

## PROPUESTA DE UN MODELO HIDRÁULICO PARA LOS PILARES DEL PUENTE REQUE EMPLEANDO LA SUPERPOSICIÓN DE LOS COMPONENTES DE SOCAVACIÓN

### PROPOSED OF HYDRAULIC MODEL FOR THE PIERS BRIDGE REQUE USING THE SUPERPOSITION THE SCOUR COMPONENTS

Jean Hilmer Vigil Cárdenas<sup>1</sup>  
Alonso Herbht Campos Chávez<sup>2</sup>

#### Resumen

Durante las últimas cuatro décadas, se han realizado numerosos estudios con la finalidad de desarrollar ecuaciones para pronosticar la socavación en pilares de puentes, la mayoría de estas se estiman usando datos del laboratorio y a veces se comprobaron usando datos de campo obtenidos con empirismo. Hasta la fecha los datos utilizados para comprobar las ecuaciones son limitados y hay considerable incertidumbre en el uso de estas ecuaciones para pronosticar la profundidad de socavación total sobre todo en cimentaciones profundas. Para varias de las ecuaciones, las condiciones bajo las cuales se realizaron no han sido divulgadas, además, los rangos para los que son válidos los parámetros que intervienen en las ecuaciones también son generalmente desconocidos y aún cuando el rango de los valores usados en el estudio de laboratorio se conozca es incierto, debido a que estos rangos aplicados en modelos pequeños correspondan con las condiciones del prototipo. Por ello el propósito de la presente investigación es desarrollar un modelo hidráulico a partir del estudio de los pilares complejos del puente Reque para estimar la socavación total bajo el enfoque mencionado. Se entiende como un pilar complejo a la evaluación de un pilar de un puente, su placa de cimentación y el grupo de pilotes en su conjunto. Se realizaron en total ochenta ensayos para los dos pilares del Puente Reque, considerando cuatro distribuciones granulométricas. Se utilizó también una protección de enrocado con el diámetro de  $D_{16} = 1.18$  mm en una longitud de 0.50 m, con un espesor de 3.00 cm aguas arriba y aguas debajo de cada pilar en esto con la finalidad de lograr el desarrollo de la subcapa laminar y evitar que la socavación se genere muy rápido ya que como se sabe, este efecto es un proceso lento y depende mucho del material del fondo y la velocidad del flujo. Cabe indicar también que todos los ensayos fueron realizados en el Laboratorio de Hidráulica de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Universidad Señor de Sipán.

**Palabras claves:** Caudal, Modelo hidráulico, Pilares, Socavación, Puente Reque.

#### Abstrac

During the past four decades, there have been numerous studies for the develop equations for predicting scour at bridge piers, most of these are estimated using laboratory data were checked and sometimes using field data obtained with empirism. To date, the data used to check the equations are limited and there is considerable uncertainty in the use of these equations to predict the depth of scour. For several of the equations, the conditions under which they were created not been further disclosed ranges for which apply the parameters involved in the equations are also generally unknown and even when the range of the values used in the study laboratory is known is uncertain, because these ranges applied in small models correspond to the conditions of

<sup>1</sup> Adscrito a la Escuela Profesional de Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Urbanismo. Egresado. Universidad Señor de Sipán. Provincia de Chiclayo. Región Lambayeque. Perú. [vigilc@crece.uss.edu.pe](mailto:vigilc@crece.uss.edu.pe).

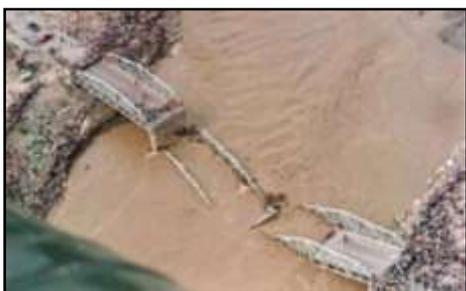
<sup>2</sup> Adscrito a la Escuela Profesional de Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Urbanismo. Egresado. Universidad Señor de Sipán. Provincia de Chiclayo. Región Lambayeque. Perú. [camposch@crece.uss.edu.pe](mailto:camposch@crece.uss.edu.pe).

the prototype. Then the purpose of this research is to develop a hydraulic model based on the study of complex Reque bridge pillars to estimate total scour under the above approach. It is understood as a complex assessment of a pillar of a bridge pillar, the foundation plate and pile group as a whole. Were performed in total eighty trials for the two pillars of the bridge Reque, considering four particle size distributions protection riprap upstream and was also used with the diameter of  $D_{16} = 1.18$  mm over a length of 0.50 m, with a thickness of 3.00 cm under each pillar in this in order to achieve the development of the laminar sublayer and prevent scour is generated very fast because as we know, this effect is a slow process and depends heavily on material from the bottom and the flow velocity . It should also be noted that all tests were conducted in the Hydraulics Laboratory of the Professional School of Civil Engineering of the Señor de Sipán University.

