

ESTUDIO DE LOS MÉTODOS DE ANÁLISIS BASADOS EN LA SUPERPOSICIÓN DE LOS COMPONENTES DE SOCAVACIÓN PARA PILARES COMPLEJOS APLICADOS AL PUENTE REQUE

STUDY OF METHODS OF ANALYSIS BASED ON
OVERLAY SCOUR COMPONENTS FOR APPLIED TO COMPLEX
BRIDGE PILLARS REQUE

Guillermo Gustavo Arriola Carrasco¹
Luis Miguel Bejarano Trujillo²

Fecha de recepción: 18 marzo 2013

Fecha de aceptación: 28 junio 2013

Resumen

Las oportunidades de interacción y cruce entre nuestras redes viales y ríos son muy frecuentes, siendo los puentes los que ayudan al transporte. Cabe indicar también que los puentes fallan principalmente por problemas hidráulicos según las estadísticas mundiales, sin embargo la necesidad de minimizar estas fallas ha llevado a desarrollar una gran cantidad de investigaciones. Además la aplicabilidad de todas estas investigaciones se resumen en fórmulas y

[1] Adscripto en Consultora Ingenierías, Bachiller; Institución Privada, Chiclayo. Perú. guillermo25_489@hotmail.com

[2] Adscripto en Consultora Ingenierías, Bachiller; Institución Privada, Chachapoyas. Perú. lmbeja_23@gmail.com

metodologías para determinar la socavación total en pilares, quedando un vacío para los proyectistas e ingenieros el criterio correspondiente a que fórmula o metodología emplear. Es por eso que el propósito de la presente investigación es aplicar un análisis comparativo de los métodos basados en la superposición de componentes de socavación para pilares complejos a un caso específico y real como lo es el puente Reque, pues esta estructura al interactuar con el río provoca la obstrucción al flujo produciendo en sus bases de fundación (pilares, placa de fundación y pilotes), un aumento gradual de la socavación y por ende provocar fallas en la estructura.

Palabras claves: Socavación, Caudal, Superposición de componentes, Pilares Complejos, Río Chancay.

Abstract

The opportunities for interaction and cross between our road and river networks The opportunities for interaction and cross between our road and river networks are very common, being the bridges that help transport. It should be noted also that the bridges fail primarily by hydraulic problems as global statistics, however the need to minimize these failures has led to develop a lot of research. Moreover, the applicability of these investigations are abstracted in formulas and methodologies to determine the total scour pillars, leaving a void for designers and engineers the criterion corresponding to formula or methodology used. That's why the purpose of this research is to apply the comparative analysis methods based in the superposition of the components of scour for complex pillars to a specific case and real as the bridge Reque, because this structure to interact with the river causing obstruction to the flow occurring in their foundation bases (columns, plate and pile foundation), a gradual increase scour and thus cause structural failures.

Key words: Scour, Flow, Superposition of components, Complex pillars, Chancay River .

1. Introducción

Las oportunidades de interacción y cruce entre nuestras redes y la red hidrográfica son muy frecuentes, siendo los puentes las obras singulares, costosas y vitales para mantener el transporte. Cabe resaltar también que los puentes fallan por problemas hidraulicos de un 50% a un 60% según las estadísticas mundiales, sin embargo la necesidad de minimizar estas fallas ha llevado a desarrollar una gran cantidad de investigaciones especialmente usando

modelos de laboratorio a escala con el fin de establecer metodologías predictivas para calcular las profundidades de erosión potencial tanto en puentes existentes como en la formulación del proyecto de muchos otros.

Este tema seguirá interesando a toda la comunidad de ingenieros por mucho tiempo hasta que se pueda tener más claridad sobre los mejores y adecuados métodos para evaluar a un puente desde el punto de vista hidráulico, principalmente en la socavación de los pilares, ya que estos elementos estructurales del puente son sometidos a la acción constante del agua durante toda su vida útil, buscando de esta manera establecer una interacción entre el puente que se construye y el río que lo cruza.

La socavación en pilares complejos, es una de las principales causas de fallas de puentes en todo el mundo que aún no han sido analizadas en su totalidad en nuestro país. Además existen numerosas fórmulas para el cálculo de la socavación originada por los pilares de puentes y por los estribos peor aún las que no se han tomado en cuenta para pilares complejos, y siguen apareciendo otras para situaciones particulares, cuyos resultados difieren notablemente de la realidad, tendiendo a sobrestimar la profundidad de socavación en condiciones naturales.

Actualmente en el Puente Reque estos conceptos no han sido aplicados en manera conjunta debido al empleo de criterios conservadores que de una manera u otra no reflejan lo que en un futuro no muy lejano pueda pasar en este puente que es una de las principales arterias de comunicación de nuestra Región Lambayecana.

2. Materiales y métodos

2.1. Hipótesis de la investigación

Luego la hipótesis que se pretendió demostrar a partir de la teoría planteada es la siguiente: "Los métodos de análisis basados en la superposición de los componentes de socavación para pilares complejos más recomendables, que se podrán aplicar al Puente Reque son los de la HEC - 18 de los E.E.U.U., Melville, Sheppard, Coleman y Hancu".

2.2. Variables

Variable única: Análisis de los métodos por superposición de componentes de socavación para pilares complejos.

Indicadores: Caudal del Río, Geometría del Río, Tirante hidráulico, Área hidráulica, Pendiente y Cotas, Distribución del material que componen el cauce, Nivel de socavación.

