

ESTUDIO COMPARATIVO DE MÉTODOS DE CÁLCULO DE SOCAVACIÓN LOCAL EN UNA CEPA CIRCULAR EN RÍO DE LECHO ARENOSO.

C. Felipe Peñaloza H.¹, Diego Caamaño A.², Mauricio Villagrán V.³

RESUMEN

La socavación local, es una de las problemáticas que se debe estudiar en el diseño de estructuras hidráulicas fundadas en lechos de ríos. En este trabajo, se compararon los resultados de socavación local en una cepa aislada y fundada en el lecho arenoso del río Biobío, a través de los métodos tradicionales indicados en el Manual de Carreteras y un modelo morfodinámico simplificado geoméricamente de carácter bidimensional. Los cálculos se realizaron para variables hidráulicas determinadas en una crecida de 100 años de periodo de retorno, en una sección transversal del río correspondiente a la actual ubicación del puente Juan Pablo II. Se presentan las variables unidimensionales promediadas en a) la sección completa, b) la sub-sección más caudalosa, y c) a través del modelo numérico. Los resultados, indican que este último entrega los valores de socavación local más conservadores aludiendo a la conocida sobreestimación de los métodos tradicionales.

PALABRAS CLAVES: Ingeniería hidráulica; Socavación local; Río con lecho arenoso.

ABSTRACT

Local scouring is one of the problems that must be studied in the design of hydraulic structures based on river beds. In this work, the results of local scouring in an isolated strain, based on the sandy bed of the Biobío river, were compared through the traditional methods indicated in the “Manual de Carreteras” and a geometrically simplified morphodynamic model with a two - dimensional character. The calculations were made for hydraulic variables determined for a flood of 100 years of return period in a cross section of the river corresponding to the current location of the bridge Juan Pablo II. The one-dimensional variables averaged are presented in a) the complete section, b) the mightiest sub-section, and c) through the numerical model. The results indicate that the latter yields the most conservative local scour values, alluding to the known overestimation of traditional methods.

KEYWORDS: Hydraulic engineering; Local scouring; River with sandy bed.

¹ Estudiante de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, cfpenaloza@ing.ucsc.cl

² Profesor Asistente, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, dcamano@ucsc.cl

³ Profesor Asistente, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, mwillagran@ucsc.cl

1. INTRODUCCIÓN

La socavación que se produce en torno a un obstáculo situado en un flujo se denomina “socavación local” y es el resultado directo de las alteraciones del flujo generado por el obstáculo o la estructura. Estas alteraciones pueden definirse como un aumento de las velocidades locales, o la formación de vórtices (Mery, 2013). El desarrollo de un proceso de socavación, depende fundamentalmente, de la velocidad de escurrimiento y de la intensidad turbulenta. Cuando se trabaja en el diseño de obras hidráulicas y se trata con problemas de socavación, los factores más importantes son: la socavación máxima, la zona de ubicación, y la magnitud de esta.

De distintas experiencias en modelos hidráulicos físicos de diferentes escalas y distintos materiales constituyentes del lecho (i.e. desarrollados en laboratorio), se derivaron relaciones entre la escala de tiempo y la escala de velocidad, la profundidad del escurrimiento y la densidad del sedimento (Mery, 2013).

En este estudio, se calcula la socavación local -en una cepa aislada en un río con lecho arenoso- para un periodo de retorno de un siglo (i.e. $T=100$ años), mediante varios métodos de cálculo. Se utiliza el río Biobío como zona de estudio, y se caracterizan hidráulicamente algunas secciones transversales ubicadas en la vecindad del puente Juan Pablo II (Figura 1).

Los métodos de estimación de socavación local, ya sean empíricos o numéricos, dependen de una combinación de variables hidráulicas características de la sección en estudio. Por ello, el primer paso de esta investigación consiste en determinar dichas variables unidimensionalmente mediante el software HEC-RAS. En segunda instancia, se utilizarán los valores calculados para definir las magnitudes máximas de la sección transversal en la que actualmente se encuentra emplazado el puente, y consecuentemente se realiza un modelo morfológico bidimensional simplificado para dichos valores máximos, utilizando para ello, el software DELFT 3D.



Figura 1: Zona de estudio, vista en planta del puente Juan Pablo II. La flecha roja indica la subsección de mayor caudal por unidad de ancho perteneciente al transecto de emplazamiento del puente.,

Fuente de la imagen: Google Earth Pro.

La erosión local se inicia con la aceleración del flujo alrededor de la cepa, posteriormente se forma la fosa de erosión por la acción de los vórtices primarios producto de los vértices verticales que se generan en el punto de estancamiento del flujo descendente hasta el momento que no aumenta más la profundidad (o se vuelve insignificante) y se llega al equilibrio.

Así, el foso de erosión aguas arriba de la cepa aumenta de tamaño a medida que el flujo circula en frente y alrededor de ella. Sin embargo, aguas abajo el proceso es diferente. El material es levantado por las diferencias de presión que generan los vórtices horizontales detrás de la cepa y es arrastrado hasta la parte trasera, donde se va acumulando y formando una elevación del lecho respecto a la fosa.

