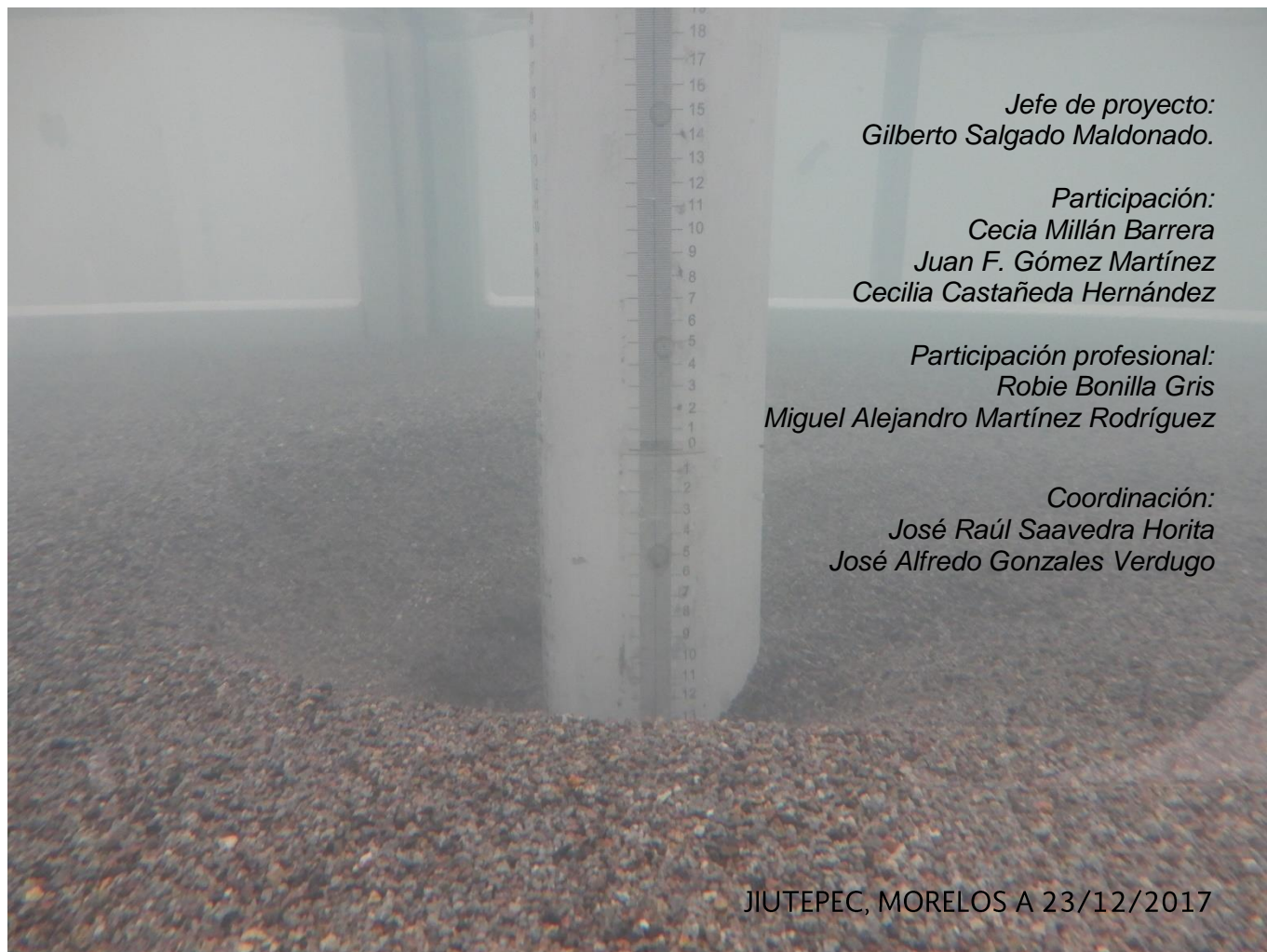


INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA
COORDINACIÓN DE HIDRÁULICA.
SUBCOORDINACIÓN DE OBRAS Y EQUIPOS HIDRÁULICOS

PROYECTO INTERNO IMTA: HC 1713.1.

**DESARROLLO DE TECNOLOGÍA PARA EL DISEÑO CONTRA SOCAVACIÓN EN PILAS Y
ESTRIBOS DE PUENTE MEDIANTE RUGOSIDAD ARTIFICIAL Y DISEÑO HIDRODINÁMICO**
INFORME FINAL



Jefe de proyecto:
Gilberto Salgado Maldonado.

Participación:
Cecia Millán Barrera
Juan F. Gómez Martínez
Cecilia Castañeda Hernández

Participación profesional:
Robie Bonilla Gris
Miguel Alejandro Martínez Rodríguez

Coordinación:
José Raúl Saavedra Horita
José Alfredo Gonzales Verdugo

JIUTEPEC, MORELOS A 23/12/2017

Contenido

Antecedentes.....	1
Justificación	1
Objetivos del estudio.....	1
Bases tecnológicas del proyecto.....	2
Tecnología propuesta.	4
Diseño del modelo y de experimentos	6
Características de la instalación.....	6
Diseño de experimentos.....	8
Instrumentación.	13
Parámetros para las pilas y material del fondo.....	13
Pruebas complementarias	14
Resultados de las pruebas complementarias de evaluación	15
Pruebas preliminares del canal modificado.....	18
Observaciones y recomendaciones.	20
Referencias	21

Antecedentes.

Continuación del proyecto: HC1613.1. Aportaciones a la tecnología actual contra socavación en pilas y estribos de puente y otras estructuras, donde se obtuvieron los siguientes alcances:

Implementación y pruebas de pilas lisas y dos tipos de rugosidad artificial y direccional. Análisis de resultados y determinación de la efectividad de la propuesta. Determinación de la metodología y del efecto de escala del canal utilizado en las pruebas, así como la necesidad de ampliarlo para la continuación de los experimentos.

El presente proyecto se encuentra alineado al Programa Nacional Hídrico con la línea de política pública 4. Reducir la vulnerabilidad ante efectos del cambio climático y las contingencias ambientales, así también con el objetivo 4. Incrementar las capacidades técnicas, científicas y tecnológicas del sector, atendiendo la Estrategia 4.3 Impulsar la investigación científica y el desarrollo tecnológico para el logro de los objetivos del sector:

4.3.1 Fortalecer la investigación y desarrollo tecnológico y vincular a los centros de investigación para atender las prioridades del sector hídrico.