2.3. Tipo de investigación

El tipo de investigación que se aplicará será del tipo aplicada.

2.4. Estrategia de demostración de la hipótesis

Para analizar las diversas metodologías predictivas en el cálculo de socavación de pilares por el método de superposición de componentes aplicado al puente Reque, se seleccionaran los siguientes:

- Metodología planteada por la HEC de los E.E.U.U.
- Metodología de Melville.
- Metodología de Sheppard.
- Metodología de Coleman.
- Metodología de Hancu.

2.5. Etapas realizadas

A. Recopilación de la Información

Recopilación y Evaluación de la información obtenida referidas a la investigación.

Información topográfica del cauce del Río en la zona de influencia, considerada en el estudio.

Estudio de suelos que se basó principalmente en la distribución de material en los pilares del puente Reque.

Planos del Puente (Puente Reque), en la que se tenga el levantamiento de la estructura existente, con los niveles de la losa, elementos de apoyo, tanto pilares como pilotes.

B. Trabajo de Campo

Se realizaron visitas de campo y recolección de información en la ubicación del puente, caudales de máximas avenidas del río luego la determinación de las características y parámetros hidráulicas del río donde se encuentra el

puente en estudio y por último se determinó los parámetros más importantes del material del cauce sedimentos del cauce.

C. Fase de gabinete

Consiste en el procesamiento, análisis, determinación de los parámetros de estimación de caudales de diseño y valores de socavación máxima en la zona de los pilares. Luego se aplicarán las ecuaciones correspondientes de las diferentes metodologías basadas en la superposición de los componentes de socavación para pilares complejos aplicados al Puente Reque. También se evaluarán los resultados obtenidos y se harán las comparaciones y finalmente se seleccionaran las metodologías recomendables por su mayor aproximación a la realidad.

2.6. Población y muestra

La población y la muestra fue el Puente Reque, al que se le aplicó las diferentes metodologías predictivas para la socavación en los pilares complejos.

2.7. Materiales y equipos

Los materiales y equipos que se han empleado son los siguientes:

- Equipos para el estudio mecánica de suelos.
- Equipos topográficos.
- Programa HEC - RAS v.4.00.
- Programa HEC - HMS v.3.5.
- Programa AUTOCAD 2010.
- Programa MICROSOFT EXCEL 2010.
- Programa MICROSOFT WORD 2010.

3. Resultados

Análisis de la información pluviométrica y distribución de frecuencias

Las fuentes de obtención de los datos de Precipitación, son las estaciones Pluviométricas, constituyéndose esta información en el fundamento principal de todo el análisis pluviométrico realizado, luego los resultados obtenidos están en dependencia de la cantidad de los datos disponibles.

El análisis pluviométrico se desarrolló con datos correspondientes a las Precipitaciones máximas diarias anuales de las siguientes estaciones Pluviométricas:

| Nº ORDEN | ESTACION PLUVIOMETRICA | LATITUD | LONGITUD | ALTITUD (m.s.n.m.) | CUENCA |
|----------|------------------------|---------|-----------|--------------------|----------|
| 1 | LAMBAYEQUE | 6°42' S | 79°55' W | 18.00 | CHANCAY |
| 2 | FERREÑAFE | 6°38' S | 79°47' W | 67.00 | CHANCAY |
| 3 | CHICLAYO | 6°46' S | 79°50' W | 27.00 | CHANCAY |
| 4 | PUCALA | 6°45' S | 79°36' W | 85.00 | CHANCAY |
| 5 | TINAJONES | 6°40' S | 79°29' W | 240.00 | CHANCAY |
| 6 | REQUE | 6°53' S | 79°51' W | 21.00 | CHANCAY |
| 7 | PIMENTEL | 6°50' S | 79° 56' W | 4.00 | CHANCAY |
| 8 | PUCHACA | 6°21' S | 79°28' W | 500.00 | LA LECHE |
| 9 | TOCMOCHE | 6°25' S | 79°22' W | 1250.00 | LE LECHE |
| 10 | LLAMA | 6°30' S | 79° 07' W | 2090.00 | CHANCAY |
| 11 | HUAMBOS | 6°27' S | 78°58' W | 2200.00 | CHANCAY |
| 12 | SANTA CRUZ | 6°37' S | 78°57' W | 2000.00 | CHANCAY |
| 13 | CHANCAY BAÑOS | 6°34' S | 78°52' W | 1600.00 | CHANCAY |
| 14 | CHUGUR | 6°40' S | 78°40' W | 2744.00 | CHANCAY |
| 15 | QUILCATE | 6°49' S | 78°44' W | 3100.00 | CHANCAY |
| 16 | COCHABAMBA | 6°28' S | 78°53' W | 1800.00 | CHANCAY |

Fuente: registro pluviométrico.

El análisis está orientado a encontrar la distribución de frecuencias de valores extremos que más se ajuste a los datos observados para cada estación, obteniéndose los resultados de acuerdo al comportamiento de la serie de datos de cada estación. Este análisis incluye los valores extremos de los años extraordinarios de 1983 y 1998. El registro que se tomó en cuenta para dicho análisis es desde el año 1965 al 2009.

