

INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA
COORDINACIÓN DE HIDRÁULICA.
SUBCOORDINACIÓN DE OBRAS Y EQUIPOS HIDRÁULICOS

PROYECTO INTERNO IMTA: HC 1613.1.
APORTACIONES A LA TECNOLOGÍA ACTUAL CONTRA LA SOCAVACIÓN DE PILAS Y
ESTRIBOS DE PUENTE Y OTRAS ESTRUCTURAS
INFORME FINAL

Jefe de proyecto:

Gilberto Salgado Maldonado.

Participación

Cecia Millán Barrera

Participación profesional de:

Robie Bonilla Gris

Miguel Alejandro Martínez Rodríguez

Lidia Zulema Tostado Bojorquez

Coordinación:

José Raúl Saavedra Horita

José Alfredo Gonzales Verdugo

JIUTEPEC, MORELOS A 05/12/2016

Contenido

Antecedentes.....	3
Objetivos del estudio.....	3
Bases tecnológicas del proyecto.....	4
Tecnología propuesta.	6
Características de la instalación.....	8
Instrumentación.	11
Parámetros para las pilas y material del fondo.....	11
Parámetros hidráulicos.	14
Pruebas preliminares de calibración y ajuste.	14
Ensayos de evaluación.....	17
Resultados.....	17
Observaciones y recomendaciones.	20
Referencias.....	21

Antecedentes.

La causa más frecuente de las fallas de puentes que cruzan corrientes de agua es la socavación al pie de las pilas y de los estribos que los soportan, conocida como *socavación local*; dichas fallas se producen mayormente durante las avenidas. El diseño de la profundidad de desplante de la cimentación de esos elementos es muy importante para la seguridad de la estructura completa; sin embargo, el costo de alcanzar la profundidad requerida puede ser excesivo.

En cambio, la reducción o mitigación del mecanismo de la socavación trae como resultado mejorar la resistencia de los puentes a dicho fenómeno sin recurrir a la excavación de profundidades importantes de la cimentación y, a la vez, aumenta la resiliencia de los mismos, al detener tempranamente el proceso de socavación en la fase descendente de la avenida y facilitar así el relleno del foso producido.

El presente estudio va en el sentido de reducir y retardar la socavación local. Se plantea la continuación de los estudios realizados en Laboratorio de Ingeniería Hidráulica de la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura del IPN, dirigidos por el M. C. Robie Bonilla Gris.

El proyecto consideró la realización de pruebas en modelos físicos a escala reducida con fondo móvil para simular la socavación en pilas de puente y requirió las siguientes acciones:

1. Protocolo del estudio y diseño de los experimentos en los modelos físicos.
2. Ensayos preliminares y ajuste.
3. Ensayos de evaluación de las técnicas propuestas.
4. Elaboración de informes parciales y final.

Las actividades involucraron un importante grado de especialización, por lo que se requirió que el M. en C. Robie Bonilla Gris, proponente de la tecnología, brindara la asesoría necesaria en su ejecución, y quien realizó una serie de estudios en los que basó su patente No. US7628569 "*Covering Element for Protecting Structures Against Scouring and Drag Force*".

Se considera la realización de pruebas en un modelo físico a escala reducida con fondo móvil para simular la socavación local en pilas de puente, para lo que se requirieron las siguientes acciones:

1. Protocolo del estudio y diseño de experimentos del modelo físico.
2. Ensayos Preliminares y ajuste
3. Ensayos de evaluación de las técnicas propuestas
4. Elaboración de informes parciales y final

Las actividades involucran un importante grado de especialización, por lo que se requirió la asesoría del M. en C. Robie Bonilla Gris.

Objetivos del estudio.

Desarrollar experimentalmente la tecnología, cuyo concepto fue probado cualitativamente de manera preliminar en laboratorio hidráulico, para reducción de la profundidad y del volumen de socavación local en pilas y estribos de puente y estructuras similares, por medio de la aplicación de dos recursos técnicos propuestos en la patente citada: rugosidad artificial especialmente

diseñada (cuya utilización no pertenece todavía al estado actual de la técnica y constituye por tanto una innovación) y diseño hidrodinámico, recursos a aplicar a los elementos de la subestructura.

1. Incorporar los resultados de la aplicación de los recursos técnicos citados al conjunto de factores considerados en las fórmulas más utilizadas para el cálculo de la profundidad de socavación local, a través de coeficientes y ayudas de cálculo.
2. Determinar experimentalmente en laboratorio, cuantitativamente, el efecto retardador de la utilización de ambos recursos técnicos en la rapidez de desarrollo del foso de socavación local. Dicho efecto retardador puede ser decisivo en la conservación de la estabilidad del puente, aumentando la resistencia y la resiliencia de éste (ya que el foso de socavación generalmente es rellenado por el sedimento transportado desde aguas arriba después de que ha pasado el pico de la avenida y la cimentación puede recuperar anticipadamente su capacidad portante anterior al fenómeno hidrológico).

Bases tecnológicas del proyecto.

Premisa 1.

La socavación (pérdida del material que sustenta a las estructuras apoyadas en cauces y márgenes de corrientes) es la primera causa de fallas y colapsos de puentes. Cerca del 60% de ellos se deben a este fenómeno (Ilustración 1). Esta cifra indica que dichas estructuras son probablemente las más susceptibles a daño de todas las hechas por el hombre.

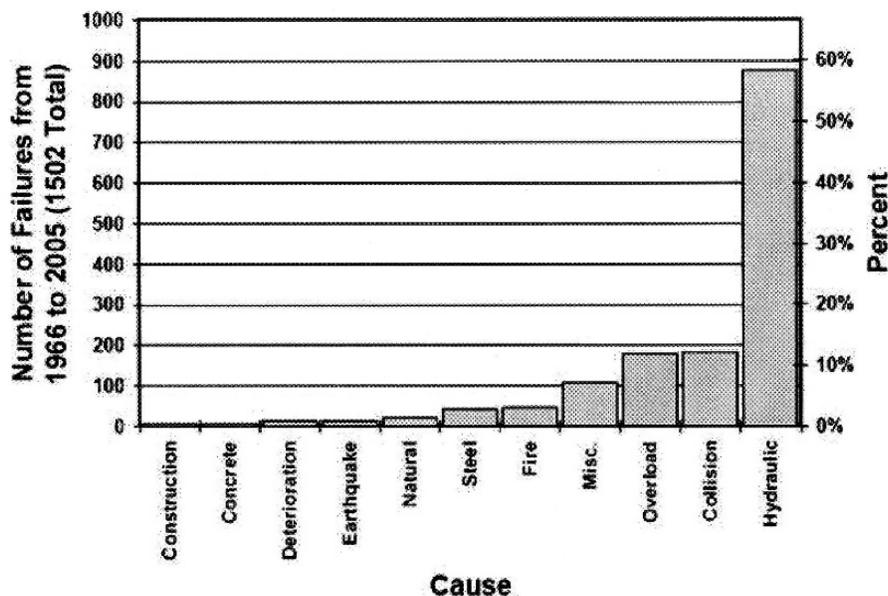


Ilustración 1. Estadísticas de fallas en puentes en EU (1966 -2005) (Ref. 1).

Premisa 2.

La socavación local, que se presenta alrededor de los elementos de la subestructura de los puentes –pilas y estribos--, se debe a la intrusión de la estructura en la corriente, que es un sistema en equilibrio dinámico. Esto da origen a los vórtices responsables del fenómeno, los que no existían antes de la presencia de la estructura (Ilustración 2).