**Keywords:** *Flow, Hydraulic Model, Piers, Scour, Reque Bridge.*

## 1. Introducción

La socavación que se produce en inmediaciones de algunas estructuras hidráulicas puede alcanzar magnitudes considerables que afecten la cimentación y lleven la estructura al colapso, entonces es evidente que el estudio de este fenómeno; que según las estadísticas y experiencias a nivel mundial indican que es el principal factor de falla desde el punto de vista hidráulico por ejemplo en pilares y estribos de puentes; contribuirá a resolver con un mayor grado de seguridad los problemas que se presentan desde la planeación, inclusive también prever los daños que pueda causar a lo largo de su vida útil, pues una infraestructura hidráulica es diseñada para diferentes períodos de retorno.



**Figura 1**

*Colapso del Puente Reque que se produjo por efecto del Fenómeno del Niño en el año 1998.*

**Fuente:** <http://www.caretas.com.pe/1998/1508/puentes/40-1.jpg>.

Sin embargo, el fenómeno denominado socavación es muy complejo, en él intervienen las corrientes del flujo, su interacción con el lecho y el transporte de los sedimentos, es decir el fenómeno en mención se ve influenciado por diversos factores que aún están en estudio o en algunos casos han sido evaluados teóricamente pero muy pocos experimentalmente de los cuales no son en su totalidad absolutamente precisos y/o confiables, pero son de gran utilidad para el diseño, siempre que se tomen en cuenta las condiciones bajo las cuales fueron desarrolladas y la importancia del proyecto en general.

En nuestro país el daño causado en los apoyos de puentes, por las avenidas extremas del Fenómeno del Niño como el de 1998 que causaron en algunos casos el colapso total de las estructuras, trayendo consigo grandes pérdidas económicas para el país, pues además del costo de la estructura ocasionó la interrupción del transporte terrestre en el caso por ejemplo de puentes.

Respecto a lo mencionado en el Perú casi no se han realizado estudios al respecto, caso diferente a nivel de Latinoamérica como en Venezuela, Colombia, Chile, Argentina y México, donde han propuesto varias fórmulas para estimar la socavación local en pilares de puentes, que son válidas dentro de un cierto rango de aplicación y bajo determinadas condiciones, que no

siempre presentan nuestros ríos y por tanto dichas fórmulas no serían aplicables sin considerar las condiciones bajo las cuales fueron elaboradas, lo que lleva a la necesidad de realizar estudios específicos y determinar el rango de validez de las fórmulas más usadas para nuestra zona.

Vista la necesidad de estudiar la socavación en puentes, sobretodo en pilares cimentados con pilotes, es necesario validar en base a las metodologías y formulaciones actuales los resultados que se obtengan con modelos hidráulicos a escala con la principal finalidad de exponer un rango de validez según los resultados experimentales que se consigan en las pruebas de laboratorio tomando como referencia algunos estudios, que a pesar de ser muy pocos, servirán para cumplir el objetivo principal de la presente investigación.

## 2. Materiales y métodos

La principal teoría en la que se basó la presente investigación es la desarrollada por la Hydrologic Engineering Center (HEC) de la Armada de los Estados Unidos pues la socavación calculada para pilares complejos debe incluir el efecto que generan los pilotes, dado que la socavación del fondo del río en el lugar que se implanta el puente es la causa hidráulica más frecuente de falla. A menudo la socavación es invisible porque todo ocurre bajo el agua y por eso podemos ignorar el problema hasta que se manifiesta, pudiendo provocar problemas en su vida útil y por ende el colapso de la estructura.

