verticalidad, en el centro de la zona de arena (lecho móvil), la pila modelo.
- c) Cerrar completamente la válvula de desfogue y poner en funcionamiento las bombas de 20 y 30 HP.

- d) Después de 5 minutos, se establece el gasto del ensayo abriendo las válvulas de alimentación y se procede a establecer el tirante del ensayo lo más rápido posible, manipulando la válvula de desfogue.
- e) Al llegar al nivel del tirante del ensayo, inicia la cuenta del tiempo de duración del ensayo (30 minutos series 1 a 4 y de 60 minutos para ensayos de la serie 5).
- f) Durante la duración del ensayo, se efectúan lecturas del tirante de ensayo a 5, 15 y 25 minutos, impresión de placas fotográficas y/o toma de vídeo, mantener el gasto y tirante constantes, y tomar nota de las observaciones de importancia.
- g) Al finalizar el tiempo de ensayo: cerrar rápido la válvula de desfogue e, inmediatamente después cerrar las válvulas de alimentación y parar el funcionamiento del equipo de bombeo.
- h) Vaciar lentamente el canal, evitando el movimiento del material del lecho, mediante el manejo de la válvula de desfogue.
- i) Esperar 30 minutos al menos después de vaciar el canal, con el fin de que los encharcamientos que puedan quedar se vacíen y la zona de experimentación quede libre de agua.
- j) Una vez completamente libre de agua la zona de experimentación, se procede a efectuar la medición de la profundidad del foso de socavación con el limnómetro de punta viajero.

ENSAYOS

Primera serie. Se realizaron 10 ensayos con una pila circular, ver tabla 1 y figuras 7 y 10. Esta serie de ensayos se efectuaron con el objeto de conocer la magnitud de la socavación máxima al pie de la pila, al variar el flujo (tirante, velocidad y Número de Froude). Presentando profundidades de socavación desde 0.66 m hasta 2.70 m en prototipo, ver tabla 1 y figura 10; cuyos valores son muy altos, por lo que en la segunda serie se probó la pila con una transición en V al frente con 40° en su vértice, para reducir dicha socavación.

Tabla 1. Ensayos con pila circular original.

No. Ensayo	Tirante del flujo (d) m	Velocidad media (V) m/s	Número de Fr del flujo	Profundidad socavación (ds) m
1	2.42	1.61	0.36	0.66
2	2.52	1.92	0.39	0.72
3	2.76	2.15	0.41	0.80
4	3.08	2.53	0.46	1.38
5	3.20	2.68	0.48	1.60
6	3.30	2.86	0.505	1.80
7	3.44	2.95	0.51	1.96

No. Ensayo	Tirante del flujo (d) m	Velocidad media (V) m/s	Número de Fr del flujo	Profundidad socavación (ds) m
8	3.50	3.04	0.52	2.50
9	3.52	3.13	0.53	2.60
10	3.56	3.22	0.54	2.70

Segunda serie. En ésta, se realizaron otros 10 ensayos con la pila circular con una transición en V con un ángulo de 40° en su vértice, al frente de la pila. Presentando una socavación de 0.40 a 2.90 m. De lo cual se puede observar, que para velocidades igual o menores a 2.95 m/s, si se reduce la socavación que generó la pila original, pero para velocidades mayores a dicho valor la socavación se incrementó. Lo cual pudo ser debido, a que se requería también de otra transición en V, aguas abajo de la pila. Ver tabla 2 y figuras 8 y 10.



Figura 7. Vista de la pila circular original después de un ensayo.

Tercera serie. En ésta, se realizaron otros 10 ensayos con la pila circular, pero con una transición en V al frente de la pila con un ángulo de 30° en su vértice y otra transición en V aguas abajo con 40° en su vértice. Generando una reducción en la socavación máxima promedio, de un 57 %, pues presentó profundidades de socavación de 0.34 a 1.48 m, en prototipo. Ver tabla 3 y figura 10.