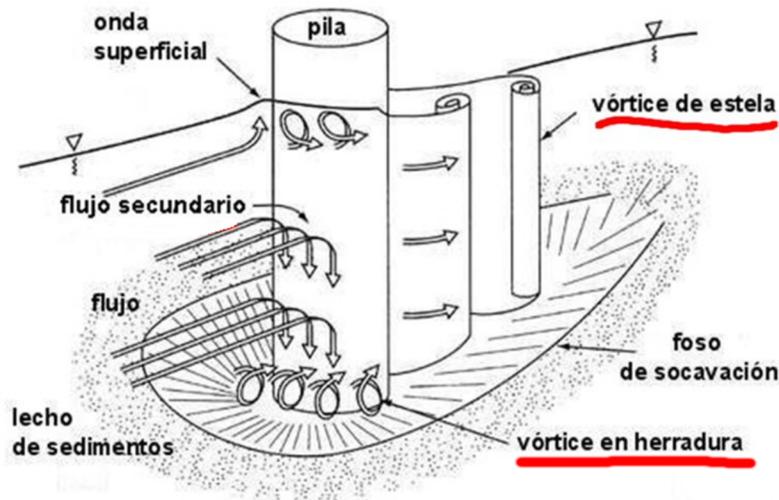


Ilustración 2. Mecanismos de la socavación local (Ref. 2).

El *vórtice “en herradura”* resulta del impacto contra el fondo del flujo secundario –debido éste al gradiente vertical de las velocidades del flujo que son convertidas en presiones de estancamiento al incidir en el frente de la pila--. Su intensidad, en el caso de una pila lisa (lo son todas las pilas, *hasta ahora*), depende de dicho gradiente y del área del frente o borde de ataque de la pila.

Los *vórtices de estela* son como pequeños tornados que generalmente se extienden desde el fondo hasta la superficie libre del agua, succionando partículas de sedimento del fondo y poniéndolas en suspensión; la corriente se encarga de arrastrarlas fuera del entorno inmediato de la pila.

El material socavado por los vórtices en herradura son levantados por los vórtices de estela, complementándose de esta forma el fenómeno de socavación local de la pila.

Premisa 3.

El estado actual de la técnica de reducción de la socavación consiste en “*blindar*” el fondo del cauce (o sea, en actuar contra *el efecto*: la socavación, en vez de hacerlo contra *la causa*: los vórtices).

Así, actuar contra la causa significa mitigar el efecto de los vórtices en la socavación, ya sea disminuyendo su intensidad y reorientando su trayectoria.

La Ilustración 3 muestra varios de los recursos comúnmente usados contra la socavación.

A pesar de ser muy utilizado actuar contra el efecto tiene varias debilidades; por ejemplo, el pedraplén (mostrado arriba, a la izquierda) tiene 3 modos de falla, además de reducir el área del flujo, causando aumentos locales de la velocidad del agua y alterando el medio y los procesos fluviales. De la misma manera, cualquier geometría adicional a la pila suma efectos hidrodinámicos del flujo a los generados por esta.



Ilustración 3. Diferentes medios de acción usados contra la socavación.

Tecnología propuesta.

El análisis de los mecanismos de socavación local indica claramente que la característica hidrodinámica a controlar es la vorticidad generada por el rozamiento del flujo con las estructuras sumergidas. He aquí cómo actúan las características de la tecnología propuesta contra los mecanismos de socavación local:

Vórtice “en herradura”: puesto que es producido por el flujo secundario que escurre verticalmente hacia abajo en contacto con el borde de ataque de la estructura, es posible amortiguar dicho flujo creando en ese borde una rugosidad formada por una serie de ranuras, que inducen la producción de una familia de vórtices que le restan cantidad de movimiento al flujo secundario y que son arrastrados por la corriente sin llegar al fondo, donde harían daño. Este recurso se emplea en los rompeolas, donde la rugosidad de su superficie inclinada amortigua el lamido de la ola (o *runup*) y evita el rebase de la ola sobre la estructura.

Vórtices de estela: la inspiración la dio la siguiente figura, que es un *collage* de dos fotografías tomadas en un túnel de viento de ONERA (el laboratorio nacional de investigación aeroespacial de Francia). En la parte superior se encuentra una pelota lisa y en la inferior, un pelota de golf, ambas en un flujo de aire con las mismas características. Los términos *laminar* y *turbulenta* se refieren a la capa límite. Ilustración 4.

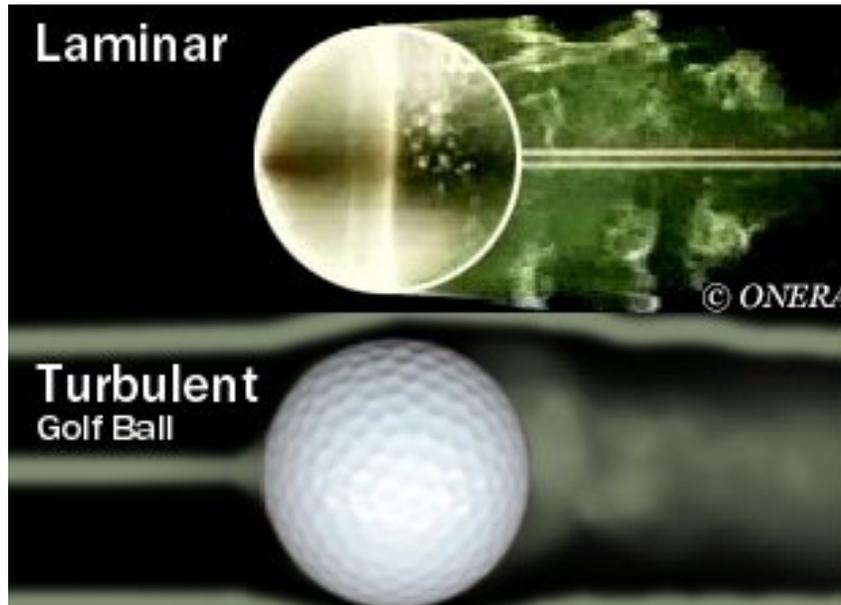


Ilustración 4. En el túnel de viento, una pelota lisa (arriba) y una pelota de golf (abajo) (Ref. 3).

Puede apreciarse que en el caso de la pelota lisa la estela es ancha, con vórtices definidos de gran intensidad, mientras que la pelota de golf presenta una estela angosta, con una vorticidad difusa formada por vórtices débiles. Puede imaginarse que, en vez de aire, el fluido es agua; en vez de esferas, son cilindros (esto es, pilas) circulares, vistas en planta. Hipótesis resultante: las pilas rugosas producen menor vorticidad de estela –y, por tanto, menor socavación--. La experimentación preliminar confirmó esta hipótesis.

El otro recurso, aparte de la rugosidad artificial, es el perfil hidrodinámico, que presenta un borde de ataque menor que el de un perfil circular y, por tanto, un flujo secundario menos intenso; además, presenta estelas con escasa vorticidad. Esta medida es conocida de muy antiguo; la razón de que no se aplique generalmente es de tipo constructivo: no es muy práctico ni económico diseñar y construir estructuras con esos perfiles.

El resultado de la combinación de ambos recursos, el Recubrimiento Anti socavación, objeto de la patente mencionada, incluye dos tipos de rugosidad artificial (*direccional*, en el borde de ataque y *no direccional* en el resto de la pila) más un perfil hidrodinámico (Ilustración 5).