La modelación se ha desarrollado notablemente en el campo de la hidráulica y existen evidencias de estudios de diseños hidráulicos realizados desde tiempos antiguos, mediante pequeñas representaciones de estructuras y máquinas, por los cuales se ha llegado a enunciar principios fundamentales en la hidráulica; sin embargo hasta hace poco tiempo la experimentación hidráulica se llevaba a cabo habitualmente a escala real ya sea en vertederos, canales, tuberías y presas construidas sobre el terreno y es durante el último medio siglo, cuando se han desarrollado métodos por los cuales, como resultado de experimentos realizados en modelos a escala reducida es posible predecir la conducta de una estructura o prototipo. La socavación que se produce en un río no se calcula exactamente debido a que las fórmulas empleadas en muchos casos difieren de la realidad o en otros casos no incluyen los parámetros necesarios para hallar adecuadamente dicho valor, como los métodos empíricos. Es por eso que muchos autores han propuesto diferentes fórmulas y métodos para encontrar la socavación en puentes, muchos de los métodos empleados incluyen el caudal, el tamaño y conformación del material del cauce, la cantidad de transporte de sólidos, el material que contiene el cauce, la dirección del flujo, etc.

Entonces el objetivo general que se planteó fue proponer y desarrollar un modelo hidráulico para los pilares del puente Reque empleando la superposición de los componentes de socavación. Para ello se evaluó el nivel de aproximación que brindan las diversas formulaciones disponibles para recomendar, de ser el caso, el método que cuente con estimaciones razonables de la socavación para los pilares complejos del puente Reque, luego se seleccionó las ecuaciones de predicción que permitan estimar la profundidad de socavación en pilares lo más exacto posible para un conjunto de condiciones y por último se aplicó los diversos métodos al modelo hidráulico para estimar la socavación de los pilares del puente Reque y en función de los resultados obtenidos se plantearon adecuadas propuestas de solución.

La hipótesis de la investigación fue: “Modelando hidráulicamente los pilares del puente Reque empleando la superposición de los componentes para pilares complejos se determinará adecuadamente la socavación total”

Finalmente para que el modelo en estudio refleje las cualidades del prototipo que se trata de reproducir, es necesario verificar si es efectivamente capaz de reproducirlas o si es necesario efectuar cambios para superar todo aquello que discrepe con la realidad. Estos pasos son esenciales antes de empezar cualquier investigación. La calibración, generalmente, consiste en

adecuar las condiciones y características físicas e hidráulicas, como la rugosidad del lecho, la descarga y los niveles de agua, con las del prototipo.

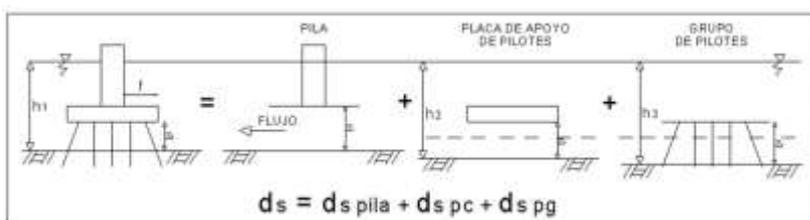


**Figura 2**

*Medición de las características geométricas del pilar para poder comenzar con los ensayos para el modelo hidráulico.*

**Fuente:** Fotografía tomada en el Laboratorio de Hidráulica durante los ensayos.

La metodología planteada por la HEC (Hydrology Engineering Center – Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los Estados Unidos) – HEC 18, nos indica el siguiente procedimiento.



**Figura 3**

*Metodología de la HEC de los Estados Unidos que se aplicará al desarrollo del Modelo Hidráulico para los Pilares del Geometría compleja.*