También se consideró como las estaciones índices para completar los datos faltantes de las otras estaciones a las siguientes: Lambayeque, Huambos y Chugur por ser todas las estaciones cercanas unas de otras y por su consistencia de los datos que se han registrado. De acuerdo a los resultados obtenidos, presentamos en los siguientes cuadros comparativos las precipitaciones para los dos métodos analizados, para diferentes años de periodo de retorno:

| ESTACION | DISTRIBUCION DE | | | PERIODOS DE RETORNO | | | | | | |
|---------------|----------------------|-------|-------|---------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | MAYOR AJUSTE | 2 | 5 | 10 | 25 | 50 | 100 | 200 | 500 | 1000 |
| LAMBAYEQUE | Log Pearson Tipo III | 7.13 | 16.59 | 26.41 | 44.16 | 62.15 | 85.09 | 114.64 | 137.30 | 223.29 |
| FERREÑAFE | Log Pearson Tipo III | 7.96 | 21.00 | 37.23 | 71.95 | 113.18 | 173.47 | 260.50 | 280.02 | 347.42 |
| CHICLAYO | Log Pearson Tipo III | 21.16 | 56.45 | 86.32 | 137.09 | 185.81 | 244.98 | 316.50 | 362.08 | 386.20 |
| PUCALA | Gumbel Tipo I | 5.89 | 41.37 | 64.92 | 94.74 | 116.72 | 138.69 | 161.14 | 189.24 | 211.22 |
| TINAJONES | Gumbel Tipo I | 11.63 | 81.77 | 128.33 | 187.30 | 230.75 | 274.19 | 318.58 | 374.13 | 417.58 |
| REQUE | Log Pearson Tipo III | 5.98 | 13.56 | 21.91 | 38.19 | 55.96 | 80.22 | 113.03 | 137.94 | 181.70 |
| PIMENTEL | Log Pearson Tipo III | 33.11 | 72.93 | 111.53 | 177.28 | 240.06 | 316.80 | 409.29 | 492.56 | 509.18 |
| PUCHACA | Log Pearson Tipo III | 35.66 | 72.65 | 101.99 | 143.05 | 175.72 | 209.51 | 244.68 | 306.85 | 324.21 |
| TOCMOCHE | Log Pearson Tipo III | 44.94 | 76.54 | 94.77 | 113.94 | 125.99 | 135.29 | 143.49 | 159.54 | 171.58 |
| LLAMA | Log Pearson Tipo III | 52.15 | 70.71 | 81.16 | 92.58 | 100.01 | 106.64 | 112.63 | 132.68 | 146.76 |
| HUAMBOS | Log Pearson Tipo III | 51.10 | 66.23 | 73.49 | 80.39 | 84.42 | 87.40 | 89.94 | 94.70 | 98.12 |
| SANTA CRUZ | Log Pearson Tipo III | 35.90 | 49.43 | 58.28 | 69.21 | 77.89 | 93.50 | 94.83 | 105.50 | 115.76 |
| CHANCAY BAÑOS | Log Pearson Tipo III | 48.79 | 61.66 | 68.63 | 76.09 | 80.87 | 83.92 | 88.95 | 97.84 | 104.65 |
| CHUGUR | Log Pearson Tipo III | 45.56 | 56.36 | 61.93 | 67.08 | 71.22 | 74.28 | 76.95 | 83.67 | 88.94 |
| QUILCATE | Log Pearson Tipo III | 24.39 | 32.47 | 37.49 | 43.51 | 47.79 | 51.92 | 55.93 | 62.14 | 70.23 |
| COCHABAMBA | Log Pearson Tipo III | 61.82 | 79.15 | 87.15 | 94.59 | 98.69 | 101.83 | 104.34 | 111.38 | 115.14 |

Fuente: registro pluviométrico.

Análisis de la información hidrométrica

Antes de proceder al análisis se debe contar con los caudales máximos diarios mensuales anuales del Río Reque, debido a que no se dispone de registros de aforos de dicho río, por eso se ha recurrido a la información hidrométrica disponible histórica de las Estaciones Carhuaquero – Racarumi (1914 al 2009). Para efectos de la presente investigación se ha utilizado solo los datos registrados en la estación Racarumi que registra las descargas del río Chancay (1966 al 2009). Con los datos de los caudales máximos se ha realizado el análisis estadístico de frecuencias con la finalidad de obtener las descargas para períodos de retorno de 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500, 1000. Estos datos también permitirán calcular los parámetros hidráulicos a definir para la evaluación hidráulica del Puente Reque.

Para determinar los caudales máximos se emplearon los métodos estadísticos y un modelo de simulación hidrológica con el programa HEC – HMS v3.5.

Los métodos estadísticos, se basan en considerar que el caudal máximo anual, es una variable aleatoria que tiene una cierta distribución. Para utilizarlos se requiere tener como datos, el registro de caudales máximos anuales, cuanto mayor sea el tamaño de registro, mayor será también la aproximación del cálculo del caudal de diseño, el cual se calcula para un determinado período de retorno. Por lo general, en los proyectos donde se desea determinar el caudal de diseño, se cuenta con pocos años de registro, por lo que, la curva de distribución de probabilidades de los caudales máximos, se tiene que prolongar en su extremo, si se quiere inferir un caudal con un periodo de retorno mayor al tamaño del registro. En forma práctica, se recomienda escoger varias distribuciones y ver cual se ajusta mejor; esto requiere que se tengan los datos necesarios para poder aplicar alguna prueba estadística, como la prueba de bondad de ajuste.