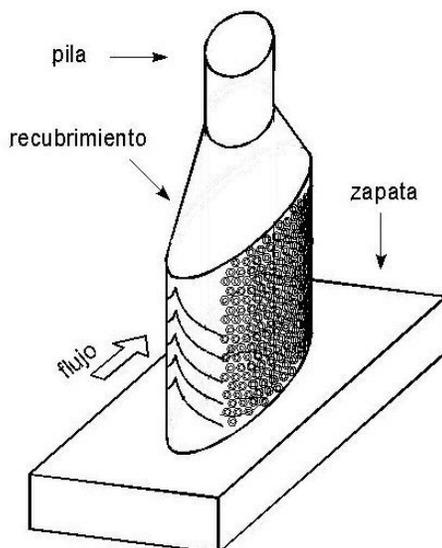


Ilustración 5. El Recubrimiento Antisocavación (US Pat. No. 7628569).

El aplicar la rugosidad no representa ningún problema práctico en la construcción, y el perfil puede ser construido, por ejemplo, con elementos de concreto precolado –independientemente de la pila, que puede tener cualquier forma de sección, aun la de peor desempeño hidrodinámico— y ser agregado posteriormente (lo que permite ser aplicado a puentes nuevos o ya en servicio). No hay afectación desfavorable alguna a la estructura, ya que *el Recubrimiento no desempeña papel estructural alguno, sino solamente hidráulico.*

Al reducirse la vorticidad de estela, se reducen también los efectos que dicha vorticidad produce aguas abajo, como la socavación exacerbada de estructuras situadas a cierta distancia aguas abajo de la que generó la estela. El autor de esta tecnología ha estudiado varios casos de fallas de puentes debidas a esta causa.

El enfoque descrito en este documento es una vía todavía no explorada de atención y prevención de la causa más frecuente de fallas y colapsos de los puentes.

Características de la instalación.

Consiste de un canal de 8m de largo, pendiente nula, 60cm de ancho y 80cm de altura, construido con estructura metálica y paredes de cristal y acrílico de 25mm de espesor. La alimentación es desde la red de agua del laboratorio de hidráulica a través de un tubo de 20cm de diámetro, controlado por una válvula de compuerta. El flujo es medido a en un canal de aforo de un metro de ancho con un vertedor con contracciones laterales de 10cm y cresta de 80cm de largo.

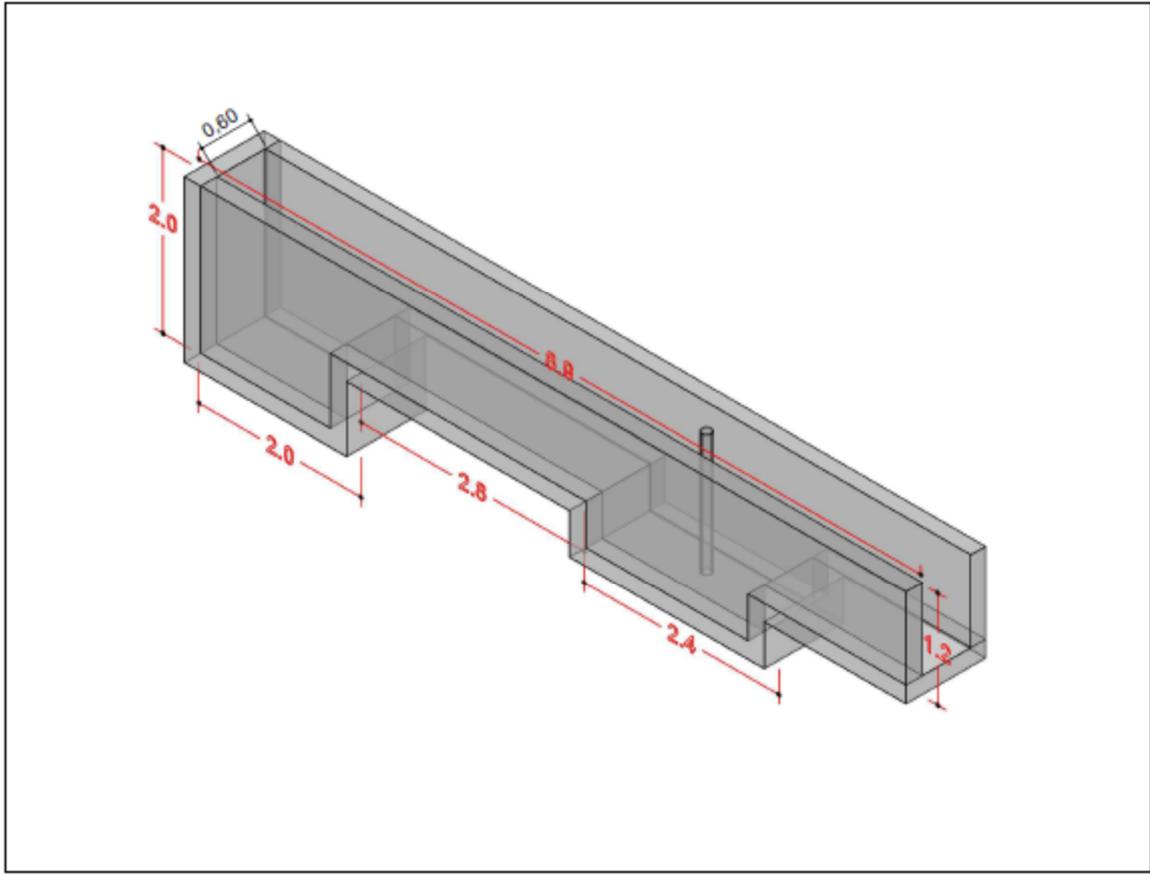


Ilustración 6. Esquema del canal de pruebas para socavación en pilas.



Fotografía. 1. Vista del modelo físico



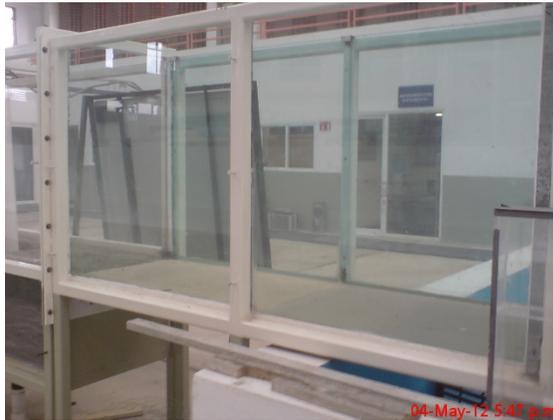
Fotografía. 2. Canal de prueba de 60 cm de ancho por 8 metros de largo.



Fotografía. 3. Tramo aguas arriba. Tanque de alimentación y canal de acondicionamiento del flujo



Fotografía. 4. Tramo de pruebas (intermedio). Depósito de arena para prueba de socavación de la pila



Fotografía. 5. Tramo aguas abajo. canal de acondicionamiento del flujo a la salida



Fotografía. 6. Válvula de control de y conducto de alimentación del flujo



Fotografía. 7. Compuerta de control de tirante al final del canal.



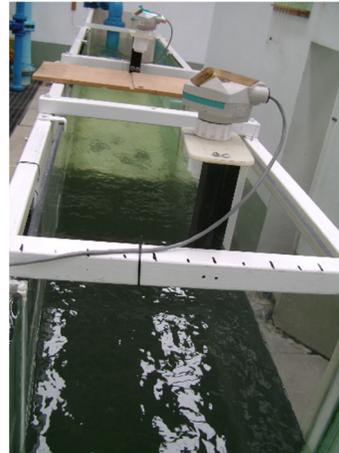
Fotografía. 8. Canal y vertedor de aforo tipo contracción lateral de 80cm de longitud vertedor.