En la figura 2, se muestra de forma ilustrativa el proceso de erosión local en una cepa de puente, según lo indicado en Rocha (2014).

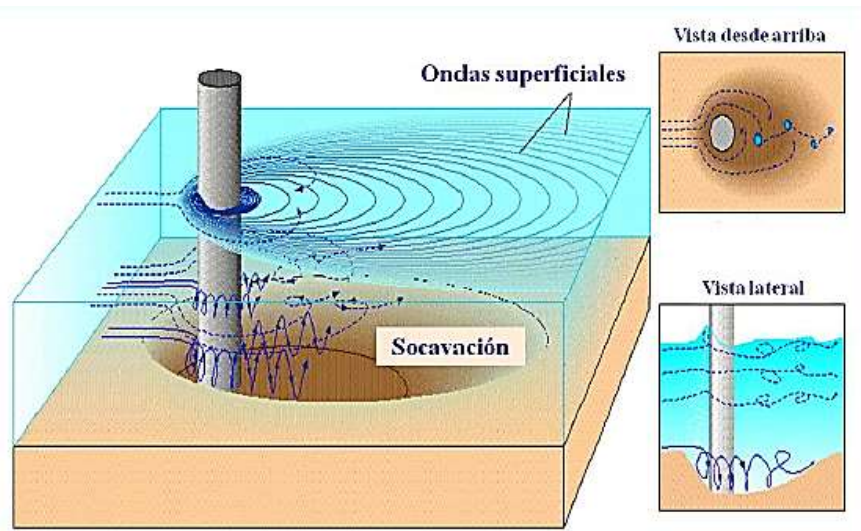


Figura 2: Esquema de perturbación del flujo causado por una pila circular.

En los métodos para el cálculo de erosión en pilas de puente, las variables que intervienen según lo indica Astorga (2015) son las siguientes:

- Geométricos: ancho de la pila, forma de la pila y ángulo de ataque de la corriente;
- Hidráulicos: la velocidad de la corriente aguas arriba de la pila, la profundidad hidráulica frente a la pila y peso específico del agua.
- Geotécnicos: diámetro de partículas de suelo y el peso específico del suelo.

2. MÉTODOS.

Lo primero, es calcular la velocidad y profundidad del agua en el punto de estudio, para ello se realizó un modelo 1D con el software HEC-RAS utilizando los caudales asociados a los periodos de retorno 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años.

En segunda instancia, las variables obtenidas del modelo unidimensional fueron utilizadas para calcular la socavación local a través de los siguientes y más adecuados métodos empíricos: BNSh (1977), Yaroslaztziev (1969) y CSU (1995).

En tercer lugar, se calculó la socavación local en una cepa aislada en lecho arenoso. Para ello, se utilizó el software DELFT 3D, donde se modeló un canal trapezoidal, con ancho suficiente para que el flujo llegue sin distorsiones de las riberas al centro del cauce, lugar donde se ubica la cepa de estudio, esto simula un canal de pruebas en laboratorio.

Finalmente, se pretende comparar los resultados de cálculo de la socavación local obtenidos a través de las formulas empíricas con los logrados utilizando el modelo bidimensional.

A continuación se enumeran métodos mencionados anteriormente.

2.1. Modelo unidimensional para estimar alturas y velocidades en el punto de estudio utilizando software HEC-RAS.

Se definió 11 perfiles transversales desde la estación fluviométrica “Río Biobío en Desembocadura” ($36^{\circ}50'11''$, $73^{\circ}05'10''$ W), hasta 2 kilómetros aguas abajo desde el puente Juan Pablo II, como se muestra en la figura 5.



Figura 5: Perfiles transversales en el río Biobío.

A partir de datos de batimetría del río Biobío extraídos del proyecto fondecyt n°11100399, se ha procesado la nube de puntos utilizando el software Global Mapper, donde se generó una grilla de elevación 3D y posteriormente se posiciono los 11 perfiles sobre la grilla 3D. A partir de ellos, se extrajo la elevación de los perfiles transversales como se muestra en la figura 6.