Se presenta a continuación una tabla con los resultados obtenidos:

| T (años) | NASH | LEBEDIEV | LOG PEARSON III | GUMBEL |
|----------|--------|----------|-----------------|--------|
| 5 | 313.20 | 287.55 | 263.97 | 327.96 |
| 10 | 378.63 | 379.98 | 324.24 | 403.37 |
| 25 | 463.08 | 520.15 | 405.31 | 546.44 |
| 50 | 526.61 | 549.70 | 469.05 | 609.24 |
| 100 | 590.18 | 700.60 | 535.77 | 672.03 |
| 200 | 653.88 | 805.75 | 605.74 | 734.83 |
| 475 | 733.58 | 959.72 | 686.31 | 813.19 |
| 500 | 738.31 | 971.45 | 731.49 | 817.84 |
| 1000 | 802.33 | 1035.77 | 1038.27 | 880.64 |

Fuente: Prueba de bondad de ajuste.

En el gráfico siguiente se puede observar que la distribución que se acerca a la línea de registro es la del Método de Lebediev, por eso se escogerá ese método, cuyos caudales son:

| T (años) | Q (m ³ /s) |
|----------|-----------------------|
| 50 | 549.70 |
| 100 | 700.60 |
| 500 | 971.45 |

Fuente: Resultados del método de Lebediev.

Finalmente considerando un período de 500 años, por el método de Lebediev, el cual sería de 971.45 m³/s. Luego los caudales en el Puente Reque, según el MTC y para los diferentes periodos de retorno son el doble de los obtenidos por el presente estudio (FIAU – USS) para el “Puente Reque”. En el estudio hidrológico del MTC utilizan un registro de aforos comprendidos entre 1914 a 1998, que corresponde a las estaciones de aforo de Carhuaquero – Racarrumi; lo cual no es correcto, debido a que desde 1914 a 1965 los datos pertenecen sólo a la Estación Carhuaquero.

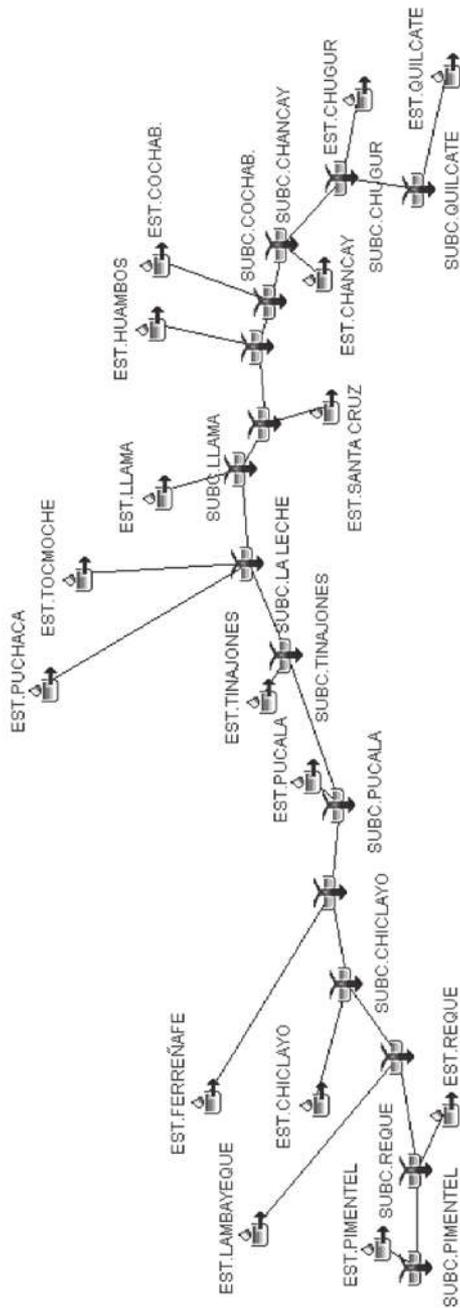
Para el procedimiento de simulación nos basamos principalmente en los aportes que recibe el curso principal (Río Chancay) en zonas altas a más de 2000 m.s.n.m. como Llama, Chugur, Quilcate, Santa Cruz y Huambos, pues las estaciones que se encuentran en estas zonas son las que registran precipitaciones altas, en comparación con las estaciones que se encuentran en menor altitud y muy cerca a las costas del Océano Pacífico, pero que sin embargo en

épocas de máximos eventos como el ocurrido en 1998 (Fenómeno del Niño) aumentaron considerablemente su registro en ese año y de esta manera generó un caudal de 1998 m³/s en las inmediaciones del Puente Reque ocasionando la caída del mismo en ese año.

Entonces al no contar con la información hidrométrica de cada una de las quebradas de aporte a cada subcuenca (es decir que cada una de las 16 estaciones que se emplearon en el presente estudio se tomaron como subcuencas); se procedió entonces a desarrollar un modelo de Precipitación – Escorrentía para la obtención de caudales de avenida en dichas quebradas. Es por eso que el modelo se ha basado en dichas características ya que el programa Hydrologic Modeling System (HMS v.3.50 para Windows) emplea las precipitaciones máximas en 24 horas para generar los caudales en los lugares de interés que se quieran analizar.

A continuación se presentan el desarrollo del esquema hidrográfico simulado con el programa HEC - HMS v. 3.50 (ver imagen), así como el resultado para un periodo de retorno de 50 años en la Estación Reque el cual arroja un caudal de 2075.00 m³/s.

Esquema Hidrográfico de Carhuauquero



Fuente: Programa HEC - HMS.