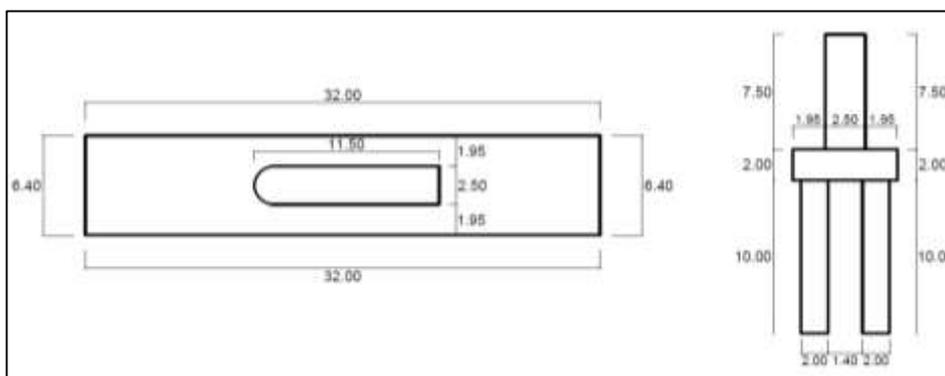
**Fuente:** Elaboración propia

Los materiales y equipos que se emplearon fueron los necesarios que ameritaron la investigación y el adecuado desarrollo de la presente investigación, dichos componentes fueron: los equipos para el estudio de mecánica de suelos, equipos del Laboratorio de Hidráulica, programas como el HEC RAS v.4.0 y el HEC – HMS v 3.5. Se emplearon también los siguientes formatos para el estudio y ensayos de suelos, para la obtención de los datos hidrológicos e hidráulicos, para establecer el rango de los ensayos según las características del modelo, luego también formatos para los datos obtenidos de los parámetros que intervienen en el proceso de socavación en los pilares del puente Reque, luego un formato para ajustes y tiempos para determinar la socavación y otros que se consideren necesarios para el buen desarrollo de la presente investigación.

### 3. Resultados

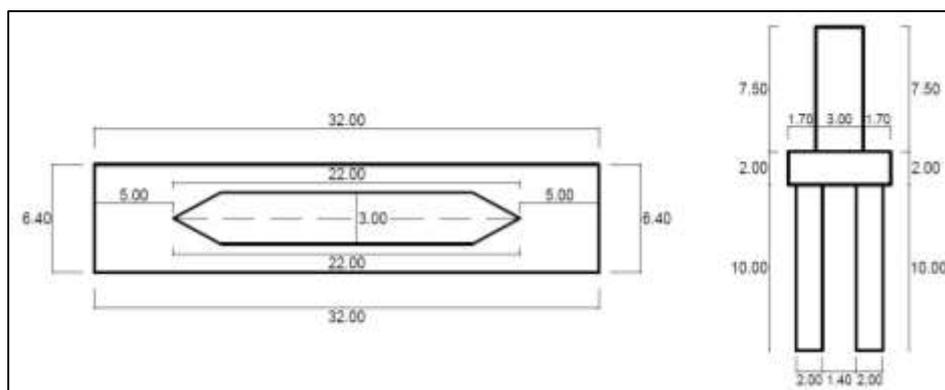
Para los datos adquiridos se tomaron datos para ochenta procesos de socavación, cuarenta ensayos para el pilar antiguo y cuarenta ensayos para el pilar producto de la ampliación empleando las granulometrías de  $D_{20} = 0.85$  mm,  $D_{30} = 0.60$  mm,  $D_{40} = 0.425$  mm y  $D_{60} = 0.25$  mm para simular las condiciones del lecho real en diferentes casos, ya que el diámetro medio en las inmediaciones del puente es de 0.50 mm. Como se mencionó el puente Reque tiene dos pilares, ambos cimentados con pilotes. El primer pilar que denominaremos “Pilar antiguo” es el pilar que fue reforzado cuando se amplió a cincuenta metros más la luz del puente Reque. El segundo pilar que denominaremos “Pilar producto de la ampliación” es el pilar que se construyó también cuando

se amplió el puente. La finalidad según el Ministerio de Transportes y Comunicaciones con la que se amplió el puente en cincuenta metros sobre el acceso izquierdo quedando finalmente una luz de 150 metros en el año 2009, es la de incrementar su capacidad hidráulica a 2000 m<sup>3</sup>/s, para un período de retorno de 500 años, siendo la nueva luz del puente 150.00 m. con dos pilares intermedios descritos anteriormente. A continuación se muestran las características geométricas de los pilares del puente Reque.



**Figura 4**  
*Características geométricas del pilar producto de la ampliación del puente Reque vista en planta y elevación.*

**Fuente:** Elaboración propia.



**Figura 5**  
*Características geométricas del pilar antiguo del puente Reque vista en planta y elevación.*

**Fuente:** Elaboración propia.

La medición de la temperatura del agua se realizó utilizando un termómetro típico que permitió medir dicho valor en grados Celsius (°C), dicho procedimiento se realizó en todas las pruebas. Durante la mayoría de los ensayos se realizaron 03 lecturas de tirantes, estos valores corresponden a la diferencia de la cota del lecho y la cota de la superficie de agua correspondiente al tiempo “t” medido a partir del inicio y desarrollo de cada prueba. Los datos correspondientes a la cota promedio del lecho fueron procesados después de medir la altura en el “Canal Abierto de Sedimentación (CAS)” considerando las formas del fondo del lecho para el tiempo correspondiente, al igual que los datos correspondientes a la cota de la superficie de agua. También se midieron datos de la cota promedio del lecho para un tiempo “t” igual a cero al inicio del ensayo en inmediaciones del pilar de prueba. Cabe resaltar que al iniciar los primeros ensayos o pruebas, el arrastre de sedimentos era tal que erosionaba el lecho y disminuía la cota del fondo aguas arriba, por ende se producía demasiado rápido la socavación, además las velocidades disminuían a medida que se sucedía la degradación del lecho, las formas de fondo en el régimen subcrítico eran más pronunciadas y los tirantes de agua se incrementaban a medida que transcurría el tiempo hasta el final de la prueba, entonces para evitar dicho problema por iniciación de

transporte de sedimentos para cualquiera de los diámetros que se han empleado, se protegió el lecho con un diámetro superior al de los ensayados, que para la presente investigación fue de  $D_{16} = 1.18 \text{ mm}$ .