4.3.2 Establecer estrategias de divulgación de ciencia y tecnología en materia hídrica.

4.3.3 Identificar los avances tecnológicos en el ámbito internacional e implementar aquellos aplicables a nuestro país.

4.3.4 Fomentar el desarrollo de líderes para el sector hídrico.

Justificación

La mayor causa de falla de puentes que cruzan una corriente de agua es la socavación al pie de las pilas que lo soportan, conocida como socavación local. Por lo que el diseño de la profundidad de desplante es muy importante. La reducción o mitigación de dicha socavación trae como resultado la disminución del riesgo de falla de los puentes lo cual mantiene las vías de comunicación para las actividades económicas (actividades productivas), sociales (seguridad, salud, etc.), tecnológicas (procedimientos constructivos mas adecuados) y científicas ya que permite el desarrollo de nuevas técnicas.

Objetivos del estudio.

Desarrollar experimentalmente tecnología de diseño para reducir la profundidad y del volumen de socavación local en pilas y estribos de puentes y estructuras similares por medio de dos recursos técnicos; rugosidad artificial especialmente diseñada (no perteneciente todavía al estado de la técnica), y diseño hidrodinámico, aplicado a todos los elementos de la estructura.

1. Incorporar dichos recursos técnicos al conjunto de factores considerados en las fórmulas más utilizadas para el cálculo de la profundidad de socavación local, a través de coeficientes y de 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.

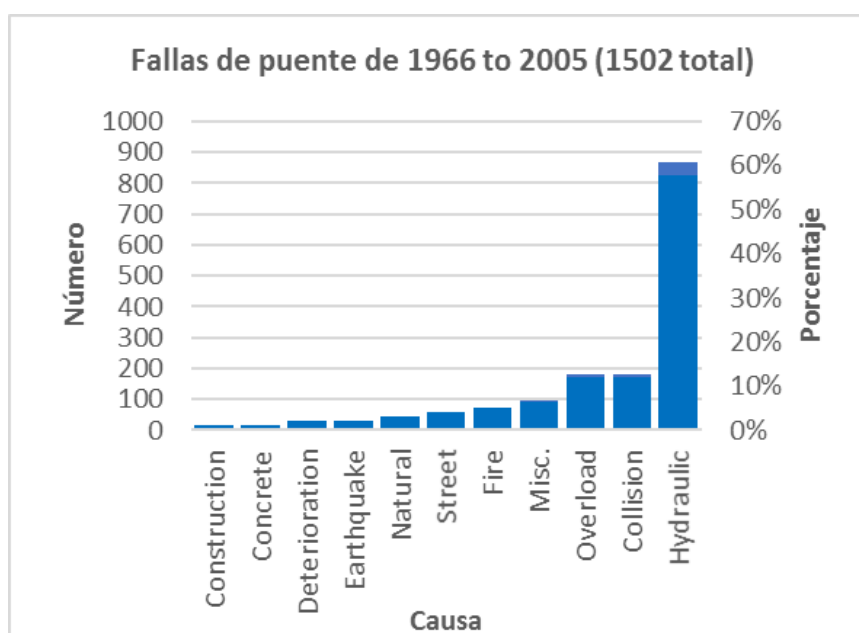


Ilustración 1. Estadísticas de fallas en puentes en EU (1996 -2005) (Ref. 1).

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).

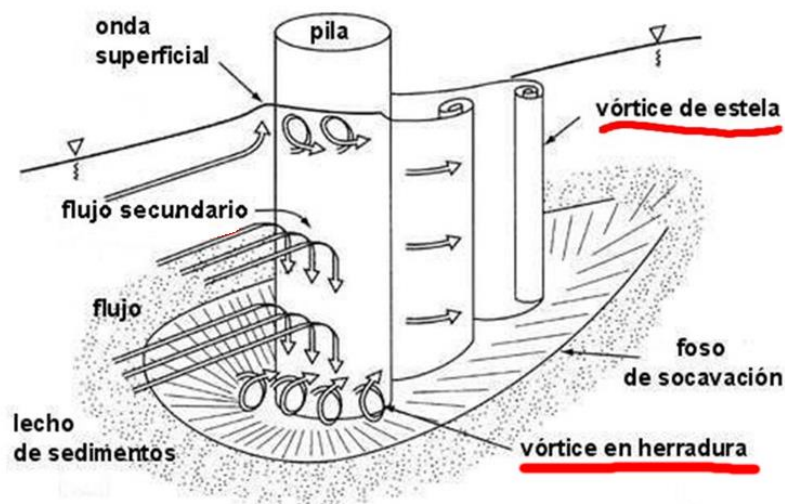


Ilustración 2. Mecanismos de la socavación local (Ref. 2).

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, como 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.

Los materiales socavados 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 para la 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.

La protección contra la socavación de las estructuras sumergidas, tales como las pilas y los estribos de puentes, implica tres tipos principales de medidas: el acorazamiento artificial del lecho de la corriente natural, recurriendo a medidas de protección directa tales como roca colocada en pedraplenes y otras; la rectificación local de la corriente natural, con ayuda de estructuras de encauzamiento, modificando el flujo que incide en el puente, y el reforzamiento estructural de la subestructura.

Desde el punto de vista funcional, las medidas enumeradas intentan, a gran costo y sin mucho éxito, reducir los riesgos de la socavación. Las estadísticas acerca de la vulnerabilidad de los puentes a la acción de dicho fenómeno muestran que la protección obtenida es deficiente y que hay necesidad urgente de desarrollar mejores soluciones:

*“A medida que los Departamentos del Transporte desarrollan Planes de Acción para atender el problema de los efectos de socavación y de inestabilidad de corrientes, **hay necesidad de considerar soluciones innovadoras, efectivas y económicas para el diseño de nuevos puentes y para reparar los existentes.**” (FHWA, 2009)*

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 y poros, 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.