De los valores mostrados se puede deducir que los caudales obtenidos por métodos estadísticos para los diferentes períodos de retorno obtenidos por la Oficina de Apoyo Tecnológico del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) en el año 2005, con los de la presente investigación, difieren en casi el doble, debido a que los caudales utilizados por ese estudio comprenden el período desde 1914 a 1998 considerando que la Estación Racarrumi viene funcionando desde 1966 y no de 1914 que corresponde a la Estación Carhuaquero ubicada aguas arriba de la Estación Racarrumi, siendo 52 datos de caudales indebidamente tomados para el análisis respectivo.

Con la evaluación del Modelo de Simulación HEC – HMS, realizada en la evaluación hidrológica se obtuvieron caudales de entre tres a cuatro veces mayores según avanza el período de retorno, esta diferencia obedece a la consideración de otros parámetros, como la caracterización hidrológica de la cuenca al nivel de subcuencas, el análisis de precipitaciones máximas y la simulación del modelo indicado en los ítems anteriores.

Luego el caudal de diseño considerado que asumimos es de 2075.00 m³/s, basándonos en el modelo de simulación que emplea el programa HEC –HMS v.3.50, dicho programa emplea el proceso lluvia – escorrentía, que considera el aporte e influencia de las 16 subcuencas en todo el trayecto del Río Chancay hasta la zona de interés (Puente Reque), que a diferencia de los métodos estadísticos que solo consideran los datos hidrométricos de la Estación Racarrumi.

Estudio hidráulico del Puente Reque

Tras la obtención del cálculo de caudales, para los periodos de retorno analizados, se ha procedido a elaborar el modelo hidráulico de simulación del flujo. El resultado de la aplicación de los caudales de cálculo al modelo hidráulico ha sido la determinación de los niveles alcanzados por el flujo y las velocidades del Río Chancay en la zona del Puente Reque, la longitud de análisis es de 1500 m., con un ancho de 600.00 m. La metodología que se ha seguido consiste en la construcción de modelos hidráulicos unidimensionales, en régimen permanente de los cauces. Estos modelos han de recoger adecuadamente las características de su funcionamiento hidráulico adaptadas a la hipótesis de cálculo (unidimensionalmente y en régimen permanente). La modelización se ha realizado utilizando el programa HEC – RAS v.4.00 del U.S. Army Corps of Enginners. Sobre el modelo del cauce actual del Río Chancay en el Puente Reque, se han determinado los niveles alcanzados por la corriente de agua para periodos de 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500, y 1000 años, en las secciones de cálculo y por último se han representado los tramos críticos del río, propensas a desbordamientos,

sedimentación y erosión por estrangulamiento del cauce (zona del puente). El resultado gráfico se presenta en una relación de planos de zonas inundables.

Pendiente del cauce

Se calculó empleando el criterio de Taylor y Schwars, según esta metodología la pendiente promedio del cauce principal se ha estimado en: $S = 0.16345$ m/m.

Geología del área de fundación de la estructura

Se procedió a realizar los ensayos correspondientes en la sección de interés (sección del Puente Reque), para de esta manera validar los resultados obtenidos del estudio realizado por el MTC en el año 2005.

Cálculos hidráulicos

Con los caudales obtenidos por simulación hidrológica mostrado en el correspondiente ítem del Estudio Hidrológico de la presente investigación, para períodos de recurrencia de 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500 y 1000 años, se aplicó el modelo hidráulico de simulación del flujo con el programa HEC – RAS v.4.00. El HEC – RAS (Hydrologic Engineering Center – River Analysis System, traducido al español Centro de Ingeniería Hidrológica – Sistema de Análisis de Ríos), es una aplicación que permite la modelación hidráulica en régimen permanente y no permanente de cauces abiertos, ríos y canales artificiales, desarrollada por el Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los E.E.U.U. (U.S. Army Corps of Enginners).

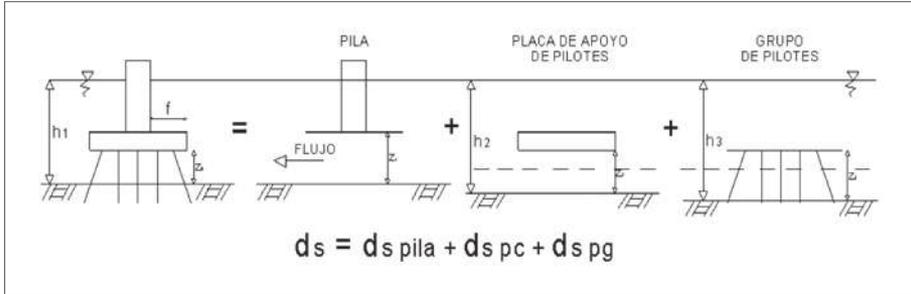
Análisis de los métodos basados en la superposición de los componentes de socavación para pilares complejos

Metodología planteada por la HEC (Hydrologyc Engineering Center – Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros de la Armada de E.E.U.U.)

Los componentes de socavación para pilares complejos se encuentran ilustrados en la figura. La figura se complementa con la definición de variables. Nótese que la placa de cimentación puede encontrarse por encima de la superficie del agua, en la superficie del agua o en el lecho. El grupo de pilotes tal y como se aprecia en el gráfico, es un grupo organizado en filas o columnas. En otros casos, es probable que se requieran sistemas de fundación con configuraciones más complejas. Los métodos que se recomiendan pueden dar

profundidades de socavación mayor o menor, por lo que se requiere del buen juicio del ingeniero.