Tabla 2. Ensayos con pila circular con transición en V, al frente a 40° en su vértice

No. Ensayo	Tirante del flujo "d" en m	Velocidad media "V" m/s	Número de Fr del flujo	Profundidad socavación "ds" en m
1	2.40	1.61	0.33	0.40
2	2.50	2.01	0.40	0.50
3	2.76	2.37	0.45	0.60

No. Ensayo	Tirante del flujo "d" en m	Velocidad media "V" m/s	Número de Fr del flujo	Profundidad socavación "ds" en m
4	2.90	2.64	0.49	1.10
5	3.20	2.86	0.50	1.40
6	3.30	2.95	0.51	1.90
7	3.36	3.00	0.52	2.40
8	3.40	3.04	0.53	2.64
9	3.42	3.09	0.53	2.82
10	3.44	3.13	0.54	2.90

Cuarta serie: En ésta se realizaron otros 10 ensayos con la pila y con una transición en V al frente con 20° en su vértice y otra transición en V atrás con 40° en su vértice. Presentando una reducción en la socavación máxima promedio de un 93 %, con respecto a la presentada por la pila original, en la etapa uno, pues presentó socavaciones de 0.1 a 0.22 m en prototipo. Ver tabla 4 y figura 10.

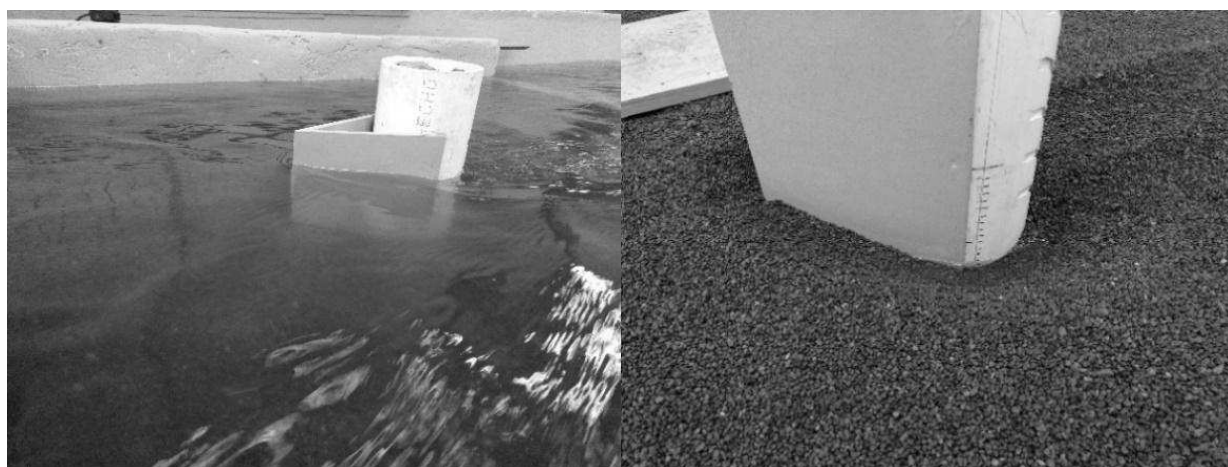


Figura 8. Antes y después de la realización de un ensayo de la segunda serie, pila con transición en V al frente con ángulo de 40° en su vértice.

Tabla 3. Ensayos con pila circular con transición en V al frente con 30° y otra atrás de 40°.

No. Ensayo	Tirante del flujo "d" en m	Velocidad media "V" m/s	Número de Fr del flujo	Profundidad socavación "ds" en m
1	2.40	1.65	0.3410	0.34
2	2.50	1.74	0.3522	0.364
3	2.76	2.10	0.4039	0.38

No. Ensayo	Tirante del flujo "d" en m	Velocidad media "V" m/s	Número de Fr del flujo	Profundidad socavación "ds" en m
4	2.98	2.41	0.4466	0.43
5	3.16	2.77	0.4980	0.46
6	3.28	2.95	0.5203	0.74
7	3.40	3.13	0.5420	0.92
8	3.48	3.31	0.5664	1.14
9	3.50	3.35	0.5724	1.30
10	3.52	3.40	0.5784	1.48

Tabla 4. Ensayos con pila circular con transición en V al frente con 20° y otra atrás de 40°.