Instrumentación.

Con la finalidad de medir las características hidráulicas del flujo y de la superficie modificada por el efecto de la socavación, el modelo se instrumentó con un medidor de flujo ultrasónico marca FlowTracker para medir las velocidades del flujo e integrar los gastos, dos medidores de nivel ultrasónicos Siemens, la medición de la morfología del fondo se realizó con un scanner tipo Lidar con el cual se pudieron capturar hasta 26 millones de puntos en un área de 60cm por 120cm.



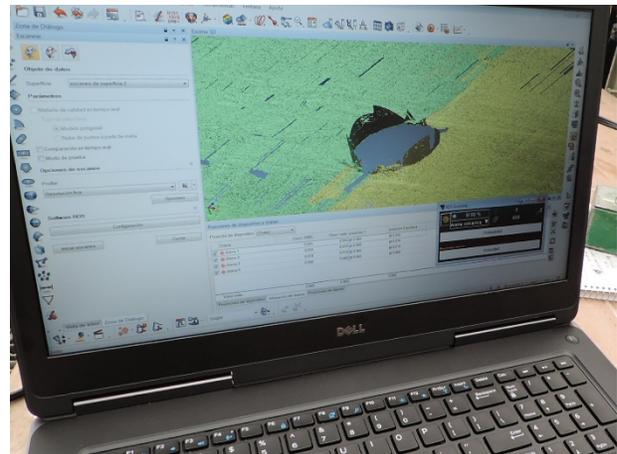
Fotografía. 9. Medidor de flujo FlowTracker .



Fotografía. 10. Canal y vertedor de aforo tipo Rehbock



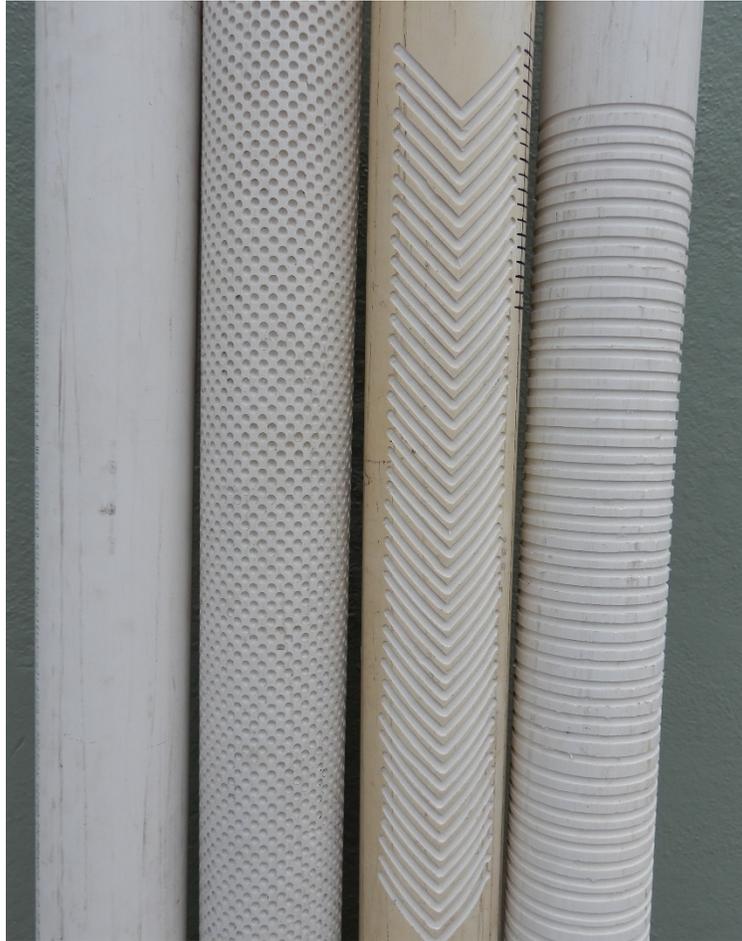
Fotografía. 11. Levantamiento del fondo de arena modificado por la socavación con un scanner tipo lidar



Fotografía. 12. Pantalla de captura de la superficie de escaneo.

Parámetros para las pilas y material del fondo.

Se emplearon pilas de forma cilíndrica circular lisa y con rugosidad artificial. La pila cilíndrica modelo (P1) fue representada por tramos de tubería de PVC de 10 cm de diámetro. La fotografía 13 muestra los tipos de rugosidad probados.



Fotografía. 13. Tipos de rugosidad empleados en las pilas

El tipo de rugosidad construida artificialmente en la pila rugosa (P2) consistió en perforaciones de 6mm de diámetro por 3mm de profundidad a una distancia de 12mm realizadas en tresbolillo entre cada línea. La fotografía 14 muestra la colocación de la pila lisa dentro del canal. El tipo de rugosidad construida artificialmente en la pila con rugosidad direccional (P3) consistió en ranuras de 6mm de ancho por 3mm de profundidad a una distancia de 6mm en forma de una "V" ascendente en un ángulo de 45°. La fotografía 15 muestra la disposición de las ranuras y de la pila dentro del canal. La pila con rugosidad (P4), es con ranuras horizontales en forma de canales separados 6mm con profundidad de 3mm.



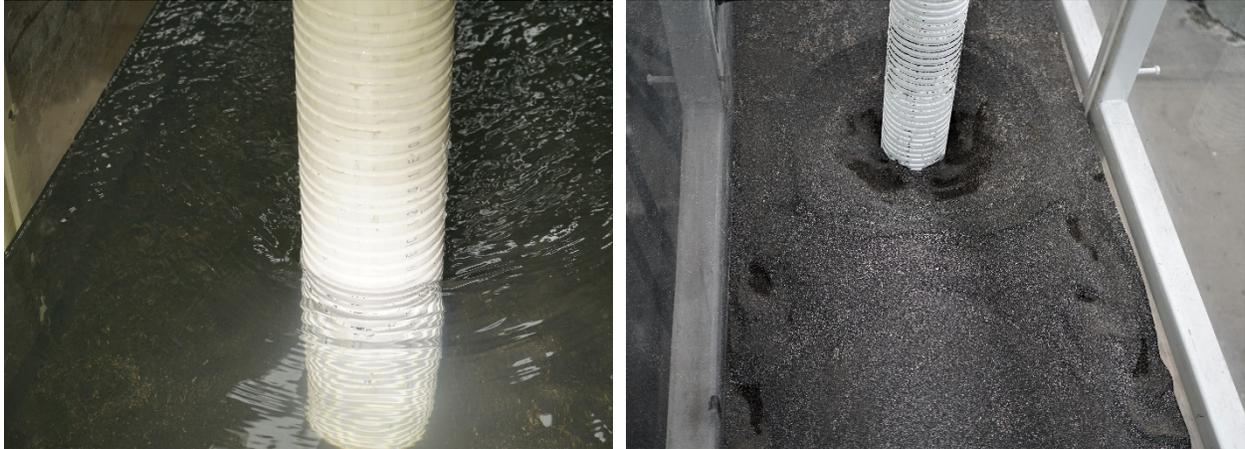
Fotografía. 14. Pila lisa y con rugosidad P1 colocada en el canal de socavación.