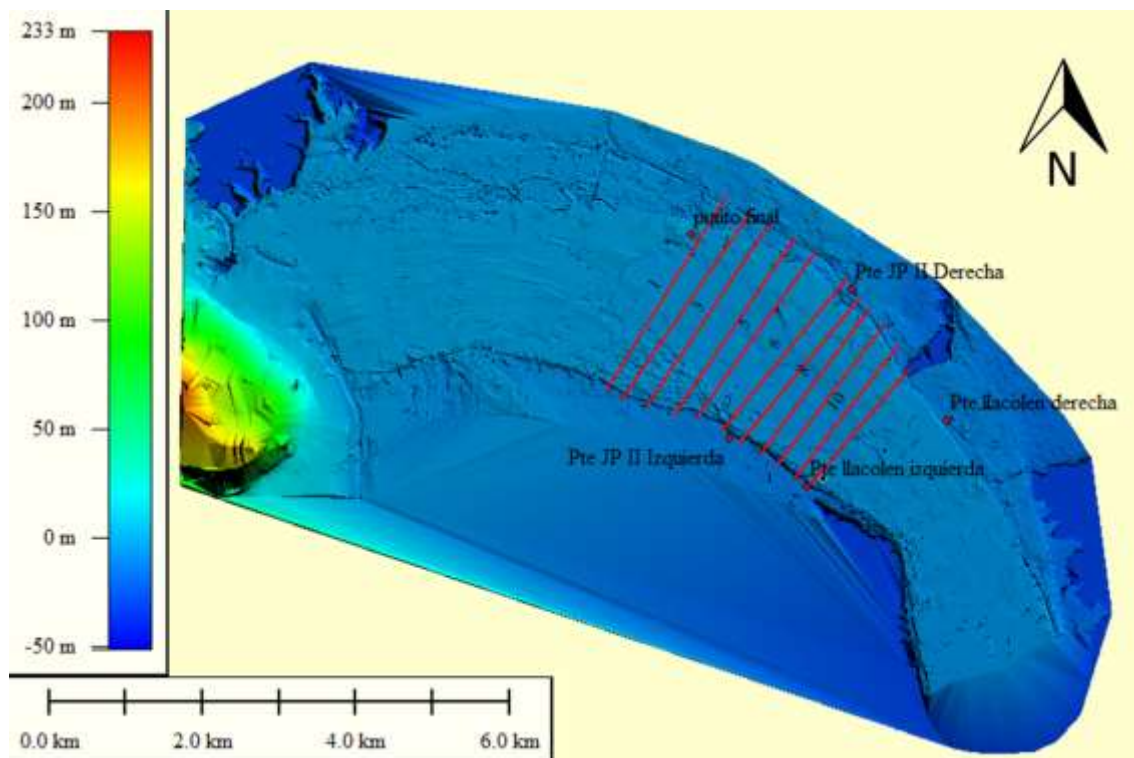


Figura 6: Batimetría generada en Global Mapper, y perfiles posicionados sobre el río Biobío.

Una vez extraída esta información, cada perfil contenía alrededor de 1000 puntos cada uno, lo que genera inestabilidad en el modelo HEC-RAS, pues el programa itera con exceso de información. Por ello fue necesario filtrar la información extraída de cada perfil, para generar finalmente perfiles de aproximadamente 30 puntos cada uno, el filtro de datos se realizó con un código sencillo en software MatLab.

Para definir la geometría, se ingresaron los perfiles transversales obtenidos y posteriormente se definió la distancia entre las secciones. Para ello, se midió la distancia entre las secciones las que se muestran en la tabla 1. El parámetro de rugosidad de *manning* que se utilizó es $n=0.034$ (Escobar, 2013). Se interpoló entre los perfiles cada 5 metros.

Tabla 1: Distancia entre perfiles transversales del Área de Estudio.

Perfil	LOB [m]	Channel [m]	ROB [m]
11	216	275	349
10	289	300	321
9	263	267	273
8	297	244	200
7	280	287	303
6	374	455	539
5	314	303	328
4	367	373	381
3	342	315	293
2	234	299	365
1	0	0	0
Σ	2976	3118	3352

El flujo se trabajó como estacionario, además es subcrítico, la condición de borde aguas abajo que se utilizó es la altura normal para una pendiente de 0.0005 (pendiente aproximada del río Biobío cerca de su desembocadura). Los caudales de entrada para los periodos de retorno correspondientes aplicados al modelo en el perfil 11, fueron obtenidos de Soberón (2015) y se muestran en la tabla 2.

Tabla 2: Caudales del Río Biobío a la altura de la estación fluviométrica “Río Biobío en desembocadura” asociados a periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años.

T [años]	2	5	10	25	50	100
Q [m ³ /s]	6220	9649	11920	14788	16916	19028

A partir de este modelo, se obtuvieron diferentes alturas y velocidades con que llega el flujo al punto de estudio, asociado a los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años. Para obtener la máxima socavación en la cepa, se trabajó solo con los datos de 100 años de periodo de retorno. Se extrajo los valores de profundidad, velocidad y caudal en la zona donde se encuentra emplazado el puente Juan Pablo II, específicamente en la zona de mayor velocidad de flujo como se muestra en la figura 7.