**Figura 6**

*Vista panorámica del equipo empleado Canal Abierto de Sedimentación y sus respectivos componentes proporcionado por el Laboratorio.*

**Fuente:** Fotografía tomada en el Laboratorio de Hidráulica durante los ensayos.

La medición de caudales se realizó empleando el caudalímetro del mismo Canal Abierto de Sedimentación (CAS), que permite medir caudales desde 600 lts/h hasta 6000 lts/h y también como verificación para obtener dichos caudales se midió en forma directa a partir del ingreso del agua a un depósito por medio de tuberías desde el tanque de almacenamiento impulsado por una bomba (electrobomba) hasta el depósito mencionado, dicho procedimiento permitió calcular el volumen de almacenamiento en el depósito de entrada a un tiempo variable pero medido con un cronómetro, entonces el caudal para este caso se determinó dividiendo el volumen de almacenamiento entre el tiempo que demora en llenarse dicho volumen, obteniéndose casi en todos los casos los mismo valores hasta un error tolerable de  $-2\%$  por debajo y de  $+3\%$  por encima de lo obtenido con el caudalímetro.

Las condiciones iniciales de la forma del lecho y de los valores de las descargas antes de una avenida influyen de modo determinante en cualquier proceso físico y en el caso del proceso de socavación también es de gran importancia. En la naturaleza existen cauces con caudal permanente y otros que cargan estacionalmente o cauces secos. En los cauces con caudal permanente los factores que generan el movimiento del material del lecho, las formas de fondo y la socavación son relativamente constantes y solo si varía el caudal, las formas del fondo del lecho varían. Por otro lado en cauces secos que son cauces en formación y que generalmente tienen fuerte pendiente en las zonas de inundación, el fenómeno de socavación ocurre cuando se presenta un corriente de agua o avenida esporádica y según el tiempo de duración de la avenida se puede producir un desbalance entre el caudal sólido que entra al cauce producto de erosión aguas arriba y el que sale de él. El vórtice de herradura es el que ocasiona la socavación alrededor del pilar, la fuerza de éste vórtice depende de varios factores como el ancho del pilar y la cantidad de movimiento del flujo por unidad de ancho en cercanías del pilar, éste vórtice se encarga de suspender el sedimento y extraerlo de la fosa de erosión en un proceso continuo con intensidad intermitente debido al ingreso, acumulación y salida de los sedimentos en el fondo y a la influencia de las formas del mismo en su desplazamiento. En ausencia de transporte de sedimentos por el fondo del lecho y sin variación en las descargas, el cuenco tiende a alcanzar una profundidad de socavación máxima de equilibrio en el tiempo.

Así, en procesos con transporte de sedimentos proveniente de aguas arriba del lecho, ocurre simultáneamente el proceso de socavación y evacuación del fondo de erosión, es decir la profundidad de socavación no siempre se incrementa, sino también a veces disminuye. Al mismo tiempo, hacia aguas abajo, inmediatamente después de la erosión, en suelos arenosos o no cohesivos, se produce sedimentación del material, cuyas características dependen de la velocidad

del flujo y también de la granulometría del lecho. Experimentalmente se observa, ya sea durante o al final del proceso de socavación, la acumulación de material en forma curva inmediatamente aguas abajo, sin embargo debido a la forma del pilar y la distribución de vórtices alrededor de los pilares tal y como se explicó anteriormente influyen en generar aguas abajo del pilar un resalto hidráulico que varía de acuerdo a la forma del pilar y la interacción de las corrientes del flujo a la salida. En los ensayos realizados en las que las mediciones de las formas del lecho se hacen luego de cortar el ingreso del agua, la forma de secado del caudal influye también en la configuración final de la fosa de erosión.