No. Ensayo	Tirante del flujo "d" en m	Velocidad media "V" m/s	Número de Fr del flujo	Profundidad socavación "ds" en m
1	2.40	1.65	0.3410	0.10
2	2.50	1.74	0.3522	0.12
3	2.66	2.10	0.4039	0.14
4	2.98	2.42	0.4466	0.15
5	3.16	2.77	0.4980	0.16
6	3.28	2.95	0.5203	0.17
7	3.40	3.13	0.5420	0.18
8	3.48	3.31	0.5664	0.20
9	3.50	3.35	0.5724	0.21
10	3.60	3.40	0.5784	0.22

Quinta serie. En esta etapa se realizaron otros 10 ensayos con la pila y con una transición en V al frente con un ángulo de 20° en su vértice y otra atrás con 40° en su vértice, la misma estructura de la etapa anterior, pero en esta serie se ensayó con un tiempo de duración de 60 minutos, con el objetivo de ver si se había alcanzado ya la profundidad de equilibrio o no. Presentando aún una significativa reducción en la socavación máxima en promedio de un 80 %, con respecto a la presentada por la pila original, en la serie uno, pues presentó socavaciones de 0.18 a 0.52 m en prototipo y de qué aún no se había alcanzado la profundidad de equilibrio. Ver tabla 5 y figuras 9 y 10.

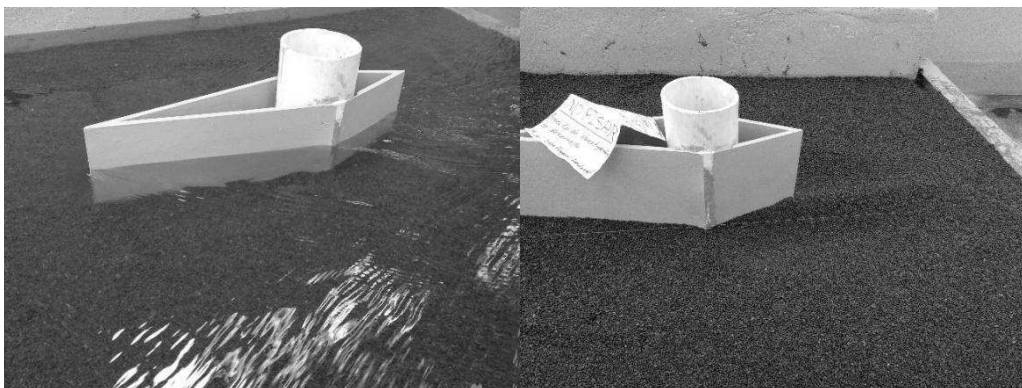


Figura 9. Vista de la pila con transición en V de 20° al frente y otra de 40° atrás de ésta, en pleno ensayo y después del mismo.

Tabla 5. Ensayos con pila circular con transición en V al frente con 20° y otra transición atrás de 40°; y tiempo de duración de ensayos de 60 minutos.

No. Ensayo	Tirante del flujo "d" en m	Velocidad media "V" m/s	Número de Fr del flujo	Profundidad socavación "ds" en cm
1	0.48	1.65	0.3410	0.18
2	0.50	1.74	0.3522	0.25
3	0.552	2.10	0.4039	0.30
4	0.596	2.41	0.4466	0.33
5	0.632	2.7	0.4980	0.38
6	0.652	2.95	0.5203	0.40
7	0.68	3.13	0.5420	0.50
8	0.696	3.31	0.5664	0.51
9	0.70	3.35	0.5724	0.51
10	0.74	3.40	0.5784	0.52