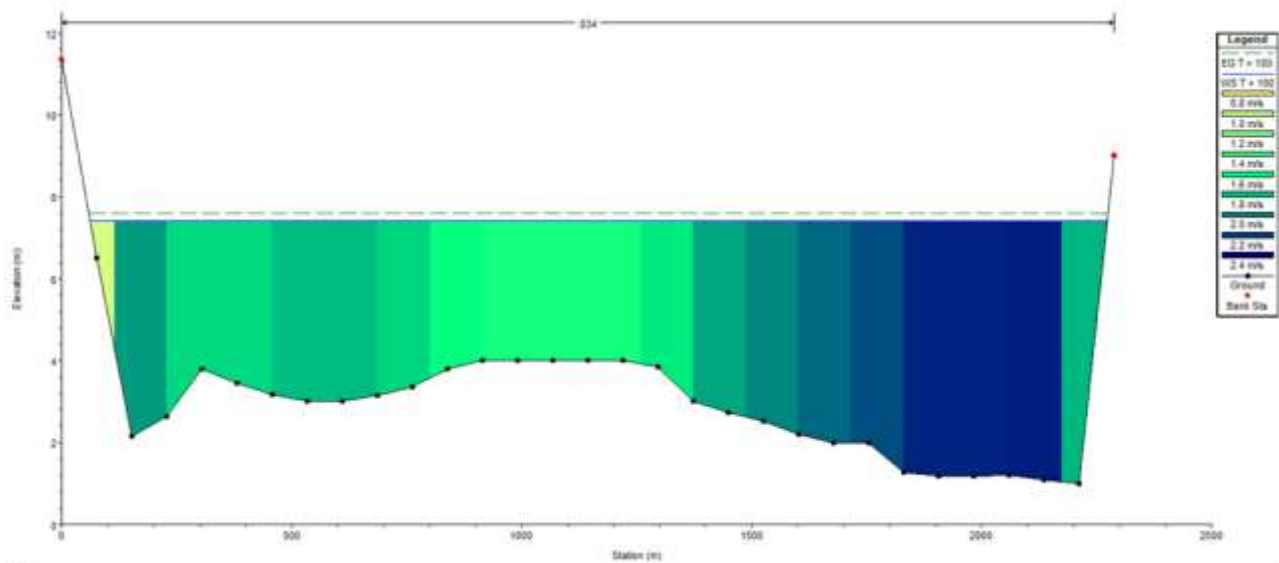


Figura 7: Distribución de velocidades en la zona de estudio.

2.2. Métodos de cálculo de socavación.

A continuación se presentan los métodos de cálculo de socavación local utilizados en esta investigación:

2.2.1. Método de Breusers, Nicollet y Shen (BNSh) (1977).

$$\frac{S_c}{b} = 2 \tanh\left(\frac{h}{b}\right) \quad (1)$$

Dónde:

S_c: Socavación máxima (m).

b: Diámetro de la pila (m).

h: Altura de escurrimiento (m).

Esta es una ecuación sugerida en el "Manual de carreteras volumen 3, sección 3.707", la cual considera sólo una variable geométrica (b) y otra hidráulica (h). El método no utiliza variables geotécnicas, por lo que el resultado de socavación sería idéntico para cualquier tipo de sedimento que produzca una fricción asociada a la altura h de escurrimiento. Más bien, es una fórmula empírica de uso práctico que permite un cálculo rápido y sencillo, se puede utilizar para comparar los resultados obtenidos con algún método más específico.

2.2.2. Método de Yaroslaziev (1969).

Este investigador considera el caso de un lecho arenoso y un caso de un lecho compuesto por sedimento cohesivo, se mencionara en este documento sólo el lecho arenoso puesto que corresponde al caso de estudio.

Las expresiones propuestas por Yaroslaziev fueron obtenidas, a través de la observación directa en varios puentes de la ex-uni6n Sovi6tica.

La profundidad de socavaci6n est1 dada por la siguiente ecuaci6n:

$$S_c = K_f K_V (e + K_H) \frac{v^2}{g} - 30d \quad (2)$$

D6nde:

S_o: Profundidad de socavaci6n, en m.

K_f : Coeficiente que depende de la forma la cepa y el ángulo de incidencia entre la corriente y el eje de la misma.

Para el caso de una cepa circular $K_f = 10$, según lo presentado por Jiménez et al. (2006), Como se muestra en la figura 3.

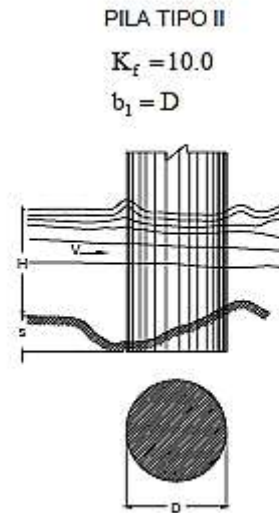


Figura 3: coeficiente K_f para pilas circulares.

K_v : coeficiente definido por la expresión:

$$\log K_v = -0,28 \sqrt[3]{v^2 / g b_1} \quad (3)$$

v: Velocidad media aguas arriba de la pila, después de producirse la socavación general en m/s.

g: Aceleración de gravedad, $9,81 \text{ m/s}^2$.

b_1 : Proyección de un plano de la sección de la pila perpendicular a la dirección de la corriente; cuando el esviajamiento de la pila con respecto a la corriente es de 0° , b_1 toma el valor del ancho de la pila.

e: Coeficiente de corrección, cuyo valor depende del sitio en donde están colocadas las pilas; toma el valor de 0,6 si estas se encuentran en el cauce principal y de 1,0 si estas están constituidas en llanuras de inundación.