**Figura 7**

*Vista del proceso de socavación aguas abajo del pilar producto de la ampliación donde se produce un resalto hidráulico del tipo ondulante.*

**Fuente:** Fotografía tomada en el Laboratorio de Hidráulica durante los ensayos.

Las variables que influyen en el proceso de socavación en ambos regímenes, subcrítico y supercrítico, y en la determinación de la profundidad de socavación total empleando la superposición de los componentes de socavación para pilares complejos son las características geométricas del pilar, la longitud ( $l$ ), el ancho ( $b$ ), la forma de la nariz del pilar (forma), las características del agua (caudal) y el flujo (régimen crítico, subcrítico o supercrítico), la densidad del agua ( $\rho$ ), viscosidad cinemática del agua ( $\nu$ ), tirante normal ( $Y_n$ ), velocidad media del flujo ( $V$ ), la aceleración de la gravedad ( $g$ ) y pendiente del cauce ( $S$ ), las características del material del cauce (granulometría), el diámetro representativo del sedimento ( $d_m$ ), densidad del sedimento ( $\rho_s$ ), velocidad crítica para la iniciación del movimiento ( $V_c$ ) y el esfuerzo cortante crítico para la iniciación del movimiento.



**Figura 8**

*Vista en planta de uno de los ensayos ( $d = 0.60$  mm) para determinar la influencia del tamaño del sedimento, las formas de fondo y la pendiente en el modelo hidráulico de los pilares del puente Reque.*

**Fuente:** Fotografía tomada en el Laboratorio de Hidráulica durante los ensayos.

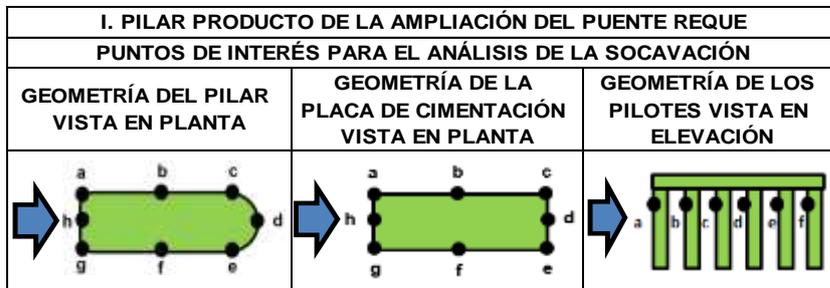


**Figura 9**

En todos los ensayos se midió los tirantes aguas arriba del pilar como también aguas abajo para evaluar cómo influye el tiempo en la socavación.

**Fuente:** Fotografía tomada en el Laboratorio de Hidráulica durante los ensayos.

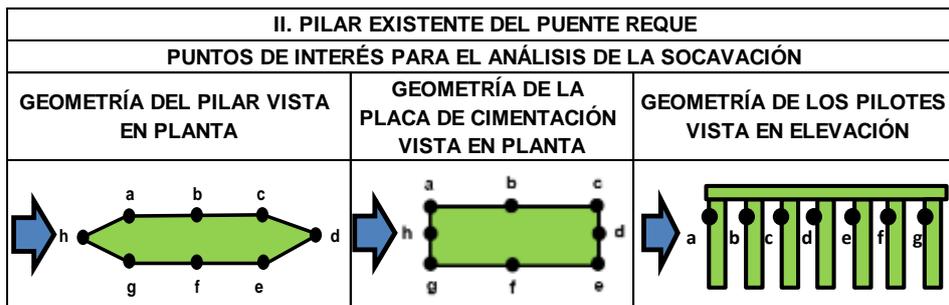
La medición de la profundidad de socavación se efectuó en varios puntos de la sección del pilar, de la placa de cimentación y del grupo de pilotes (pilar complejo), dependiendo del tipo de pilar y las características del flujo. Los puntos de interés en que nos basamos para recolectar los datos para la medición se muestran a continuación. El procedimiento de medición consistió en medir con el limnómetro o interiormente con wincha los niveles alcanzados por la socavación en cada componente, es decir se efectuaron las lecturas correspondientes al poco tiempo de inicio de la prueba, así como, durante el proceso de la misma y al final del ensayo con la muestra seca.



**Figura 10**

Puntos de interés para la medición de la socavación para el pilar producto de la ampliación del puente Reque.