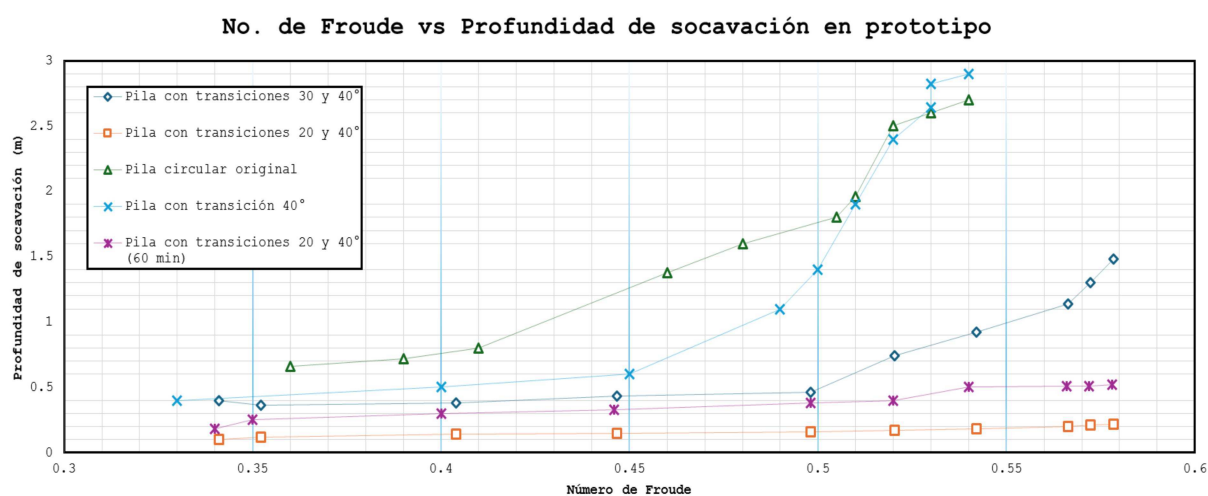


Figura 10. Gráficas de la profundidad de socavación Vs. Número de Froude del flujo, en prototipo.

04 RESULTADOS

REDUCCIÓN DE LA PROFUNDIDAD DE SOCAVACIÓN.

Los resultados obtenidos, en este proyecto fueron altamente satisfactorios, pues en la serie de ensayos uno, con la pila circular original, la socavación máxima al variar el flujo (velocidad, gasto, Número de Froude, tirante), presentó socavaciones (de 0.60 a 2.70 m en prototipo), ver tabla 1 y figuras 7 y 10.

En la segunda serie de ensayos se probó la misma pila, pero con una transición en V al frente, con un ángulo en su vértice de 40° , la socavación obtenida resultó (de 0.4 a 2.90 m en prototipo). De lo cual se pudo observar, que en velocidades menores a 2.95 m/s, si reduce la socavación que presentó la pila original, pero con velocidades mayores, la profundidad de socavación resultó mayor a las generadas por la pila original. Ver tablas 1 y 2 y figuras 8 y 10. Es decir la pila requería de otra transición aguas abajo, para reducir la socavación.

En la serie de ensayos tres, con pila original con una transición en V, al frente con un ángulo de 30° en su vértice y otra transición en V, atrás con un ángulo de 40° en su vértice, la socavación máxima que produjo la pila original se reduce aproximadamente en promedio a un 57 %, pues presentó socavaciones de 0.34 a 1.48 m en prototipo (ver tablas 1 y 3; y figura 10).

En la serie de ensayos cuatro, con pila original con una transición en V al frente, con un ángulo de 20° en su vértice y otra transición en V, atrás con un ángulo de 40° en su vértice, la socavación máxima obtenida se reduce en promedio en un 93 %, con respecto a la que generó la pila original (serie uno), pues presentó socavaciones (de 0.10 a 0.22 m en prototipo), ver tabla 1 y 4 y figura 10.

En la serie de ensayos cinco, con la misma estructura de la etapa anterior, pero incrementando el tiempo de duración de los ensayos de 30 a 60 minutos, la profundidad de socavación máxima obtenida con la pila original (serie 1), aún se reduce en promedio en un 80 %, pues presentó socavaciones (de 0.18 a 0.52 m en prototipo), ver tablas 1 y 5; y figuras 9 y 10.