Placa de Pilotes



Fuente: Metodología HEC (Hydrogyc Engineering Center)

Metodología de Melville

La metodología fue desarrollada en la Universidad de Auckland (Nueva Zelanda) y está basado en curvas envolventes a datos experimentales obtenidos en su mayoría de ensayos de laboratorio. Otros autores consideran que el método propuesto por Melville para estimar profundidades de socavación de equilibrio en pilares es muy aceptable, ya que ilustra sobre la sensibilidad de la socavación ante parámetros como caudal, sedimentos del lecho y condiciones de la pila. A continuación se presenta dicha ecuación propuesta por Melville:

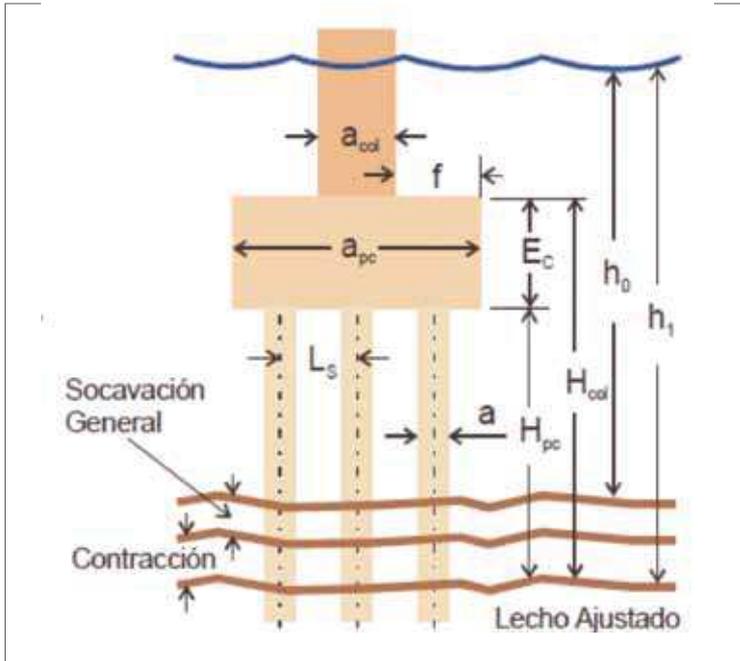
$$ds = a K_i K_h K_D K K_f K_\theta$$

Metodología de Sheppard

A partir de los resultados de las experiencias desarrolladas en la Universidad de Florida y en la FHWA, Sheppard (2003) desarrollo una metodología para predecir la socavación producida por pilas complejas con el formato general que se esquematiza en la siguiente figura:

Finalmente Sheppard propone la siguiente ecuación para la socavación en pilares de puentes, como parte del conjunto de componentes de socavación, luego al igual que el método anterior se les suma la socavación generada por la placa de cimentación y también de los pilotes, determinando de esa manera la socavación total.

Esquema de Socavación



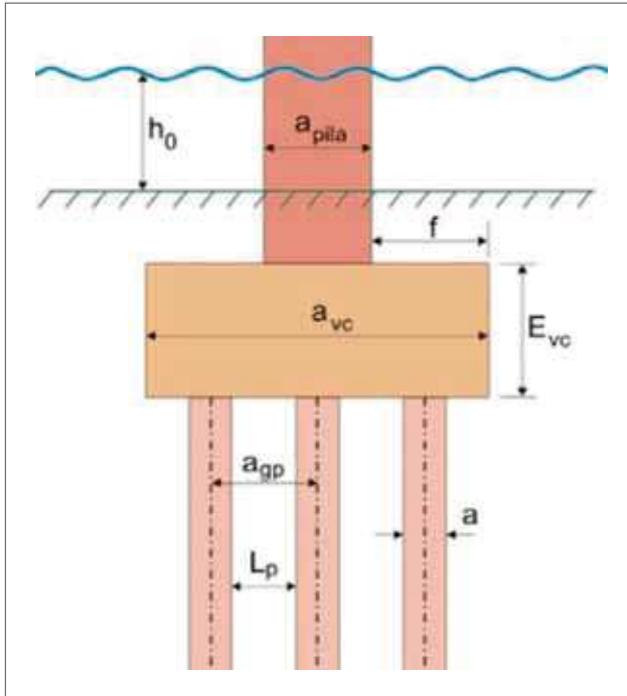
Fuente: Metodología de sheppard.

$$\frac{ds}{a} = 2.5 K f f_1 \frac{h}{a} f_2 \frac{V}{V_c} f_3 \frac{a}{d}$$

Metodología de Coleman

Las consideraciones para fundaciones complejas según Coleman esta referidas al análisis de fundaciones en ríos donde se han construido puentes, combinando las limitaciones que pueda generar el proceso constructivo. También se consideran a la degradación y el nivel de contracción que puedan generar, para ello los resultados cambian cuando el pilar o los pilares en relación al río varían en la combinación de tres elementos estructurales como son: el pilar o pilares, la placa de cimentación, y el grupo de pilotes siendo expuestos a la corriente, y diferentes profundidades de socavación.

Socavación en pilares de fuentes



Fuente: Detalle del análisis según Coleman.

Finalmente Coleman propone la siguiente ecuación para la socavación en pilares de puentes:

$$d_s = K_I K_d K_{ha} K_a K_F$$

Metodología de Hancu

Propuso la siguiente ecuación para la predicción de la socavación en pilares de puentes:

$$ds = 2.42 \times b \times \left[2 \times \left(\frac{V}{Vc} \right) - 1 \right] \times \left(\frac{Vc^2}{gb} \right)$$

Luego al igual que los métodos anteriores se les suma la socavación generada por la placa de cimentación y también de los pilotes, determinando de esa manera la socavación total.