K_H : Coeficiente que toma en cuenta el tirante (profundidad hidráulica). Se obtiene a partir de la figura 4.

H: Tirante de la corriente frente a la pila después de haber ocurrido la socavación general.

d: Diámetro en m de las partículas más gruesas que forman el fondo y está representado por el d_{85} de la curva granulométrica.

En este análisis, se utiliza el d_{85} , debido a que al formarse el vórtice producido por la erosión se realiza una selección de los materiales y quedan únicamente los más grandes (Campa y Astorga, 2015). Cuando el diámetro del material del fondo es menor de 0,5 cm, se recomienda no considerar el segundo término de la ecuación. Si dos estratos adyacentes tuviesen granulometrías muy diferentes, se debe tomar el mayor d_{85} de ambas granulometrías, ya que al ser afectados conjuntamente por la socavación los sedimentos se mezclaran (Campa y Astorga, 2015).

Yaroslavtziev advierte que su fórmula para suelos granulares puede conducir a errores cuando:

- $H / b1$ sea menor de 2 y el pilar está desviado respecto a la corriente, y
- $H / b1$ sea menor de 1.5 este o no desviado, según Maza (1967).

En este método intervienen parámetros geométricos, hidráulicos y geotécnicos.

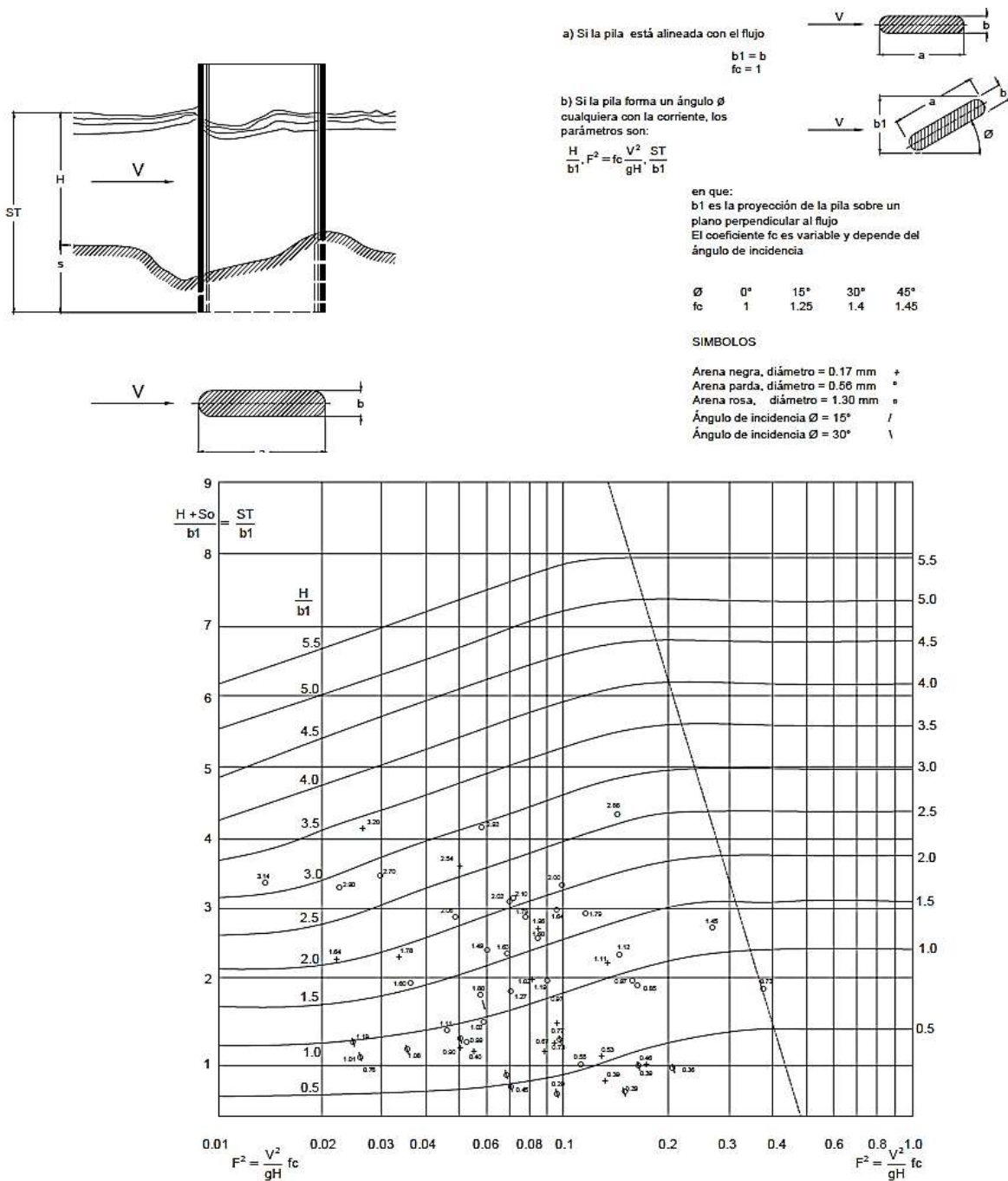


Figura 4: grafica para determinar el coeficiente de Profundidad Hidráulica K_H .