Fotografía. 15. Pila con rugosidad direccional, P3, colocada en el canal de socavación en forma recta y rotada 45°

Se utilizó arena volcánica, color negro, de granulometría casi uniforme con un diámetro medio de 0.16mm y peso volumétrico calculado de 2414.47 kg/m³. En fotos tomadas al microscopio se observó que los cantos de los granos de arena son redondeados, por lo que se presenta poco esfuerzo de fricción entre las partículas.

El mismo material fue utilizado en todos los ensayos, con la finalidad de que los resultados fueran comparativos y válidos para determinar la diferencia en cuanto a la profundidad y el volumen de socavación entre pilas lisas y otras con rugosidad artificial.



Fotografía. 16. Pila con rugosidad en anillos concéntricos. P4

Parámetros hidráulicos.

Se propusieron combinaciones de gasto y profundidades con la finalidad de obtener Números de Froude bajos, medio, y altos (este último, simulando las condiciones de avenida, que son las que causan el mayor número de fallas de puentes). Inicialmente se planteó probar cinco valores de Froude, con un máximo del orden de 0.80.

Tabla 1. Programa general de ensayos inicial.

Gasto (l/s)	Tirante (mm)	Apertura de Compuerta (cm)	Carga (mm)	# Froude
60.00	377.0	6.00	119.0	0.138
40.20	270.0	5.00	91.0	0.152
25.45	130.0	4.50	67.0	0.289
45.76	130.0	5.00	99.0	0.519
70.65	130.0	10.00	132.0	0.802

Pruebas preliminares de calibración y ajuste.

Con la finalidad de caracterizar el comportamiento y capacidad del modelo, se realizaron pruebas para definir las relaciones entre gasto y número de vueltas en la válvula de control para la alimentación, además el control de la compuerta al final del canal para obtener las relaciones de gasto, apertura de compuerta y profundidad en el canal. La tabla 2 muestra los resultados obtenidos. Con esta ayuda, se está en posibilidades de establecer las condiciones que se requieren para el desarrollo de las pruebas en forma tal que se reduzca el tiempo inicial para lograr las condiciones deseadas para cada ensayo.

De la misma forma, y con la finalidad de conocer una característica hidráulica del material de socavación, se realizaron pruebas de inicio de movimiento del mismo. Se probaron cinco gastos, desde 21 a 60 litros por segundo. El procedimiento fue iniciar para cada gasto probado, con una profundidad de 70 cm, reduciéndola hasta observar el inicio del movimiento del material. Una vez alcanzadas estas condiciones, se midieron velocidades con el medidor de flujo. Para todos los

casos, la velocidad de inicio de movimiento medida a cinco centímetros por encima del fondo del canal, resultó con un valor de 20cm/s. La tabla 3 muestra los resultados de estas pruebas.

Tabla 2. Ensayos de calibración del modelo. Relación entre gastos, tirantes y aperturas de compuerta

No vueltas Valvula	Gasto (l/s)	Tirante (mm)	Apertura de Compuerta (cm)	Carga (mm)	# Froude	No vueltas Valvula	Gasto (l/s)	Tirante (mm)	Apertura de Compuerta (cm)	Carga (mm)	# Froude	
3 1/8	10.14	95.0	2.00	36.0	0.184	7 3/4	60.37	207.0	8.00	119.0	0.341	
	10.14	263.0	1.00	36.0	0.040		60.37	250.0	7.00	119.0	0.257	
	10.14	529.0	0.50	36.0	0.014		60.37	322.0	6.00	119.0	0.176	
3 1/2	15.03	73.0	3.00	47.0	0.405		60.37	424.0	5.00	119.0	0.116	
	15.03	132.0	2.00	47.0	0.167		60.37	582.0	4.00	119.0	0.072	
	15.03	366.0	1.00	47.0	0.036		60.37	760.0	3.00	119.0	0.048	
	15.03	765.0	0.50	47.0	0.012		65.05	219.0	8.00	125.0	0.338	
4	20.01	96.0	3.50	57.0	0.358		8 1/4	65.05	265.0	7.00	125.0	0.254
	20.01	125.0	3.00	57.0	0.241			65.05	331.0	6.00	125.0	0.182
	20.01	235.0	2.00	57.0	0.093	65.05		433.0	5.00	125.0	0.121	
	20.01	734.0	1.00	57.0	0.017	65.05		634.0	4.50	125.0	0.069	
4 3/8	25.45	120.0	4.50	67.0	0.326	9		70.65	230.0	8.50	132.0	0.341
	25.45	149.0	4.00	67.0	0.235		70.65	274.0	7.50	132.0	0.262	
	25.45	226.0	3.00	67.0	0.126		70.65	338.0	6.50	132.0	0.191	
	25.45	439.0	2.00	67.0	0.047		70.65	434.0	5.50	132.0	0.131	
	25.45	655.0	1.00	67.0	0.026		70.65	584.0	4.50	132.0	0.084	
4 5/8	30.13	129.0	5.00	75.0	0.346		70.65	696.0	4.00	132.0	0.065	
	30.13	180.0	4.00	75.0	0.210		10	75.59	235.0	9.00	138.0	0.353
	30.13	283.0	3.00	75.0	0.106	75.59		291.0	8.00	138.0	0.256	
	30.13	518.0	2.00	75.0	0.043	75.59		343.0	7.00	138.0	0.200	
30.13	776.0	1.50	75.0	0.023	75.59	427.0		6.00	138.0	0.144		
5	35.07	141.0	5.00	83.0	0.352	75.59		582.0	5.00	138.0	0.091	
	35.07	195.0	4.00	83.0	0.217	75.59		683.0	4.50	138.0	0.071	
	35.07	304.0	3.00	83.0	0.111	11		80.64	237.0	10.00	144.0	0.372
	35.07	556.0	2.00	83.0	0.045		80.64	275.0	9.00	144.0	0.298	
35.07	786.0	1.50	83.0	0.027	80.64		330.0	8.00	144.0	0.226		
5 3/8	40.20	164.0	6.00	91.0	0.322		80.64	402.0	7.00	144.0	0.168	
	40.20	188.0	5.50	91.0	0.262		80.64	504.0	6.00	144.0	0.120	
	40.20	222.0	5.00	91.0	0.205		80.64	583.0	5.50	144.0	0.096	
	40.20	258.0	4.50	91.0	0.163		80.64	739.0	5.00	144.0	0.068	
	40.20	311.0	4.00	91.0	0.123	12	85.81	258.0	10.00	150.0	0.348	
	40.20	478.0	3.00	91.0	0.065		85.81	297.0	9.00	150.0	0.282	
40.20	827.0	2.00	91.0	0.028	85.81		352.0	8.00	150.0	0.219		
6	45.76	179.0	6.00	99.0	0.322		85.81	427.0	7.00	150.0	0.164	
	45.76	207.0	5.50	99.0	0.259		85.81	550.0	6.00	150.0	0.112	
	45.76	241.0	5.00	99.0	0.206	85.81	664.0	5.50	150.0	0.084		
	45.76	337.0	4.00	99.0	0.124	12 3/4	90.21	280.0	10.00	155.0	0.324	
	45.76	536.0	3.00	99.0	0.062		90.21	329.0	9.00	155.0	0.254	
6 1/2	50.69	178.0	7.00	106.0	0.359		90.21	387.0	8.00	155.0	0.199	
	50.69	223.0	6.00	106.0	0.256		90.21	476.0	7.00	155.0	0.146	
	50.69	294.0	5.00	106.0	0.169		90.21	612.0	6.00	155.0	0.100	
	50.69	418.0	4.00	106.0	0.100		90.21	476.0	7.00	155.0	0.146	
	50.69	510.0	3.50	106.0	0.074	90.21	612.0	6.00	155.0	0.100		
	50.69	655.0	3.00	106.0	0.051							