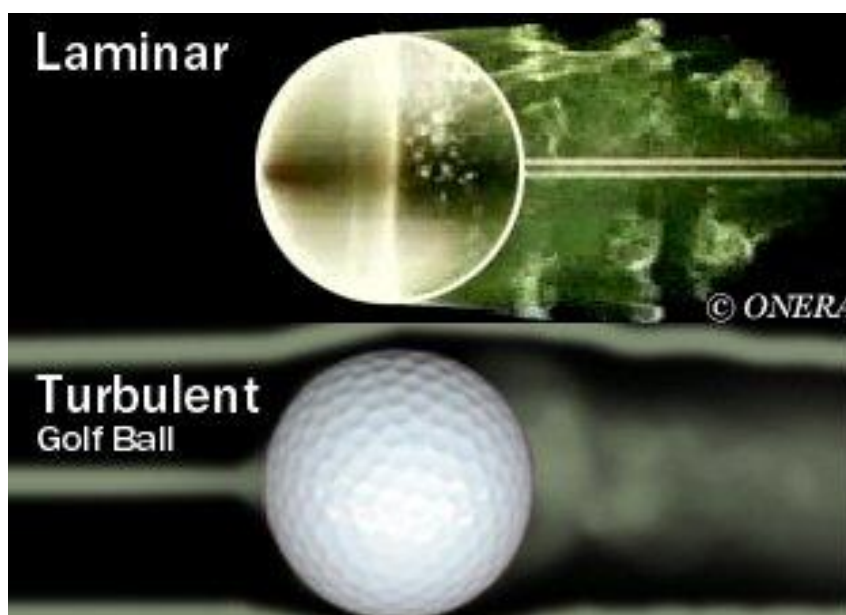


Ilustración 4. En el túnel de viento, una pelota lisa (arriba) y una pelota de golf (abajo) (Ref. 3).

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).

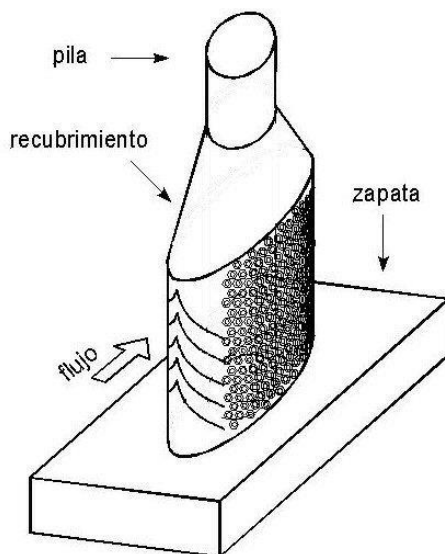


Ilustración 5. El Recubrimiento Antisocavación (US Pat. No. 7628569).

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 enfoque descrito es una vía todavía no explorada de atención y prevención de la causa más frecuente de fallas y colapsos de los puentes, y consiste en reducir la intensidad de los vórtices que causan (causa) la socavación (efecto).*

Diseño del modelo y de experimentos

Características de la instalación.

Como estaba previsto, el proceso de modificación requirió un tiempo considerable. Con la finalidad de dimensionar la modificación del canal, se revisó analíticamente las condiciones del flujo que se requieren para alcanzar números de Froude hasta de 0.80, la tabla 1 muestra el resumen de resultados obtenidos y se anexa el análisis completo.

Tabla 1. Análisis de las condiciones del flujo requeridas para las pruebas. Se subraya en amarillo las pruebas seleccionadas.

B (m)	d (m)	Gasto(lps)	V (m/s)	No Froude	B (m)	d (m)	Gasto(lps)	V (m/s)	No Froude
1.2	0.20	50	0.21	0.15	1.2	0.20	250	1.04	0.74
1.2	0.25	50	0.17	0.11	1.2	0.25	250	0.83	0.53
1.2	0.30	50	0.14	0.08	1.2	0.30	250	0.69	0.40
1.2	0.35	50	0.12	0.06	1.2	0.35	250	0.60	0.32
1.2	0.40	50	0.10	0.05	1.2	0.40	250	0.52	0.26
1.2	0.45	50	0.09	0.04	1.2	0.45	250	0.46	0.22
1.2	0.50	50	0.08	0.04	1.2	0.50	250	0.42	0.19
1.2	0.55	50	0.08	0.03	1.2	0.55	250	0.38	0.16
1.2	0.60	50	0.07	0.03	1.2	0.60	250	0.35	0.14
1.2	0.65	50	0.06	0.03	1.2	0.65	250	0.32	0.13
1.2	0.70	50	0.06	0.02	1.2	0.70	250	0.30	0.11
1.2	0.20	100	0.42	0.30	1.2	0.20	300	1.25	0.89
1.2	0.25	100	0.33	0.21	1.2	0.25	300	1.00	0.64
1.2	0.30	100	0.28	0.16	1.2	0.30	300	0.83	0.49
1.2	0.35	100	0.24	0.13	1.2	0.35	300	0.71	0.39
1.2	0.40	100	0.21	0.11	1.2	0.40	300	0.63	0.32
1.2	0.45	100	0.19	0.09	1.2	0.45	300	0.56	0.26
1.2	0.50	100	0.17	0.08	1.2	0.50	300	0.50	0.23
1.2	0.55	100	0.15	0.07	1.2	0.55	300	0.45	0.20
1.2	0.60	100	0.14	0.06	1.2	0.60	300	0.42	0.17
1.2	0.65	100	0.13	0.05	1.2	0.65	300	0.38	0.15
1.2	0.70	100	0.12	0.05	1.2	0.70	300	0.36	0.14
1.2	0.20	150	0.63	0.45	1.2	0.20	350	1.46	1.04
1.2	0.25	150	0.50	0.32	1.2	0.25	350	1.17	0.74
1.2	0.30	150	0.42	0.24	1.2	0.30	350	0.97	0.57
1.2	0.35	150	0.36	0.19	1.2	0.35	350	0.83	0.45
1.2	0.40	150	0.31	0.16	1.2	0.40	350	0.73	0.37
1.2	0.45	150	0.28	0.13	1.2	0.45	350	0.65	0.31
1.2	0.50	150	0.25	0.11	1.2	0.50	350	0.58	0.26
1.2	0.55	150	0.23	0.10	1.2	0.55	350	0.53	0.23
1.2	0.60	150	0.21	0.09	1.2	0.60	350	0.49	0.20
1.2	0.65	150	0.19	0.08	1.2	0.65	350	0.45	0.18
1.2	0.70	150	0.18	0.07	1.2	0.70	350	0.42	0.16
1.2	0.20	200	0.83	0.59	1.2	0.20	400	1.67	1.19
1.2	0.25	200	0.67	0.43	1.2	0.25	400	1.33	0.85
1.2	0.30	200	0.56	0.32	1.2	0.30	400	1.11	0.65
1.2	0.35	200	0.48	0.26	1.2	0.35	400	0.95	0.51
1.2	0.40	200	0.42	0.21	1.2	0.40	400	0.83	0.42
1.2	0.45	200	0.37	0.18	1.2	0.45	400	0.74	0.35
1.2	0.50	200	0.33	0.15	1.2	0.50	400	0.67	0.30
1.2	0.55	200	0.30	0.13	1.2	0.55	400	0.61	0.26
1.2	0.60	200	0.28	0.11	1.2	0.60	400	0.56	0.23
1.2	0.65	200	0.26	0.10	1.2	0.65	400	0.51	0.20
1.2	0.70	200	0.24	0.09	1.2	0.70	400	0.48	0.18