**Fuente:** Elaboración propia.



**Figura 11**

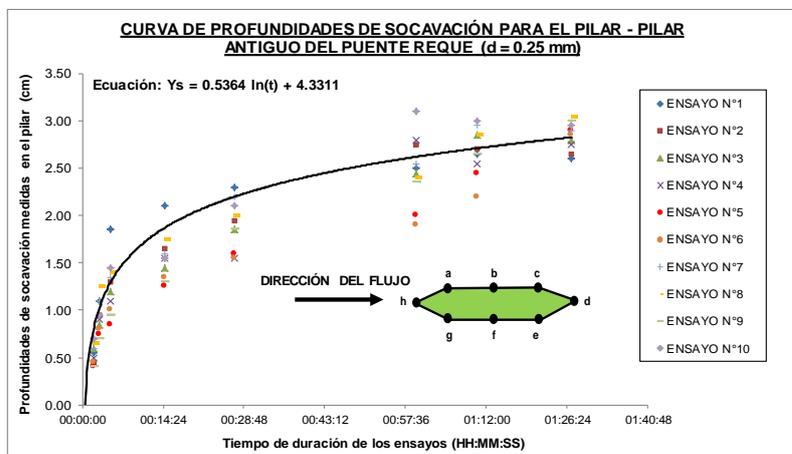
Puntos de interés para la medición de la socavación para el pilar existente del puente Reque.

**Fuente:** Elaboración propia.

**4. Discusión**

En las pruebas que fueron en régimen subcrítico por ser el número de Froude menor de 1.00, se observó que la profundidad máxima de socavación se producía mayormente en la parte frontal del pilar, específicamente en las zonas “ahg” y en algunos casos para “ha”, de la placa de cimentación se produjo en los puntos “ahg” y del grupo de pilotes se dio en las zonas “abc” (ver ilustración 66 para la referencia de la ubicación de los puntos de interés para el análisis de la socavación). Es decir a medida que se incrementaba la velocidad del flujo y por ende el Número

de Froude se logran condiciones de flujo subcrítico de hasta 0.50, además la ubicación de la profundidad máxima de socavación se desplazaba hacia los lados, produciéndose en algunos casos una profundidad máxima de socavación en los puntos “ab” y “gf” para el pilar y la placa de cimentación, para el grupo de pilotes en los puntos “bcd”.



**Figura 12**

Curva del tipo logarítmica del comportamiento en el tiempo de las profundidades de socavación medidas en los primeros 10 ensayos para el pilar en régimen subcrítico.

**Fuente:** Elaboración propia.

En general además de lo descrito anteriormente se observó que existe acumulación de material aguas abajo inmediatamente después de la fondo de erosión, aparentemente debido a que el flujo tiene tendencia a la sinuosidad, la orientación del material acumulado se traslada de un lado a otro y también la socavación a ambos lados del pilar es fluctuante.

Durante las pruebas en régimen subcrítico con granulometría fina se observó la existencia de formas de fondo, en estas pruebas cuando la duna se acercaba al pilar de ensayo ocurría mayor turbulencia y gran movimiento de sedimentos formándose una nube de sedimentos en inmediaciones del pilar y buena parte del material de la duna era arrojado a la fondo de erosión y existía deposición de sedimentos y no se llegaba al máximo de la socavación, mientras que en los instantes en los cuales la duna estaba alejada y el tirante del flujo en inmediaciones del pilar era el máximo se aceleraba el proceso de erosión y se alcanzaban los valores máximos de la profundidad de socavación.

Para los ensayos con granulometría gruesa era más evidente el fenómeno de acorazamiento, es decir los materiales gruesos se depositaban sobre los finos formando lo que comúnmente se llama “coraza de lecho móvil”, además el fondo de erosión donde se encontraba por debajo de la capa acorazada existía movimiento de material más fino y en cuanto al proceso de acorazamiento, tanto en la fondo de erosión como en el lecho del cauce en general, debemos mencionar que éste era intermitente, es decir, existían intervalos de tiempo en los cuales el lecho estaba acorazado y repentinamente esta coraza, constituida por los granos más gruesos, era arrastrada por la corriente y es el instante en el cual se iniciaba un proceso de erosión acelerada hasta que el lecho lograba un nuevo acorazamiento. También cabe indicar que se observó la formación de ondas a ambos lados del pilar complejo tal como se mostraron en ilustraciones anteriores, y se observó que en el material del lecho del cauce se forman surcos que se alinean con el mismo ángulo de las ondas formadas en la superficie del agua.