Tabla 3. Resultados de las pruebas de inicio de movimiento del material

	Tirante en cm	Apertura Válvula en vueltas	Carga vertedor aforo en mm	Gasto en litros por segundo	Apertura Compuerta en cm		Tirante en cm	Apertura Válvula en vueltas	Carga vertedor aforo en mm	Gasto en litros por segundo	Apertura Compuerta en cm
	21.1cm	4 1/8	60	21.54	3.2cm		30cm	5 1/8	85mm	36.35lts	3.9cm
Sección 1						Sección 1					
Calado Med.	Pos. Dovela					Calado Med.	Pos. Dovela				
	1	2	3	4	5		1	2	3	4	5
5	0.184	0.209	0.186	0.21	0.2	5	0.19	0.211	0.2	0.206	0.196
15	0.194	0.202	0.176	0.19	0.205	15	0.179	0.206	0.194	0.201	0.207
						25	0.214	0.195	0.2	0.196	0.222
Sección 2						Sección 2					
Calado Med.	Pos. Dovela					Calado Med.	Pos. Dovela				
	1	2	3	4	5		1	2	3	4	5
5	0.198	0.197	0.171	0.189	0.202	5	0.191	0.211	0.18	0.186	0.195
15	0.207	0.206	0.202	0.204	0.208	15	0.211	0.215	0.21	0.208	0.211
						25	0.208	0.208	0.216	0.211	0.207
	Tirante en cm	Apertura Válvula en vueltas	Carga vertedor aforo en mm	Gasto en litros por segundo	Apertura Compuerta en cm		Tirante en cm	Apertura Válvula en vueltas	Carga vertedor aforo en mm	Gasto en litros por segundo	Apertura Compuerta en cm
	41cm	5 3/4	97mm	44lts	4.2cm		50.4cm	6 3/4	111mm	54.34 lts	4.5cm
Sección 1						Sección 1					
Calado Med.	Pos. Dovela					Calado Med.	Pos. Dovela				
	1	2	3	4	5		1	2	3	4	5
5	0.179	0.206	0.198	0.2	0.19	5	0.175	0.185	0.182	0.179	0.171
15	0.18	0.184	0.207	0.201	0.19	15	0.186	0.19	0.212	0.196	0.2
25	0.2	0.2	0.182	0.197	0.191	25	0.206	0.198	0.174	0.206	0.184
35	0.206	0.198	0.193	0.198	0.202	35	0.205	0.18	0.194	0.193	0.197
Sección 2						Sección 2					
Calado Med.	Pos. Dovela					Calado Med.	Pos. Dovela				
	1	2	3	4	5		1	2	3	4	5
5	0.167	0.196	0.188	0.203	0.181	5	0.172	0.194	0.174	0.188	0.196
15	0.186	0.203	0.2	0.196	0.18	15	0.188	0.195	0.197	0.18	0.18
25	0.202	0.196	0.196	0.207	0.197	25	0.189	0.208	0.203	0.196	0.194
35	0.207	0.187	0.196	0.201	0.205	35	0.188	0.199	0.206	0.197	0.199
	Tirante en cm	Apertura Válvula en vueltas	Carga vertedor aforo en mm	Gasto en litros por segundo	Apertura Compuerta en cm						
	61.2cm	7 5/8	118mm	59.61lts	4.8cm						
Sección 1											
Calado Med.	Pos. Dovela										
	1	2	3	4	5						
5	0.165	0.172	0.176	0.168	0.125						
15	0.151	0.176	0.155	0.165	0.14						
25	0.18	0.192	0.169	0.169	0.163						
35	0.2	0.17	0.16	0.158	0.17						
45	0.21	0.166	0.177	0.202	0.215						
Sección 2											
Calado Med.	Pos. Dovela										
	1	2	3	4	5						
5	0.151	0.177	0.158	0.165	0.135						
15	0.167	0.175	0.173	0.169	0.16						
25	0.18	0.194	0.171	0.173	0.165						
35	0.204	0.169	0.163	0.16	0.179						
45	0.2	0.169	0.172	0.198	0.199						

En esta prueba se aprecia que el material es arrastrado con demasiada facilidad, por lo que se espera que las pruebas estarán limitadas a Números de Froude bajos o medios.

Ensayos de evaluación

El programa de ensayos original contemplaba realizar cinco pruebas para cada tipo de pila, tabla 1, de tal forma que se cubriera el rango previsto del número de Froude.

Sin embargo, dada la fácil movilidad del material previsto en las pruebas de inicio de movimiento, solo fue posible realizar las pruebas correspondientes a los tres primeros. Para los dos últimos resultó prácticamente imposible controlar la socavación. De aquí que se han realizado cuatro series de tres ensayos cada uno para números de Froude de 0.14, 0.16, 0.28, en total 12 ensayos. Cada serie corresponde al tipo de pila y su disposición en el canal:

- Serie con pila lisa (P1)
- Serie con pila rugosa (P2)
- Serie con pila con rugosidad direccional (P3) y frente recto a la dirección del flujo
- Serie con pila con rugosidad direccional (P3) y frente rotado 45° a la dirección del flujo.
- Serie con pila con rugosidad direccional (P3) aguas arriba y abajo
- Serie con pila con rugosidad direccional (P4) horizontal

Los ensayos se iniciaron desde una condición de flujo muy lento con un tirante alto para evitar socavación en la pila, a partir de esta condición se incrementó el gasto y la apertura de compuerta hasta alcanzar la condición deseada. En todos los ensayos se trató de realizar esta transición con la misma duración, en 3 minutos aproximadamente. Durante la prueba se midieron las profundidades alcanzadas al pie de la pila. Las pruebas se finalizaron hasta alcanzar la máxima profundidad de cada una.

Tabla 4. Programa de ensayos realizados

Descripción general de los ensayos de evaluación.

Fotos con observaciones importantes entre pruebas

Resultados

Los resultados obtenidos se muestran gráficamente en las siguientes ilustraciones:

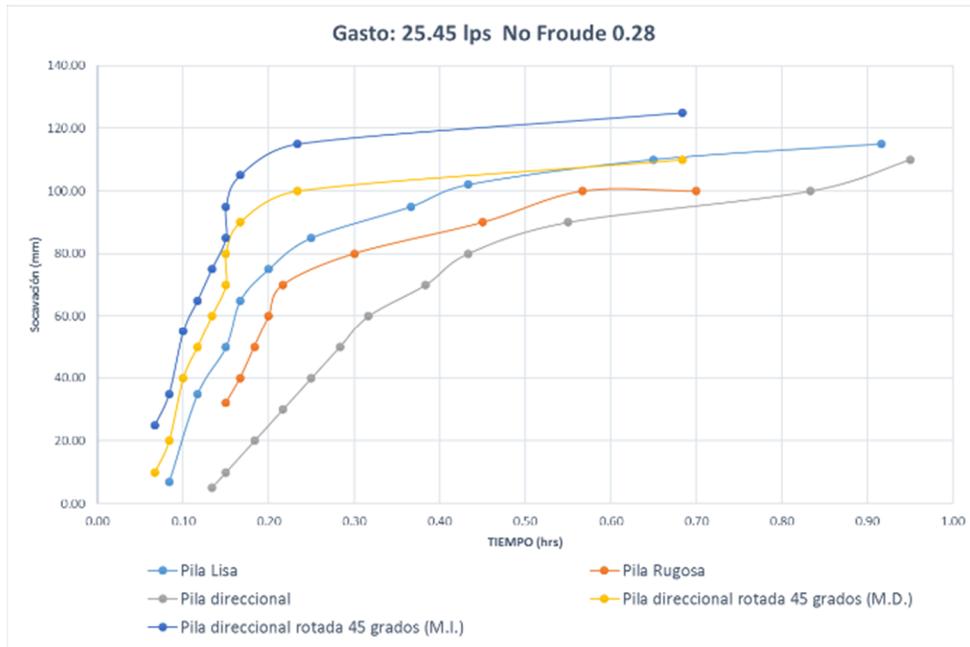


Ilustración 7 Gráfica comparativa de la evolución de la profundidad del pozo de socavación producida entre la pila lisa y las pilas rugosas para un número de Froude de 0.28