Diseño de experimentos

En la tabla 2 se muestra la descripción de las pruebas complementarias realizadas en este proyecto.

Tabla 2. Descripción de las pruebas complementarias

Serie	Descripción
6	Pruebas del funcionamiento de la pila P3 con rugosidad direccional en el canal de socavación.
6.1	Ensayos en el canal de socavación con pila direccional para un gasto de 25.45 l/s y un numero de Froude de 0.27
6.2	Ensayos en el canal de socavación con pila direccional para un gasto de 40.2 l/s y un numero de Froude de 0.16
6.3	Ensayos en el canal de socavación con pila direccional para un gasto de 60 l/s y un numero de Froude de 0.14
7	Pruebas del funcionamiento de la pila P4 con rugosidad direccional, rotada 45° en el canal de socavación.
7.1	Ensayos en el canal de socavación con pila direccional, rotada 45° para un gasto de 25.45 l/s y un numero de Froude de 0.27
7.2	Ensayos en el canal de socavación con pila direccional, rotada 45° para un gasto de 40.2 l/s y un numero de Froude de 0.16
7.3	Ensayos en el canal de socavación con pila direccional, rotada 45° para un gasto de 60 l/s y un numero de Froude de 0.14
8	Pruebas del funcionamiento de la pila P5 con rugosidad direccional en ambos lados en el canal de socavación.
8.1	Ensayos en el canal de socavación con pila direccional en ambos lados para un gasto de 25.45 l/s y un numero de Froude de 0.27
8.2	Ensayos en el canal de socavación con pila direccional en ambos lados para un gasto de 40.2 l/s y un numero de Froude de 0.16
8.3	Ensayos en el canal de socavación con pila direccional en ambos lados para un gasto de 60 l/s y un numero de Froude de 0.14

9	Pruebas del funcionamiento de la pila P6 con rugosidad anillada en el canal de socavación.
9.1	Ensayos en el canal de socavación con pila anillada para un gasto de 25.45 l/s y un número de Froude de 0.27
9.2	Ensayos en el canal de socavación con pila anillada para un gasto de 40.2 l/s y un número de Froude de 0.16
9.3	Ensayos en el canal de socavación con pila anillada para un gasto de 60 l/s y un número de Froude de 0.14

Con los resultados se elaboró el plano general de la modificación del canal, se seleccionó la característica del material erosionable, y se inició el procedimiento para contratar la modificación del modelo. Debido a complicaciones en la contratación mediante orden de servicio para la modificación del modelo, fue necesario cambiar el procedimiento a licitación pública, por lo que se reinició dicho procedimiento. Importante mencionar que el procedimiento administrativo depende considerablemente del Órgano Interno de Control, lo que retrasa sistemáticamente los procedimientos de contratación, aunque los motivos sean solo suspicacias.

El canal utilizado en el proyecto anterior (HC1613.1) fue modificado y acondicionado ampliándolo en el ancho y largo con un módulo de experimentación con depósito de arena, obteniendo dimensiones finales de 11.29m de largo, pendiente nula, 120cm 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 dos tomas de 20 y 30 cm de diámetro, controlado por sendas válvulas de compuerta. El flujo es medido a en un canal de aforo, ubicado al final de la instalación, de un metro de ancho con un vertedor con contracciones laterales de 10cm y cresta de 80cm de largo. El material erosionable consiste en arena de la región obtenida por procedimiento de trituración con granulometría uniforme, diámetro medio de 1.5mm.