## 5. Conclusiones

- a) En base a la formulación expuesta se desarrolló un modelo hidráulico para los pilares del puente Reque empleando la superposición de los componentes de socavación, que cumple con la metodología planteada por la HEC (Hydrologic Engineering Center) de los Estados Unidos.
- b) Se evaluó el nivel de aproximación que brindan las diversas formulaciones disponibles y se recomienda el método descrito anteriormente pues cuenta con adecuadas estimaciones razonables de la socavación para los pilares complejos del puente Reque, puesto que los resultados obtenidos con los ensayos y al comprobar con las metodologías expuestas cumplen satisfactoriamente.
- c) Al seleccionar las ecuaciones de predicción que permitieron estimar la profundidad de socavación en ambos pilares complejos las condiciones que se evaluaron se concluyó que las ecuaciones de mejor ajuste para cada pilar son las del tipo logarítmico expuestas anteriormente en las gráficas de la presente investigación.
- d) Al aplicar los diversos métodos al modelo hidráulico propuesto para estimar la socavación de los pilares del puente Reque se concluye que para todo proyecto de gran magnitud como es el caso del Puente Reque debe analizarse además del cálculo teórico, desarrollar también un modelo hidráulico a escala con la finalidad de observar como influyen los diferentes parámetros como el transporte de sedimentos, el ancho y largo de cada uno de los elementos que componen el pilar complejo y la forma del pilar. Aunque la socavación en pilares de puentes en lechos granulares no cohesivos ha sido ampliamente estudiada a nivel mundial, es necesario realizar más investigaciones para ajustar las ecuaciones, tal que nos ayuden a pronosticar mayor seguridad la socavación.
- e) Finalmente se recomienda validar y calibrar las ecuaciones existentes en la bibliografía y las obtenidas experimentalmente en la presente investigación con más datos de mediciones en campo, por lo cual se debería implementar un programa de mediciones de socavación en los pilares de los puentes construidos en nuestro país y también se recomienda realizar ensayos con otras granulometrías para tener mayores rangos de análisis del parámetro de esfuerzo cortante crítico para la iniciación de movimiento.

## 6. Referencias

- Araujo, D. (2013). *Análisis Comparativo de los Métodos por Superposición de los componentes de socavación para pilares complejos aplicados al puente Monsefú - Éten*. Tesis de Pregrado. Universidad Privada Señor de Sipán, Chiclayo, Perú.
- Arriola, G., & Bejarano, L. (2013). Estudio de los Métodos de Análisis Basados en la Superposición de Componentes de Socavación para Pilares Complejos aplicados al Puente Reque. *Tzhoeoen*, 177-198.
- Edibon. (Citado el 25 de Enero de 2013). [www.edibon.com](http://www.edibon.com). Obtenido de [www.edibon.com/products/catalogues.php?lang=es](http://www.edibon.com/products/catalogues.php?lang=es).
- Engineering Center, H. (2012). *Metodología basada en la Superposición de los Componentes de Socavación para Pilares Complejos*. 18ª edición. Estados Unidos: Publications HEC.
- Gomez, L. (2010). *Socavación alrededor de Pilares de Puentes en lechos granulares no cohesivos*. Tesis de Postgrado. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
- Lopardo M. & Seoane C. (2004). *Problemas Causados por el Agua Sobre Estructuras Viales*. 1ª edición. Argentina: Publicaciones Ríos 2004 Ancen.

- López, A., & Arenas, A. (2004). *Análisis de la falla de una de las pilas del puente Naltahua en el Río Maipo, Chile*. 1º edición. Argentina: Publicaciones de Investigaciones del XXI Congreso Latinoamericano de Hidráulica.
- Melville & Coleman, 1. (1990). *Socavación en pilares complejos debido a la acción del agua*. 2º edición. Holanda: Editorial Mc Graw Hill.
- Mugica Ramón, 1. (1984). *Metodología para la zonificación del riesgo de erosión en Cuencas Andinas. Estudio de caso en el río Chalco, Piura*. 1º edición. Piura: Publicaciones de la Universidad de Piura. Tiempo y Forma.
- Olmos, L., Maria, P., & Ibañez Jesus, 2. (2009). *Análisis de la Socavación local en Pilas complejas de un puente sobre el Río Duilce, Santiago del Estero*. Resumen de Investigaciones del 4º Simposio Regional sobre Hidráulica de Rios, 14.
- Ortíz, C. (2012). *Modelo Hidráulico Físico de disipadores de energía como ayuda de aprendizaje de la materia de Hidráulica*. Tesis de pregrado. Universidad de Ecuador, Quito. Ecuador.
- Salinas, N. (2009). *Análisis de la Confiabilidad del Pilar Central del Puente Reque por efectos de Erosión*. Tesis de Postgrado. Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo. Chiclayo. Perú.