Resultados finales

Los resultados obtenidos fueron para los dos pilares tanto para el pilar central producto de la ampliación, como para el pilar central antiguo.

| CUADRO COMPARATIVO DE LA SOCAVACIÓN TOTAL DE LOS DIFERENTES MÉTODOS APLICADOS POR LOS TESISISTAS CON LOS OBTENIDOS DEL ESTUDIO DEFINIDO DE AMPLIACIÓN DEL PUENTE REQUE – MTC – AÑO – 2007 (PILAR CENTRAL PRODUCTO DE LA AMPLIACIÓN DEL PUNETE REQUE) | |
|--|--|
| MÉTODOS | PROFUNDIDAD DE LA SOCAVACIÓN TOTAL (m) |
| ESTUDIO DE AMPLIACIÓN DEL PUENTE DE REQUE – MTC AÑO 2007 | 14.000 |
| METODOLOGÍA PLANETADA POR LA HEC (HYDROLOGYC ENGINEERING CENTER – CENTRO DE INGENIERÍA HIDROLOGÍA DELL CUERPO DE INGENIEROS DE LA ARMADA DE E.E.U.U.) – HEC 18 | 13.941 |
| METOLOGÍA DE MELVILLE | 18.062 |
| METODOLOGÍA DE SHEPPARD | 14.166 |
| METODOLOGÍA DE COLEMAN | 13.742 |
| MÉTODO DE HANCU | 13.759 |

Fuente: Elaboración de autores.

CUADRO COMPARATIVO DE LA SOCAVACIÓN TOTAL DE LOS DIFERENTES MÉTODOS APLICADOS POR LOS TESISISTAS CON LOS OBTENIDOS DEL ESTUDIO GEOLÓGICO, GEOTÉCNICO, HIDROLÓGICO Y DE LA HIDRÁULICA FLUVIAL PARA EL REFORZAMIENTO Y AMPLIACIÓN DEL PUENTE REQUE – MTC – AÑO – 2005 (PILAR CENTRAL ANTIGUO DEL PUENTE REQUE)

| MÉTODOS | PROFUNDIDAD DE LA SOCAVACIÓN TOTAL (m) |
|---|--|
| ESTUDIO GEOLÓGICO, GEOTÉCNICO, HIDROLÓGICO Y DE LA HIDRÁULICA FLUVIAL PARA EL REFORZAMIENTO Y AMPLIACIÓN DEL PUENTE REQUE – (MTC – AÑO – 2005) | 13.500 |
| METODOLOGÍA PLANETADA POR LA HEC (HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER – CENTRO DE INGENIERÍA HIDROLOGÍA DEL CUERPO DE INGENIEROS DE LA ARMADA DE E.E.U.U.) – HEC 18 | 14.913 |
| METODOLOGÍA DE MELVILLE | 19.524 |
| METODOLOGÍA DE SHEPPARD | 12.692 |
| METODOLOGÍA DE COLEMAN | 12.584 |
| MÉTODO DE HANCU | 12.771 |

Fuente: Elaboración de autores.

4. Discusión

La metodología HEC – 18, es la más sobresaliente, introduce a sus cálculos, factores que netamente influyen en el proceso de socavación (Forma de Pila, Angulo de Ataque del Flujo, Ancho de la Pila, Velocidad, Sedimento, D50, Gravedad), además adhiere a sus fórmulas las características geométricas de los dos Pilares (Longitud, Ancho, Altura, Espesor de la Pila, de la Losa de Cimentación y Pilotes). Así también optimiza variables influyentes en la socavación, para analizarla producto del Grupo de Pilotes, Losa de Cimentación y Pila, y calcula la socavación general estimada sumando las 03 variables encontradas.

La metodología de Melville, recomienda usar un valor K_i (Factor de corrección por intensidad de flujo) que por condiciones prácticas del autor siempre adopta 2.40, dato que al ser afectado a la fórmula principal incrementa directamente a más del doble, de la socavación calculada.

La metodología de Sheppard también destaca, porque introduce a sus cálculos factores que netamente influyen en el proceso de socavación (Forma de Pila), pero no relaciona a sus fórmulas la Socavación producto de la Losa de Fundación, o el Grupo de Pilotes.

La metodología de Coleman, también resalta, porque introduce a sus cálculos factores que netamente influyen en el proceso de socavación (Forma de Pila), pero no relaciona a sus fórmulas la Socavación producto de la Losa de Fundación, o el Grupo de Pilotes.

La metodología de Hancu, también prevalece porque introduce a sus cálculos factores que netamente influyen en el proceso de socavación (Forma de Pila), pero no relaciona a sus fórmulas la Socavación producto de la Losa de Fundación, o el Grupo de Pilotes. Así también introduce a su fórmula general el parámetro de la densidad del material del pilar, con el que ha sido usado en su construcción ($f'c = 280.00 \text{ Kg/cm}^2$), y la densidad propia del agua en condiciones normales ($\rho = 1000.00 \text{ Kg/m}^3$).