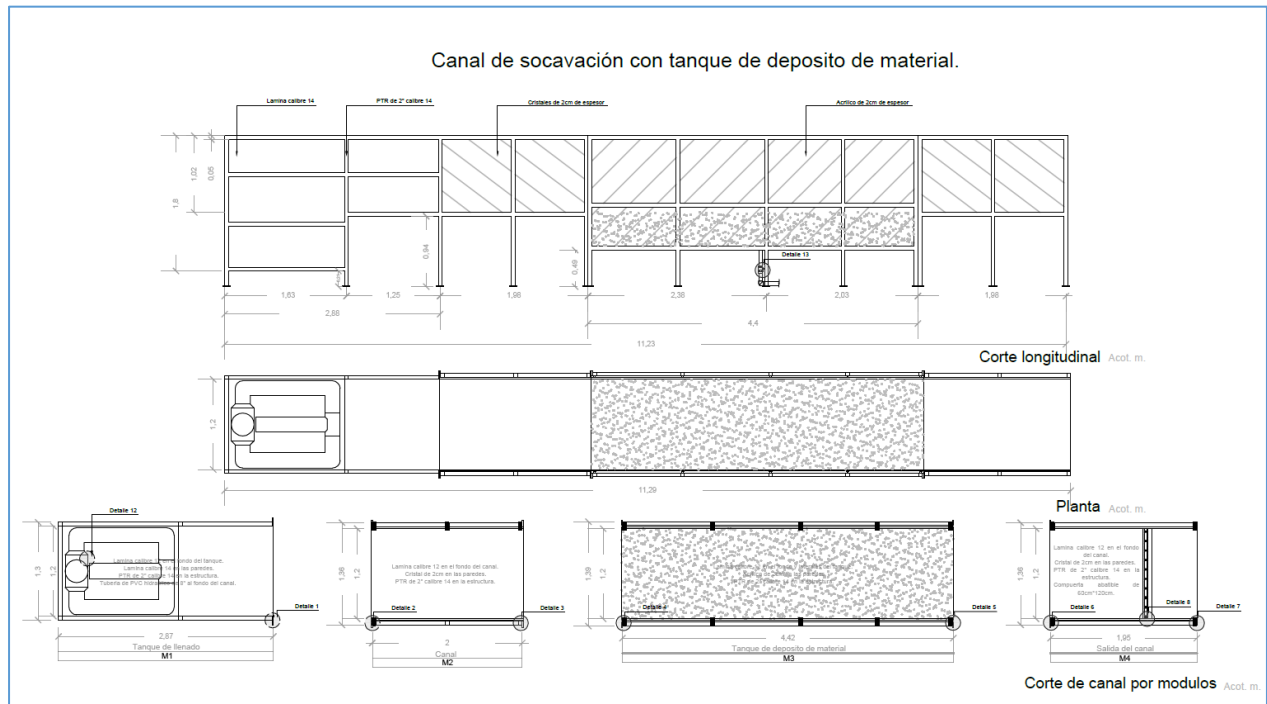
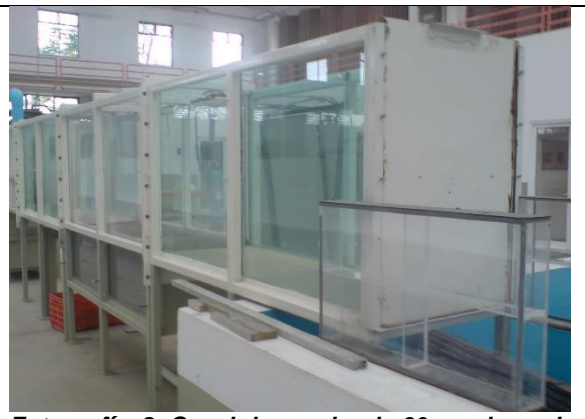


Ilustración 6. Esquema del canal de pruebas para socavación en pilas.



Fotografía. 1. Vista del modelo físico sin modificar



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

Las siguientes fotografías muestran el proceso de modificación y el canal modificado final.



Fotografía. 3. Proceso de modificación del canal. Desarmado del canal original



Fotografía. 4. Proceso de modificación del canal. Rearmado del canal final.



Fotografía. 5. Vista del modelo físico modificado



Fotografía. 6. Canal de prueba modificado de 120 cm de ancho por 11.28 metros de largo.



Fotografía. 7. Tramo aguas arriba. Tanque de alimentación y canal de acondicionamiento del flujo



Fotografía. 8. Tramo de pruebas (intermedio). Depósito de arena para prueba de socavación de la pila



Fotografía. 9. Tramo aguas abajo. Canal de acondicionamiento del flujo a la salida



Fotografía. 10. Válvulas de control y conducto de alimentación del flujo



Fotografía. 11. Compuerta de control basculante para el control del tirante al final del canal de prueba.



Fotografía. 12. Canal y vertedor de aforo tipo contracción lateral de 80cm de longitud vertedor.

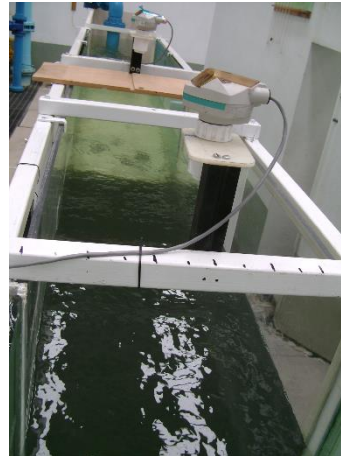
Se anexa el reporte fotográfico del proceso de modificación del modelo físico.

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.



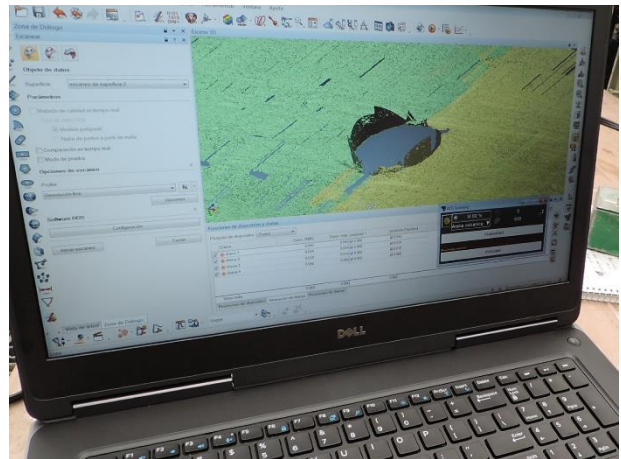
Fotografía. 13. Medidor de flujo FlowTracker .



Fotografía. 14. Canal y vertedor de aforo tipo Rehbock



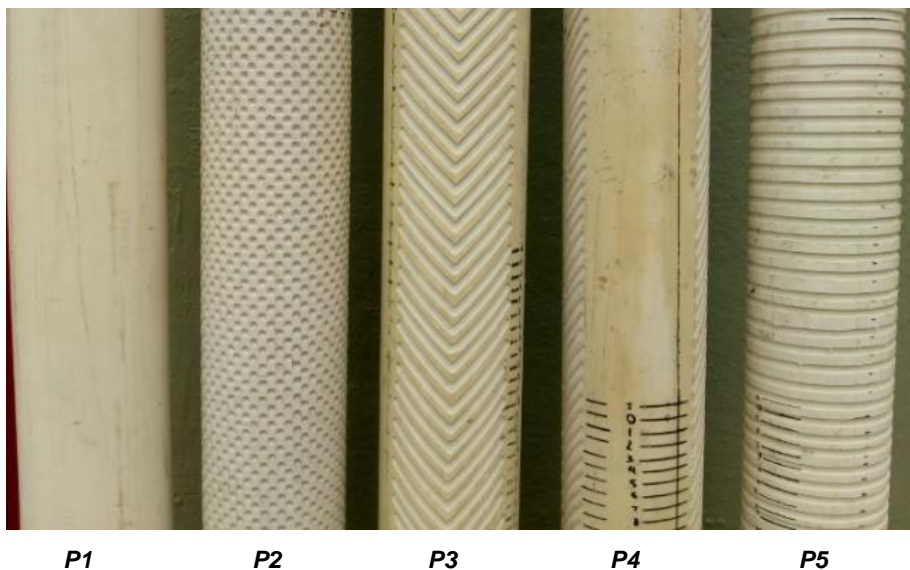
Fotografía. 15. Levantamiento del fondo de arena modificado por la socavación con un scanner tipo lidar



Fotografía. 16. 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 lisa 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. 17. 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. 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°. El tipo de rugosidad construida artificialmente en la pila con rugosidad direccional (P4) consistió en ranuras de 6mm de ancho por 3mm de profundidad a una distancia de 6mm en forma de una “V” ascendente al frente y descendente por atrás, en un ángulo de 45°. La pila con rugosidad (P5), es con ranuras horizontales en forma de canales separados 6mm con profundidad de 3mm.