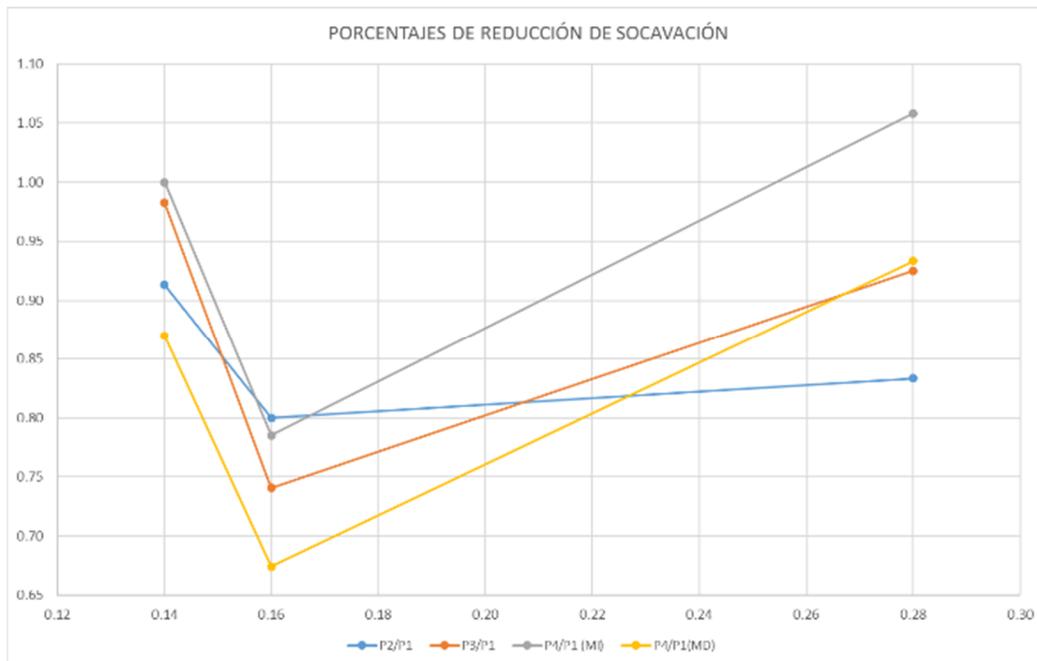


Ilustración 8 Porcentajes de reducción de la profundidad de socavación en relación al número de Froude con respecto a la pila lisa. P1 pila lisa, P2 pila rugosa, P3 pila con rugosidad direccional y P4 pila con rugosidad direccional rotada a 45°.

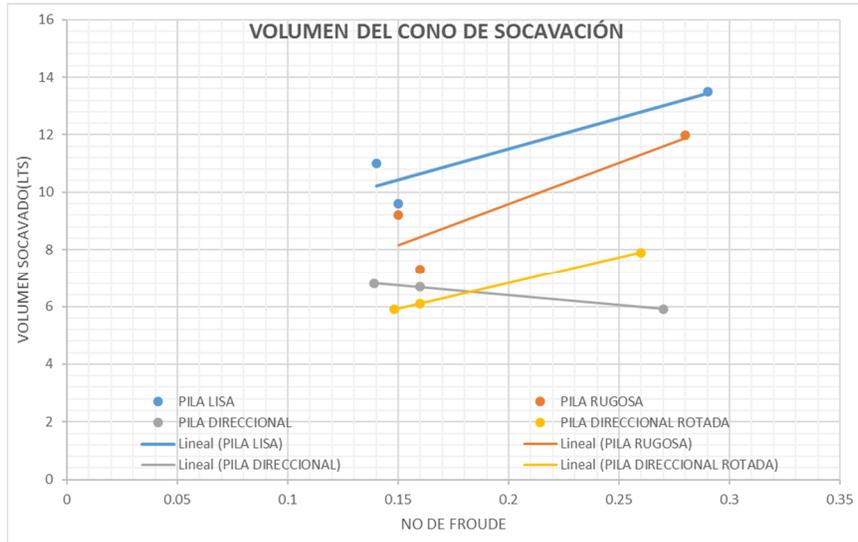


Ilustración 9 Volumen socavado en relación al número de Froude con respecto a la pila lisa. P1 pila lisa, P2 pila rugosa, P3 pila con rugosidad direccional y P4 pila con rugosidad direccional rotada a 45°.

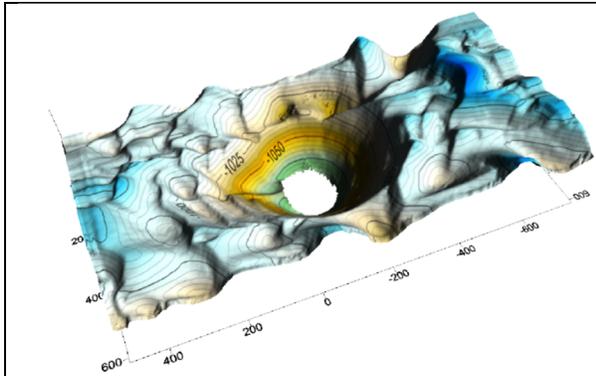


Ilustración 10. PILA LISA. No DE FROUDE: 0.28. SOCAVACIÓN TOTAL: 12 cm. VOLUMEN FOSO SOCAVACIÓN: 13.49 lts.

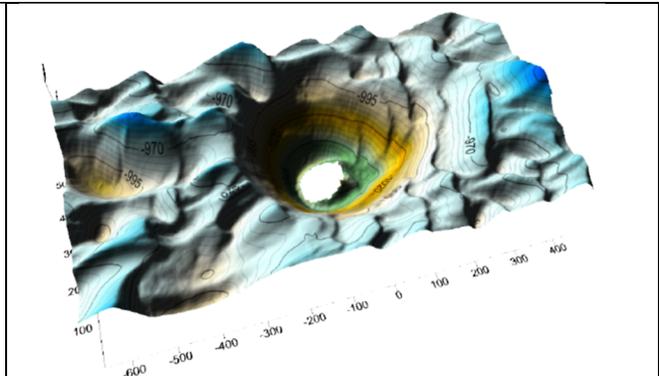


Ilustración 11. PILA RUGOSA. No DE FROUDE: 0.28. SOCAVACIÓN TOTAL: 10 cm. VOLUMEN FOSO SOCAVACIÓN : 11.98 lts.