2.2.3. Método de la universidad estatal de colorado (CSU) (1995).

Este método, fue presentado como norma de diseño por la Administración Federal de Carreteras de los Estados Unidos (FHWA). Es una ecuación desarrollada por la Universidad Estatal de Colorado (CSU) para el cálculo de la socavación local en pilas, tanto en agua clara como en lecho móvil. Esta ecuación fue desarrollada con base en análisis dimensional de los parámetros que afectan la socavación y análisis de datos de laboratorio (Astorga et al., 2013).

Puede aplicarse en lechos no cohesivos (arenosos) y la fórmula de CSU cubre la posibilidad de diversas secciones transversales del pilar y otras condiciones particulares (Rocha, 2014).

$$\frac{S_c}{Y_h} = 2 K_1 K_2 K_3 K_4 \left(\frac{D}{y}\right)^{0,65} F^{0,43} \quad (4)$$

Dónde:

K₁: Forma de la sección transversal del pilar.

K₂: Ángulo de ataque de la corriente.

K₃: Condición del lecho.

K₄: Posibilidad de acorazamiento.

S_c: Es la profundidad máxima de socavación.

Y_h: Es el tirante inmediatamente aguas arriba del puente, sin considerar la erosión local.

F: Número de Froude del escurrimiento.

b: Dimensión del pilar medida transversalmente a la corriente.

Para el caso que se está analizando como la pila es circular $K_1=1$ (excepto para grupo de pilas donde $K_1=0,9$), además $K_2=K_3=K_4=1$ puesto que la pila es circular y el lecho es arenoso, además k_4 se aplica solo cuando $d_{50}>60$ mm (Astorga, 2013). A partir de esto se puede simplificar la fórmula CSU de la siguiente forma:

$$\frac{S_c}{Y_h} = 2 \left(\frac{b}{y}\right)^{0,65} F^{0,43} \quad (5)$$

Al despejar y_s se tiene:

$$S_c = 2 b^{0,65} Y_h^{0,35} F^{0,43} \quad (6)$$

Donde al reemplazar la expresión que corresponde al número de Froude se obtiene la siguiente expresión para calcular la socavación local en pilas circulares:

$$S_c = 1,22 b^{0,65} Y_h^{0,135} V^{0,43} \quad (7)$$

Según Astorga (2013) la experiencia ha demostrado que para pilas muy anchas el método da valores muy superiores a los reales. Igual situación ocurre cuando se calcula la socavación para cimientos anchos. Sin embargo, este método es el más utilizado especialmente por su carácter de norma obligatoria en los Estados Unidos. Este método, se basa en una curva envolvente de eventos de máxima socavación, lo que conlleva a que los resultados obtenidos sean conservadores. El valor de b que se utiliza en la fórmula, debe ser el valor del ancho del pilar cerca al fondo del cauce, después de tomar en cuenta tanto la degradación a largo plazo como la socavación por contracción del cauce (HEC-18 2001).

En el documento de Campa y Astorga (2015), se plantea las siguientes limitaciones para el método:

- $d_s \leq 2,4$ para $Fr \leq 0,8$.

- $d_s \leq 3,0$ para $Fr \geq 0,8$.

Este método considera únicamente variables geométricas e hidráulicas.

2.3. Modelo bidimensional de socavación local en cepa de puente aislada en canal trapezoidal con lecho arenoso utilizando software Delft 3D.

La idea de este modelo, es representar la socavación local en una cepa aislada en medio de un flujo donde la corriente llegue a la cepa sin sentir la distorsión provocada por las riberas, para ello se definió la batimetría de un canal trapezoidal de 4000 metros de largo, 100 metros de ancho y pendiente de 0.0005. El canal tiene una profundidad de 12 metros, y el nivel de referencia es la cota 0, que coincide con el final del canal. La cepa se ubica en medio del canal, es decir a 2000 metros desde el final del canal y a 50 metros de las riberas como se muestra en la figura 8. Se utilizó una grilla rectangular, donde cada malla es cuadrada y tiene un ancho de 9.87 metros.