Pruebas complementarias

Durante el tiempo que se llevó el procedimiento de contratación, se realizaron pruebas complementarias al proyecto HC1613.1, en el canal de 60 cm de ancho, las cuales consistieron en probar la pila con rugosidad direccional P3 rotada 45° a la izquierda, la pila P5 y la pila con rugosidad de anillos horizontales. Prácticamente se continuó considerando los mismos parámetros hidráulicos y el procedimiento de las pruebas de evaluación.



Fotografía. 18. Pila con rugosidad direccional, P3, colocada en el canal de socavación en forma recta y rotada 45° a la derecha



Fotografía. 19. Pila con rugosidad en anillos concéntricos. P5

Resultados de las pruebas complementarias de evaluación

Se realizaron siete series con tres pruebas cada una para números de Froude de 0.14, 0.16 y 0.28, 21 pruebas en total. Cada serie corresponde a cada tipo de pilas y su localización en el canal:

- Serie con pila lisa (P1)
- Serie con pila rugosa (P2)
- Serie con rugosidad direccional (P3) y de frente a la dirección del flujo

- Serie con rugosidad direccional (P3) y frente rotado 45° a la derecha dirección del flujo.
- Serie con rugosidad direccional (P3) y frente rotado 45° a la izquierda dirección del flujo.
- Serie con rugosidad direccional (P4) en forma “V” al frente y “A” abajo, de frente a la dirección del flujo
- Serie con rugosidad direccional (P5) ranuras horizontales alrededor de la pila.

Los resultados obtenidos se muestran gráficamente en forma comparativa a los resultados anteriores en las siguientes ilustraciones:

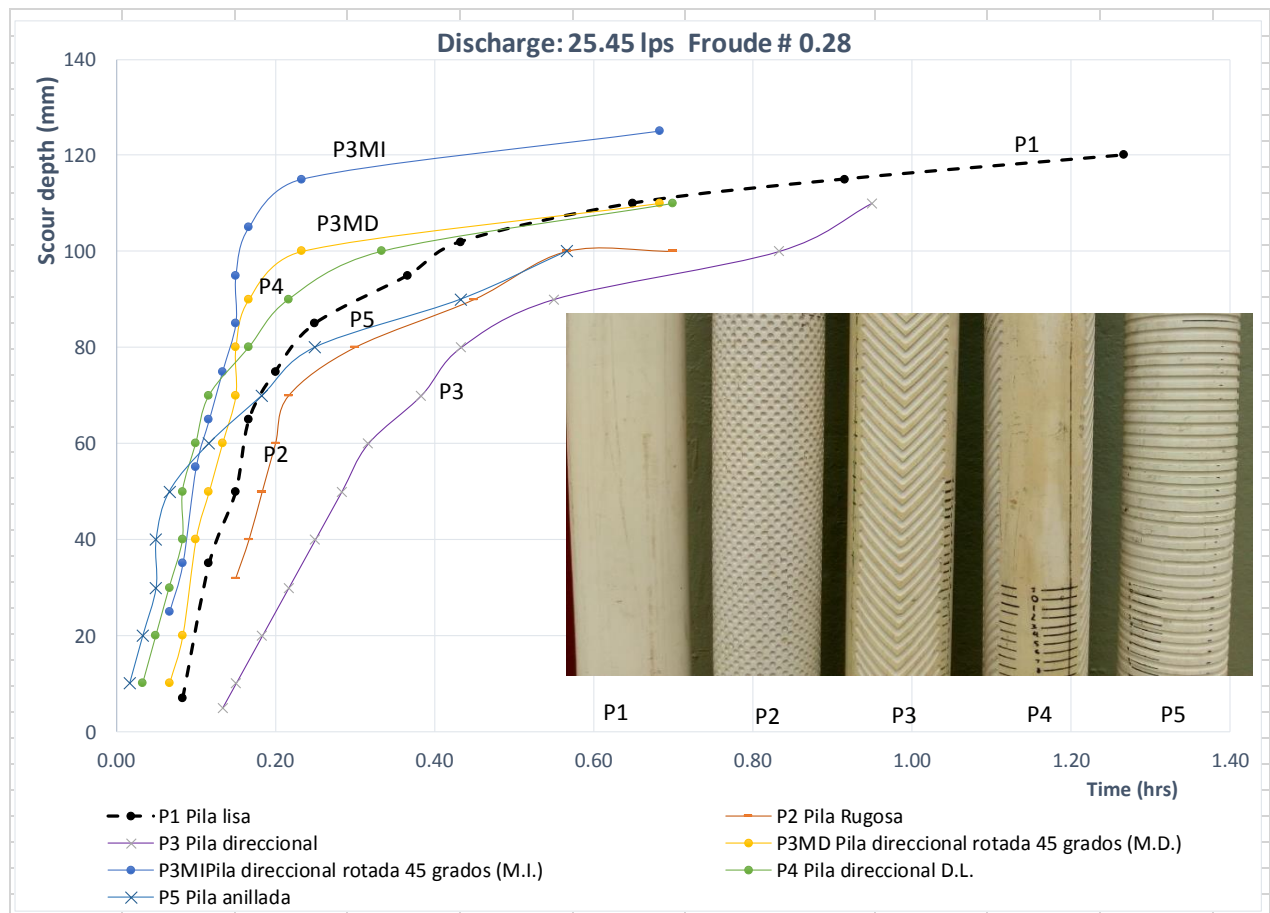


Ilustración 7 Gráfica comparativa de la evolución de la profundidad del pozo de socavación producida entre la pila lisa (P1) y las pilas rugosas para un numero de Froude de 0.28