5. Conclusiones

1. De acuerdo al estudio de Ensayo de Materiales aplicados para la presente tesis, en el área en el cual se ubica el "Puente Reque" ha dado lugar a una configuración estratigráfica particular con unidades características bien diferenciadas y definidas. Un nivel conformado por suelos de origen reciente (arenas, limos, arcillas, gravas) a 10m de profundidad aproximadamente. En el cauce del Río Chancay (Reque), sección donde se ubica el Puente Reque, al estar conformado por los materiales descritos está sujeto a procesos de socavación.
2. Según los resultados obtenidos del Ensayo de Mecánica de Suelos y comparados con los del "Estudio Geológico, Geotécnico Hidrológico y de Hidráulica Fluvial Para el Reforzamiento y Ampliación del Puente Reque" (MTC - Año 2005), se comprueba que tanto el Pilar Central Antiguo, como el Pilar Producto de la Ampliación del Puente Reque, se encuentra desplantados sobre suelo areno limoso (en menor proporción niveles de grava).
3. Consideramos que el método más apropiado, por la diversidad de fórmulas utilizadas para estimar la Socavación es la Metodología planteada por la HEC (Hydrologic Engineering Center - Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros de la Armada de

E.E.U.U. / HEC – 18], esta actúa en el puente originando una socavación para el Pilar Central Antiguo, de 14.913 metros, y para el Pilar Central Producto de la Ampliación de 13.941 metros.

4. En relación al estudio comparativo se observa que la Metodología Melville según los parámetros que establece; asume un nivel de socavación muy por encima de todos los métodos empleados; así la Metodología de Sheppard, Metodología de Coleman, Metodología de Hancu, tiene un comportamiento aproximadamente similar al HEC – 18, dando valores que se asemejan entre sí.
5. Desestimamos en su totalidad el método de Melville, dado que sus ecuaciones intervienen rangos que aun a la fecha están en estudio.
6. La profundidad de socavación es una variable no determinada en su exactitud puesto que depende de variables hidráulicas como caudal, profundidad del flujo y velocidad, ya que tienen asociada a ellas una distribución probabilística.
7. En el informe hidrológico correspondiente al “Estudio Geológico, Geotécnico Hidrológico y de Hidráulica Fluvial Para el Reforzamiento y Ampliación del Puente Reque” (MTC – Año 2005), utilizan un registro de aforos para el periodo comprendido entre 1914 a 1998; datos que corresponde a las estaciones de aforo Carhuaquero – Racarrumi, lo cual carece de sustento, debido a que desde 1914; los datos pertenecen sólo a la estación Carhuaquero. Por lo tanto los caudales máximos del Río Chancay, utilizados en el citado estudio, consideran 52 datos de caudales indebidamente tomados para determinar el caudal de diseño en la Ampliación del Puente Reque.
8. Los mayores valores de los caudales resultantes de la modelación del proceso Precipitación – Escorrentía, obedece al aporte de 16 Sub Cuencas de Aforo, que se han optado para la presente Tesis, existentes a lo largo del Río Chancay hasta las inmediaciones del Puente Reque, tales como; Lambayeque, Ferreñafe, Chiclayo, Pucalá, Tinajones, Reque, Pimentel, Puchaca, Tocmoche, Llama, Huambos, Santa Cruz, Chancay Baños, Chugur, Quilcate, Cochabamba.
9. El caudal de diseño considerado para la Evaluación Hidráulica es de 2075.00 m³/s, correspondiente a un periodo de retorno de 50

- años. Valor que influye claramente en la velocidad, 3.91 m/s. Dato escogido para iniciar los cálculos de socavación para el HEC – 18.
10. Mediante el modelo hidráulico de simulación de flujo empleando el programa HEC – RAS, se ha obtenido los niveles de socavación local, a un determinado periodo de retorno de $T_r = 50$ años, para el pilar central producto de la ampliación 3.68 metros, y para el pilar antiguo de 7.48 metros, así también se consiguió los parámetros hidráulicos en la sección del Rio Reque.
 11. La Cimentación del Pilar Central Antiguo es de 14 a 18m de profundidad, lo cual implica que los niveles mínimos de socavación calculada para el Pilar Central Antiguo corresponde a 13.50 metros. El nivel de socavación encontrado con el HEC – 18, en ese Pilar es de 14.913 metros.
 12. Por lo expresado anteriormente con el efecto del caudal (2075.00 m³/s) y velocidad (3.91 m/s), generados para un periodo de retorno de 50 años; el Pilar Central Antiguo es susceptible de ser afectado por socavación ante un eventual “Fenómeno de Máximas Avenidas” que podría comprometer su estabilidad y permanencia.
 13. El Pilar producto de la Ampliación del Puente Reque no presenta problemas de socavación, ya que el nivel de cimentación del pilar es de 28.70 metros, encontrándose remotamente por debajo de los niveles de socavación obtenidos. El nivel de socavación encontrado con el HEC – 18, en este Pilar es de 13.941 metros.

6. Referencias Bibliográficas

- Arbulú, J. (2009). *Socavación en pilares de puentes: Análisis comparativo de metodologías predictivas*. Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo. Centro de Investigación – FICSA. Lambayeque. Perú.
- Arbulú, B. (2011). *Evaluación Hidráulica del Puente Monsefù – Eten*. Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo. Facultad de Ingeniería Civil, Sistemas y Arquitectura (FICSA). Lambayeque, Perú.
- Coleman, S. (2005). *Clearwater Local Scour at complex Piers*. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 131, No. 4, pp 330 – 334. Estados Unidos.
- Guevara, A. (1998). *Socavación en Puentes*. Universidad del Cauca.

Melville, B. W. y Coleman, S. (2000). *WaterResourcesPublications*. LLC, Colorado. Estados Unidos.

Villon, M. (2002). *Hidrología*. (2ª ed.) Edición. Editorial Villón. Lima. Perú.

Arneson, L. (2012) *EvaluationScour at Bridges*. Quinta Edición. Estado de Virginia. Estados Unidos.