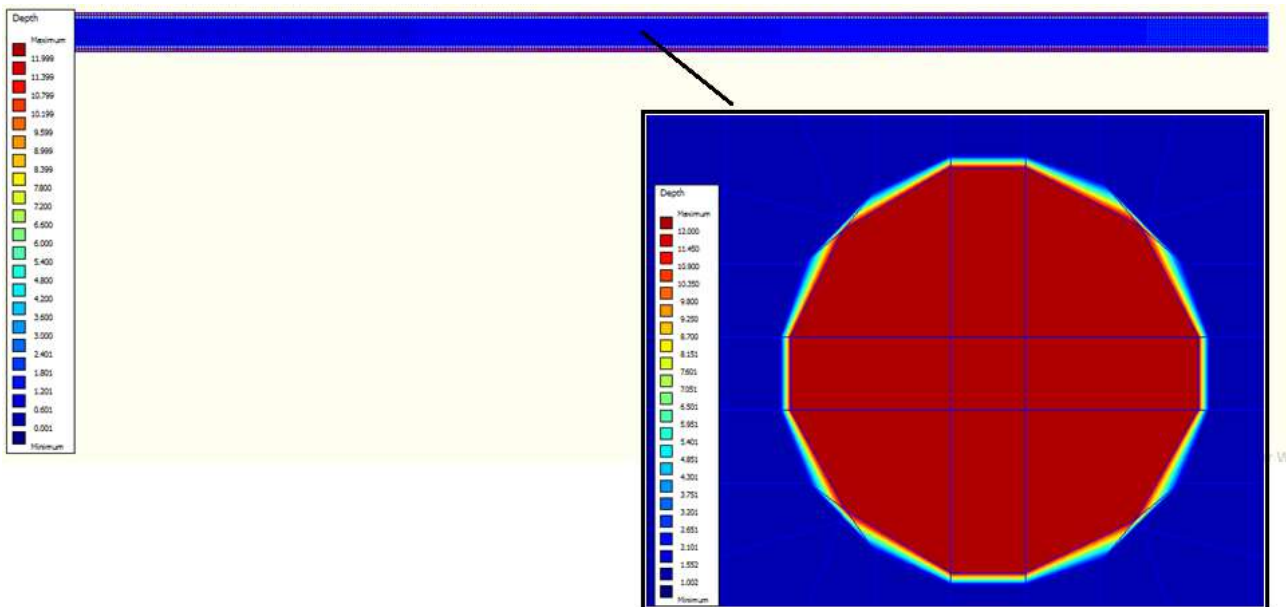


Figura 8: ubicación de cepa aislada en canal trapezoidal.

Se hizo necesario trabajar por separado los dos modelos de flujo, que mediante la herramienta de anidado (“Nesting”) que proporciona el programa DELF 3D trabajan en conjunto. De esta forma, se puede trabajar con una grilla mucho más fina en la zona donde se pretende calcular socavación y así disminuye significativamente el tiempo de cálculo del programa.

Para incorporar la cepa aislada al modelo se modificó manualmente la grilla fina, luego se interpoló valores asignados para dar forma a la cepa. Se trabajó con la herramienta *Thin Dams*, para definir zonas secas dentro del flujo, la forma de la cepa y la grilla fina que se muestra en la figura 9. Las cuadrículas de la grilla fina tienen un ancho de 0.365 metros, y el ancho de la cepa es de 2 metros.

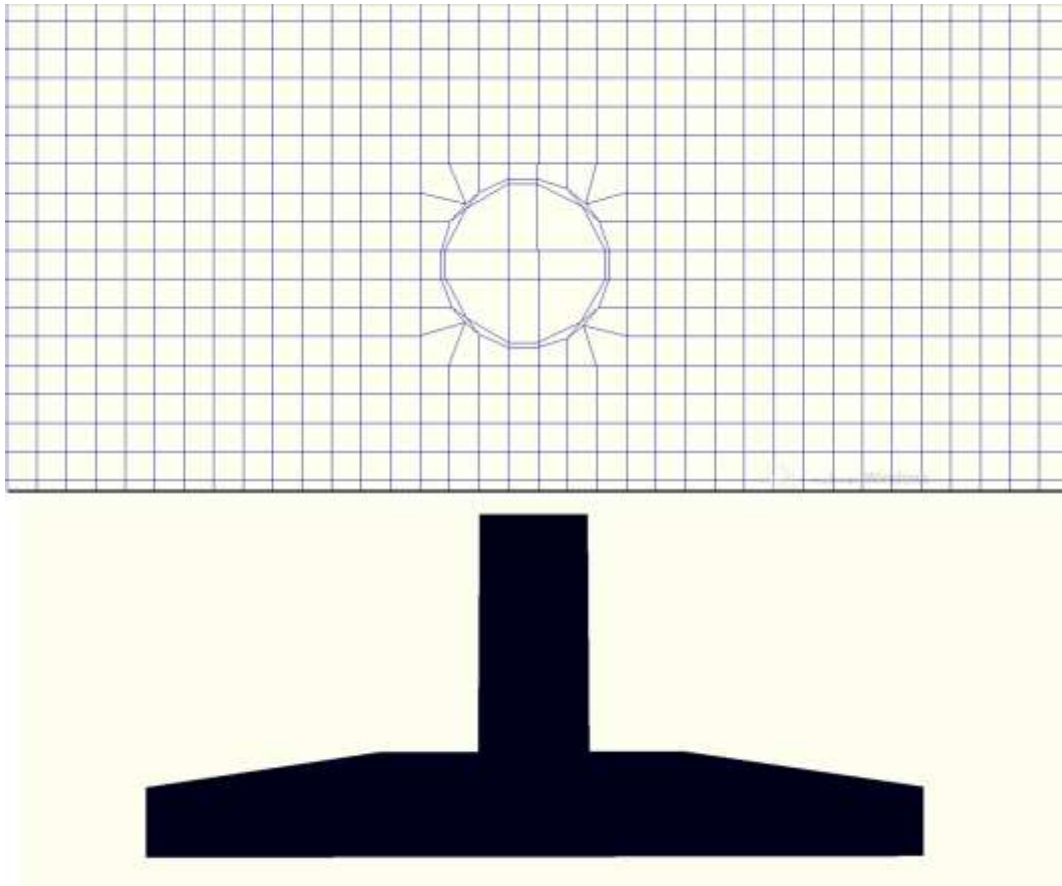


Figura 9: Arriba, grilla modificada para dar forma a la cepa mediante interpolación.
 Abajo, forma de la cepa.