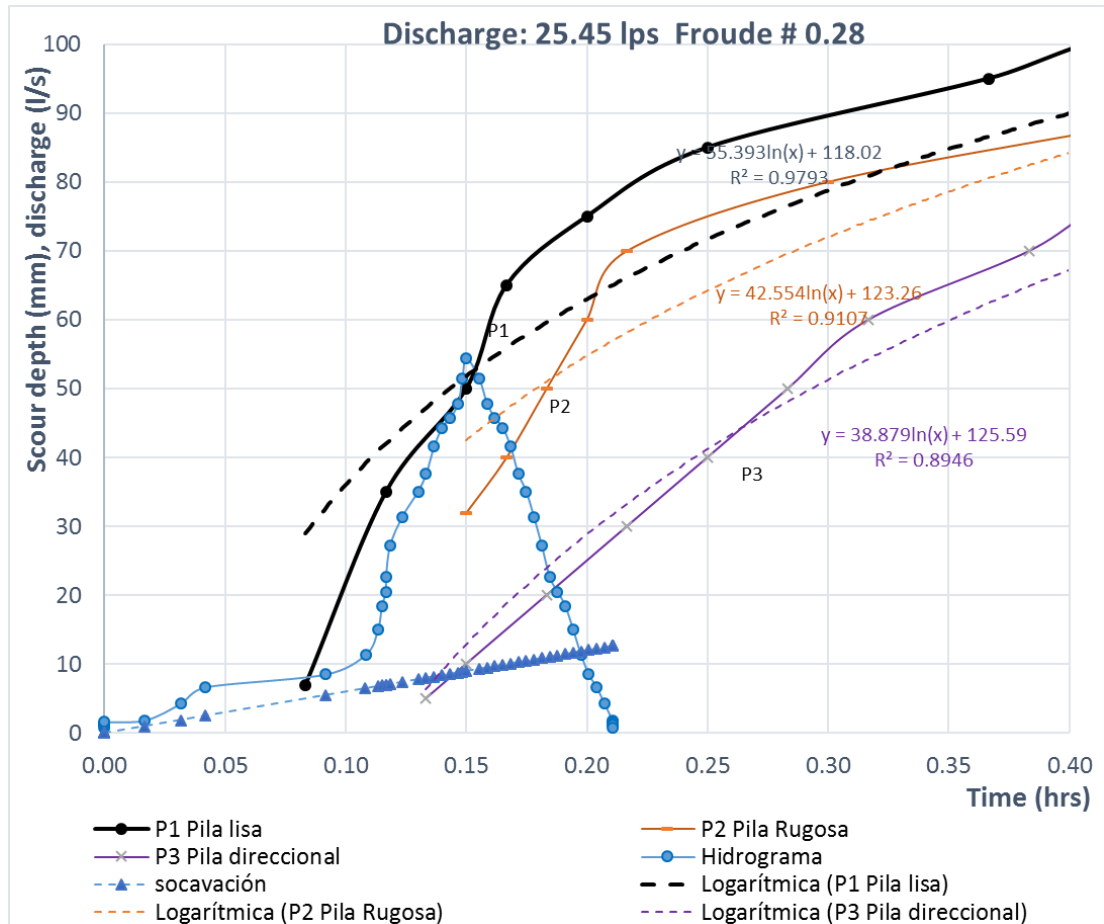


Ilustración 8 Comparación grafica de la evolución de la profundidad de socavación producida por descargas constantes y un hidrograma hipotético para un pico con un valor del número de Froude de 0.28.



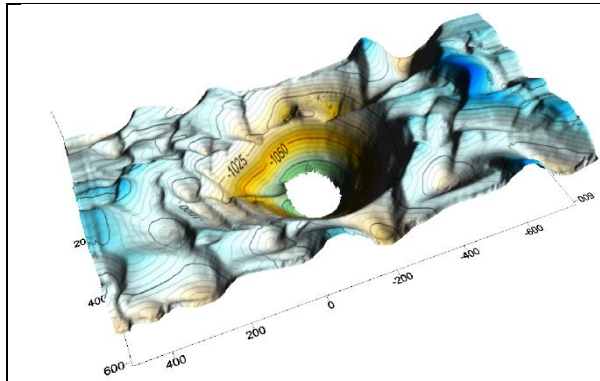


Ilustración 9. PILA LISA. No DE FROUDE: 0.28. SOCAVACIÓN TOTAL: 12 cm. VOLUMEN FOSO SOCAVACIÓN: 13.49 lts.

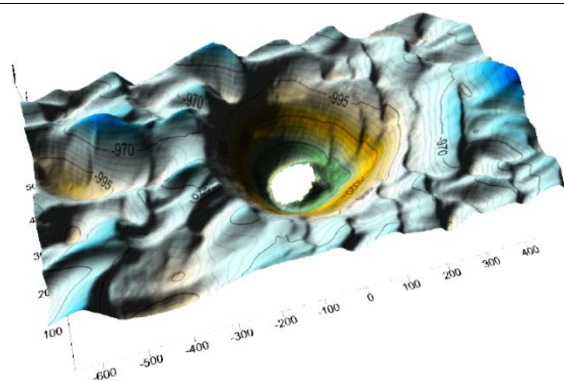


Ilustración 10. PILA RUGOSA. No DE FROUDE: 0.28. SOCAVACIÓN TOTAL: 10 cm. VOLUMEN FOSO SOCAVACIÓN : 11.98 lts.

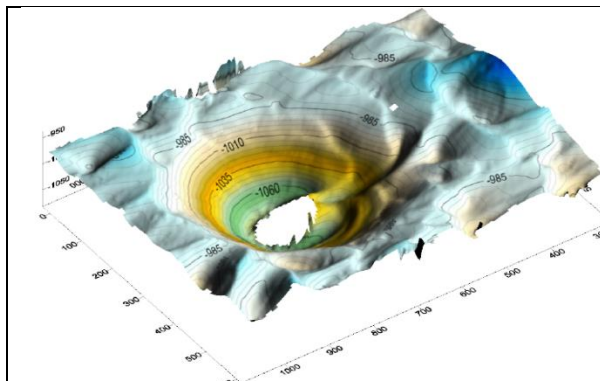


Ilustración 11. PILA CON RUGOSIDAD DIRECCIONAL AGUAS ARRIBA. No DE FROUDE: 0.28. SOCAVACIÓN TOTAL: 11.1 cm. VOLUMEN FOSO SOCAVACIÓN : 7.9 lts.