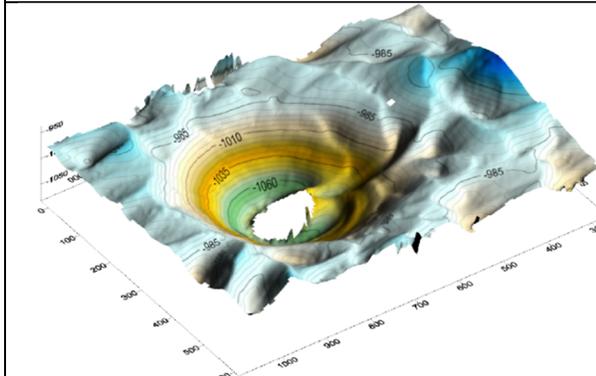


Ilustración 12. PILA CON RUGOSIDAD DIRECCIONAL AGUAS ARRIBA. No DE FROUDE: 0.28. SOCAVACIÓN TOTAL: 11.1 cm. VOLUMEN FOSO SOCAVACIÓN : 7.9 lts.

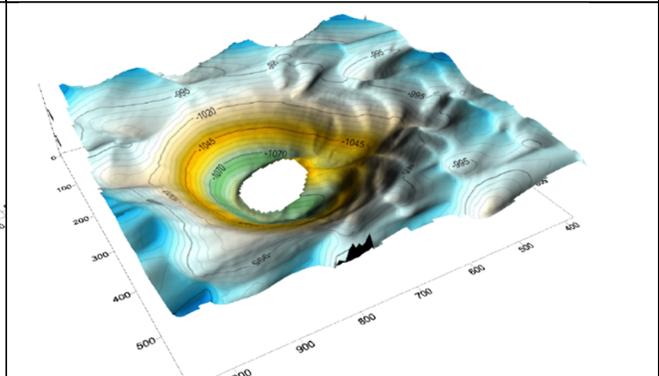


Ilustración 13. PILA CON RUGOSIDAD DIRECCIONAL AGUAS ARRIBA Y ABAJO. No DE FROUDE: 0.28. SOCAVACIÓN TOTAL: 11 cm. VOLUMEN FOSO SOCAVACIÓN : 6lts.

Observaciones y recomendaciones.

Los resultados de este proyecto están dirigidos a ser prácticos, aplicables directamente al diseño hidráulico de la subestructura de los puentes situados sobre corrientes naturales y cuerpos de agua, utilizando un enfoque novedoso, con bases de Mecánica de Fluidos y de ingeniería hidráulica. La aplicación de esta tecnología es, muy probablemente, ventajosa económicamente en comparación con las medidas del estado actual de la técnica, además de que no afectaría a las corrientes naturales ni al medio ribereño.

El desarrollo formal y la maduración de esta tecnología permitirían su aplicación a puentes de nuestro país, estableciendo una primicia técnica en el campo de la construcción de puentes con mayor resistencia y resiliencia con respecto a la socavación.

Las ilustraciones 7 a 13 muestran evidencia de la eficiencia de las tecnologías propuestas contra la socavación, sin embargo, se aprecia que para el número de Froude de 0.16, dicha eficiencia es mayor y consistente para todas las pruebas, lo anterior podría atribuirse al efecto hidrodinámico producido por las paredes del canal. Las fotografías 17 y 18 muestran las morfologías para el número de Froude de 0.14 y 0.28 respectivamente, se puede observar también los límites del alcance de la socavación, en la fotografía 17 se observa que el efecto no alcanza las paredes del canal, en la fotografía 18 se aprecia que el efecto alcanza las paredes del canal. Por lo anterior, con la finalidad de eliminar esta incertidumbre, se concluye que se requiere realizar pruebas en un canal más ancho.

Durante las pruebas se observó que la morfología del fondo producida por la pila lisa tiene mayor alcance y magnitud hacia aguas abajo. Ilustraciones 10 a 13.

Las ilustraciones de la 7 y 8 muestra que la eficiencia en la reducción de la socavación producida por la pila rugosa es mayor al 20% y aumenta con el Número de Froude, además se produce con menor rapidez, lo cual es importante con relación a la duración de la avenida para la realidad.

El proyecto contempló un número muy limitado de alternativas y de ensayos, por lo que los resultados obtenidos hasta ahora no pueden ser todavía integrados a metodologías de cálculo de socavación local (bajo la forma, posiblemente, de parámetros a incluir en las fórmulas más utilizadas, y ayudas –tablas y gráficas, por ejemplo--).

La limitante principal fue la movilidad del material que no permitió probar Números de Froude mayores a 0.28.

Se apreció la influencia de las paredes del canal, ya sea limitando o incrementando el rango de socavación, no se visualiza con precisión su frontera.

Se recomienda ampliamente una continuación de este proyecto, a fin de poder definir con detalle el beneficio de utilizar la tecnología propuesta en una variedad de condiciones de flujo, de características del material y de la estructura; el fenómeno de socavación es muy complejo y constituye un aspecto de la ingeniería de puentes que ha tenido poco avance, comparado con el desarrollo de los aspectos estructurales y constructivos de los mismos.

Adicionalmente, se hace notar que el canal en el que se hicieron los experimentos es muy angosto, con respecto al diámetro de las pilas modelo, por lo que se presentó un marcado efecto de las paredes laterales; esto produce deformación del fenómeno. Es recomendable continuar el

proyecto en un canal bastante más ancho, cuando menos de unas 10 veces el diámetro de la pila y/o 5 veces la profundidad que se espera probar.

Se recomienda de manera especial la construcción de un nuevo canal para continuar la experimentación. Dicho canal también serviría para realizar experimentos relacionados con otras obras hidráulicas, como la socavación al pie de estructuras tales como vertedores.

Se requiere también utilizar un material más denso, con un diámetro medio mayor y más resistencia a la fricción (granos angulosos), de tal forma que permita probar mayores Números de Froude.

Finalmente, se requiere complementar el análisis de los resultados aquí obtenidos, considerando todos los factores involucrados, así como los volúmenes de socavación alcance y depósito del material aguas abajo de la pila.



Fotografía. 17. Morfología típica de la socavación producida por la pila lisa



Fotografía. 18. Morfología típica de la socavación producida por la pila rugosa

Referencias

1. Bonilla G. R. *Nueva tecnología contra socavación local*. Asociación Mexicana de Ingeniería de Vías Terrestres. Vías Terrestres. Número 5. Mayo-Junio 2010.

2. Transportation research board, national cooperative highway research program (NCHRP), NCHRP Synthesis 396, Monitoring Scour Critical Bridges, A Synthesis of Highway Practice, 2009.
3. ONERA, www.onera.fr
4. Hoffmans, G.J.C.M. and H.J. Verheij (1997). *Scour Manual*. A.A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands.
5. Hamill, L., *Bridge Hydraulics*, E & F Spon, London and New York, 1999.
6. Briaud, J. L. (2005). "SRICOS Sheds Light on Bridge Scour Problems". *Texas Transportation Researcher*, Texas Transportation Institute, (Vol. 34, No. 2).
7. *Bridge Scour: It's not Just Water Under the Bridge*, Open House: A Science Odissey, US Geological Survey, 2001 <http://www.usgs.gov/2001openhouse/exhibits/35-bridgescour.html>
8. Romay F. J. L. *Reducción de la socavación al pie de pilas de puentes mediante el uso de rugosidad artificial*. Tesis para obtener el grado de maestría en ciencias. ESIA-IPN. 2002
9. Mendoza S. I. *Estudio experimental de pilas circulares con diferentes superficies rugosas como método de prevención contra socavación local*. Tesis para obtener el grado de maestría en ciencias. ESIA-IPN. 2000