05 CONCLUSIONES

- Con la pila original con transición en V, al frente con un ángulo de 40° en su vértice, se reduce la profundidad de socavación máxima que presento la serie 1 hasta con una velocidad menor o igual a 2.95 m/s ($Fr = 0.51$), con velocidades mayores se incrementa la profundidad de socavación. Lo que indicaba que requería de otra transición aguas abajo, ver tablas 1 y 2 y figuras 8 y 10.
- Con la pila original con una transición en V, al frente con un ángulo de 30° en su vértice y otra transición en V aguas abajo, con un ángulo de 40° en su vértice, la profundidad de socavación máxima que presentó la serie 1, se reduce en promedio a un 57 %, ver tablas 1 y 3 y figura 10.
- Con la pila original con una transición en V al frente, con un ángulo de 20° y otra transición en V, aguas abajo con un ángulo de 40° en su vértice, la profundidad de socavación máxima obtenida en la serie 1, se reduce en un 93 %, (ver tablas 1 y 4 y figura 10). Es decir, se cumple la hipótesis de partida.

- Con la pila original con una transición en V al frente con un ángulo de 20° en su vértice y otra transición aguas abajo en V, con un ángulo de 40° en su vértice, con un tiempo de duración de 60 minutos, se demostró que no se alcanzó la profundidad de socavación de equilibrio en 30 minutos; y se obtuvieron valores de profundidades de socavación máximas moderadas en prototipo (de 0,18 m a 0,52 m) con Números de Froude del flujo, de 0,34 a 0,58; y velocidades medias desde 1,65 m/s a 3,40 m/s, ver tabla 5 y figuras 9 y 10.

06 REFERENCIAS

- Ettema R., Yoon B., Nakato T. and Muste M.; (2004).** "A review of scour condition and scour estimation difficulties for bridge abutments". KSCE Journal of Civil Engineering, vol. 8 no. 6, pp 643-650, ISSN 1976-3808.
- Fragoso S. L., Ruiz y Z. F. J. y Rosales F. G. V.; (2023);** "Reducción de la socavación local al pie de estribos cortos y verticales de puentes"; Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Vol XLIV No. 2, pp. 72-84, ISSN 2788-6050, Centro de Investigaciones Hidráulicas, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (CUJAE), Cuba.
- Fragoso S. L., Ruiz y Z. F. J. R., Viguera, M. L. P., Silva R. I. y Teoyotl F. J. C.; (2017).** "Socavación al pie de pilas de puentes en ríos". Reporte final de investigación, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Unidad Zacatenco, Número de registro 20171535, Secretaría de Investigación y Posgrado, del Instituto Politécnico Nacional de México.
- Guevara A. M. E. (2016);** "Socavación en puentes. Teoría y Práctica". Facultad de Ingeniería, Lemoine Editores, Universidad del Cauca, Pp. 155-160, ISBN 978-958-590-354-8. Popayán, Colombia.
- Melville, B.W. and Coleman, S.E., (2000).** "Bridge Scour", USA/Canada; Water Resources Publications, LLC. Pp. 193-209, ISBN 1887-201-18-1. Highland Ranch, Colorado, USA.
- Richarson E. U. and Davis S. R. (1995).** "Evaluating scour at bridges". Federal Highway Administration. Hydraulic Engineering. Circular No. 18 (HEC-18), Washington, USA, 1995.
- Vergara S. M. A.; (1993).** "Técnicas de Modelación en Hidráulica"; Editorial Alfa Omega, pp. 163 y 164; ISBN 968-6223-76-2. Ciudad de México, México.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses

Contribución de los autores

Lucio Frago Sandoval

<https://orcid.org/0009-0005-5092-9066>

Realizó la dirección del proyecto de investigación, participó en el análisis de resultados, en la redacción del informe final, y en la formulación de las conclusiones.

Jaime Roberto Ruiz y Zurvia Flores

<https://orcid.org/0009-0005-0676-4858>

Participó en la planeación y desarrollo de la investigación, en el procesamiento de datos haciendo contribuciones en su análisis e interpretación y en la redacción final.