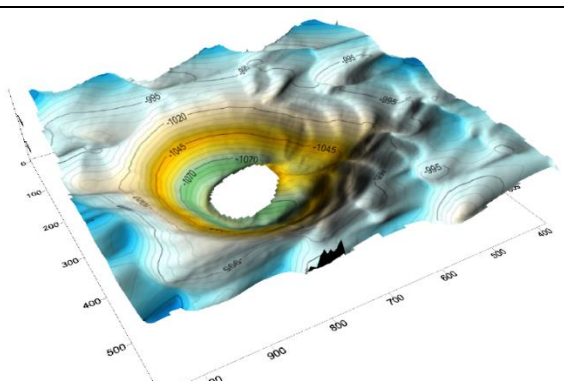


Ilustración 12. PILA CON RUGOSIDAD DIRECCIONAL AGUAS ARRIBA Y ABAJO. No DE FROUDE: 0.28. SOCAVACIÓN TOTAL: 11 cm. VOLUMEN FOSO SOCAVACIÓN : 6lts.

Pruebas preliminares del canal modificado

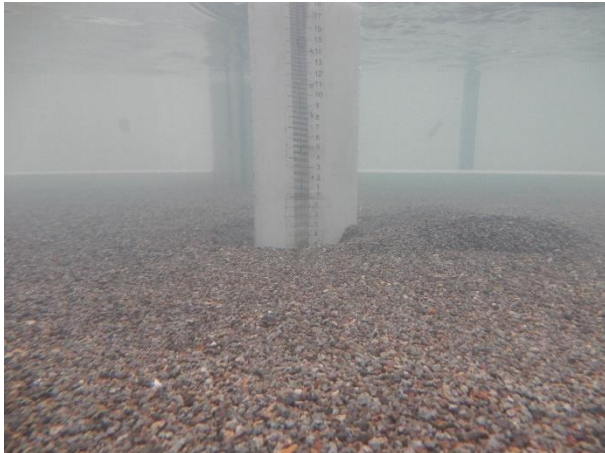
Las pruebas preliminares se iniciaron con la verificación de la estanqueidad y uniformidad del flujo para gastos de 50, 100, 150 y 200 litros por segundo:



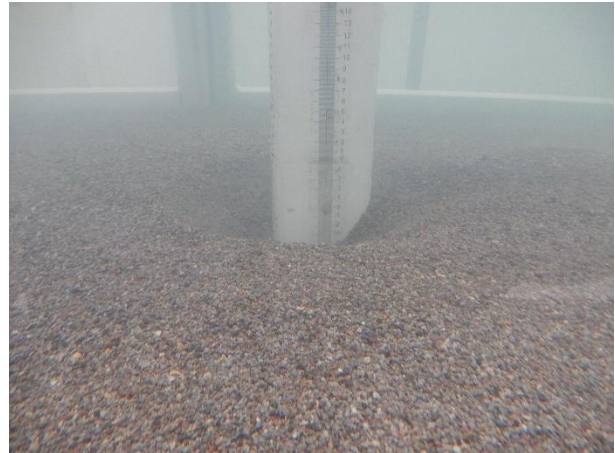
Fotografía. 22. Pila lisa para un gasto de 100 litros por segundo



Fotografía. 23. Pila lisa para un gasto de 150 litros por segundo



Fotografía. 24. Fosa de socavación para Pila lisa para un gasto de 100 litros por segundo



Fotografía. 25. Fosa de socavación para Pila lisa para un gasto de 150 litros por segundo

En general se aprecia un comportamiento uniforme, adecuado al experimento que se tiene programado.

Se observó que la movilidad del material se reduce, sin embargo, el número de Froude máximo alcanzado para lograr una prueba confiable fue de 0.60, por lo que es necesario calibrar los diámetros de la capa superficial erosionable, es decir cribar el material incrementando el diámetro más adecuado para la realización de las pruebas hasta un número de Froude de al menos 0.70.

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 y 8 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 20 y 21 muestran las morfologías para el número de Froude de 0.28 entre pila lisa y rugosa respectivamente donde es evidente la reducción de la socavación con la pila lisa. Se puede observar también los límites del alcance de la socavación, en la fotografía, en la fotografía 20 se aprecia que el efecto alcanza las paredes del canal. Por lo anterior, con la finalidad de eliminar esta incertidumbre, se concluyó que se requiere realizar pruebas en un canal más ancho.

Las ilustraciones 9 a 12 muestra que las pilas con rugosidad direccional provocan los menores volúmenes del foso de socavación, aún y cuando algunos de estos presentan una profundidad mayor. Por lo anterior es importante evaluar cuál de estos parámetros representa mayor riesgo de falla.

Durante las pruebas se observó que la morfología del fondo producida por la pila lisa tiene mayor alcance y magnitud hacia aguas abajo. Ilustraciones 9 a 12.

Las ilustraciones 7 y 8 muestran que la reducción de la profundidad de socavación producida por las pilas rugosa (P2), con rugosidad direccional en "V" (P3) y Rugosidad direccional en anillos (P5) es importante y aumenta con el Número de Froude, además, para P2 y P3 se produce con menor rapidez, lo cual es importante con relación a la duración de la avenida para la realidad.

Con el modelo ampliado y el cambio de material es posible realizar pruebas hasta un número de Froude de 0.60.

Por diversas razones administrativas, no fue posible la contratación de un experto ni la adquisición de software especializado para el análisis del foso de socavación, por lo que solo se ejercieron \$188,831.52 pesos de \$435,000.00 asignados al proyecto.

Dadas las circunstancias, el proyecto contempló un número muy limitado 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--), por lo que no fue posible elaborar un manual de diseño, definido como un entregable del proyecto.

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 Odyssey, 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
10. Vásquez, José, <http://www.pepevasquez.com/bridges.html>
11. El Universal Online, <http://eluniversal.com.mx/>
12. FHWA (U. S. Federal Highway Administration), *Hydraulics Engineering – Photos from the 1998 Scanning Review of European Practice for Bridge Scour and Stream Instability Counter Measures*, 2005.