3. RESULTADOS.

3.1. Alturas y velocidades en el punto de estudio utilizando software HEC-RAS.

Del modelo unidimensional para obtener alturas y velocidades en el punto de estudio se han obtenido los siguientes resultados.

Tabla 3: Resultados obtenidos utilizando software HEC-RAS.

Periodo de Retorno [años]	2	5	10	25	50	100
Caudal [m^3/s]	6220	9649	11920	14788	16916	19028
Velocidad media[m/s]	1.23	1.45	1.57	1.71	1.81	1.9
Velocidad máxima [m/s]	1.63	1.85	1.97	2.12	2.2	2.32
Profundidad máxima [m]	4.16	4.9	5.33	5.81	6.13	6.42
Caudal equivalente en canal trapezoidal [m^3/s]	658	887	1029	1204	1333	1458

Los resultados obtenidos en esta tabla sirvieron como datos de entrada para calcular la socavación local mediante métodos empíricos y para el modelo bidimensional.

De estos datos se puede analizar que, a pesar de la gran variación de caudal que existe entre los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años, no se produce gran incremento de velocidad asociada a los mismos periodos. Esto se debe a que estamos en presencia de un flujo subcrítico de ancho muy extenso, lo que le facilita mantener su condición.

3.2. Resultados de cálculo de Socavación con métodos empíricos.

Los resultados de socavación local obtenidos utilizando métodos empíricos, se presentan en la tabla 4 y en ella se exponen los resultados de socavación para periodo de retorno $T=100$ años, donde se tiene un caudal de $19028 \text{ [m}^3/\text{s]}$ y una profundidad de 6.42 [m] , utilizando velocidad media y velocidad máxima del flujo en el punto de estudio. Las cuales fueron extraídas del modelo unidimensional, donde la velocidad media del flujo es de 1.9 [m/s] y la velocidad máxima tiene un valor de 2.32 [m/s] ,

Tabla 4: Resultados obtenidos de socavación local obtenidos utilizando métodos empíricos.

Método	Socavación [m]	
	Velocidad Media en sección transversal	Velocidad Máxima en subsección
Breusers, Nicollet y Shen (BNSh) (1977).	3.99	3.99
Yaroslatziev (1969).	9.14	12.95
Universidad estatal de colorado (CSU) (1995).	2.91	3.17

Se puede apreciar, que los resultados que se obtuvieron utilizando estos tres métodos, son muy diversos. Antes que todo, el método de Breusers, Nicollet y Shen (BNSh) (1977), considera solo una variable geométrica (b) y una hidráulica (h), por lo que deja de lado aspectos importantes a considerar en el cálculo de socavación local. Por ejemplo, al realizar el cálculo para los casos de velocidad media o velocidad máxima, nos entrega el mismo valor para ambos casos. Por otra parte, el método de la Universidad estatal de colorado (CSU) (1995) también considera variables hidráulicas y geométricas, pero hace un análisis más detallado que entrega un valor menos conservador de socavación local. Del mismo modo, el método de Yaroslatziev (1969) considera variables hidráulicas, geométricas y geotécnicas; y es el más conservador de los tres.

3.3 Resultados del Modelo bidimensional de socavación local en cepa de puente aislada en canal trapezoidal utilizando software DELFT 3D.

En la figura 10, arriba, se presentan los valores de magnitud de velocidad alrededor de la cepa en lecho arenoso. En ella se nota que la velocidad del flujo disminuye en la zona de la cepa circular, teniendo valores de 0.6 [m/s] en la fosa de erosión alrededor de la cepa, luego del agujero socavado, el flujo comienza a recuperar velocidad hacia aguas abajo. Además, por los costados de la fosa de erosión se produce un incremento de velocidad, donde llega a alcanzar valores de hasta 1.6 [m/s] . En la figura 10, abajo, se muestra el perfil longitudinal de velocidad en la cepa en donde se puede apreciar la interferencia de esta en la velocidad del flujo, que llega con una velocidad de 1.6 [m/s] en donde comienza a disminuir al aproximarse a la cepa. Llega a cero al entrar en contacto con ella y aguas abajo del obstáculo, vuelve a retomar la velocidad sin alcanzar el máximo inicial. Producto de esto, aumenta la profundidad del flujo justo antes de entrar en contacto con la cepa como se muestra en la figura 11.

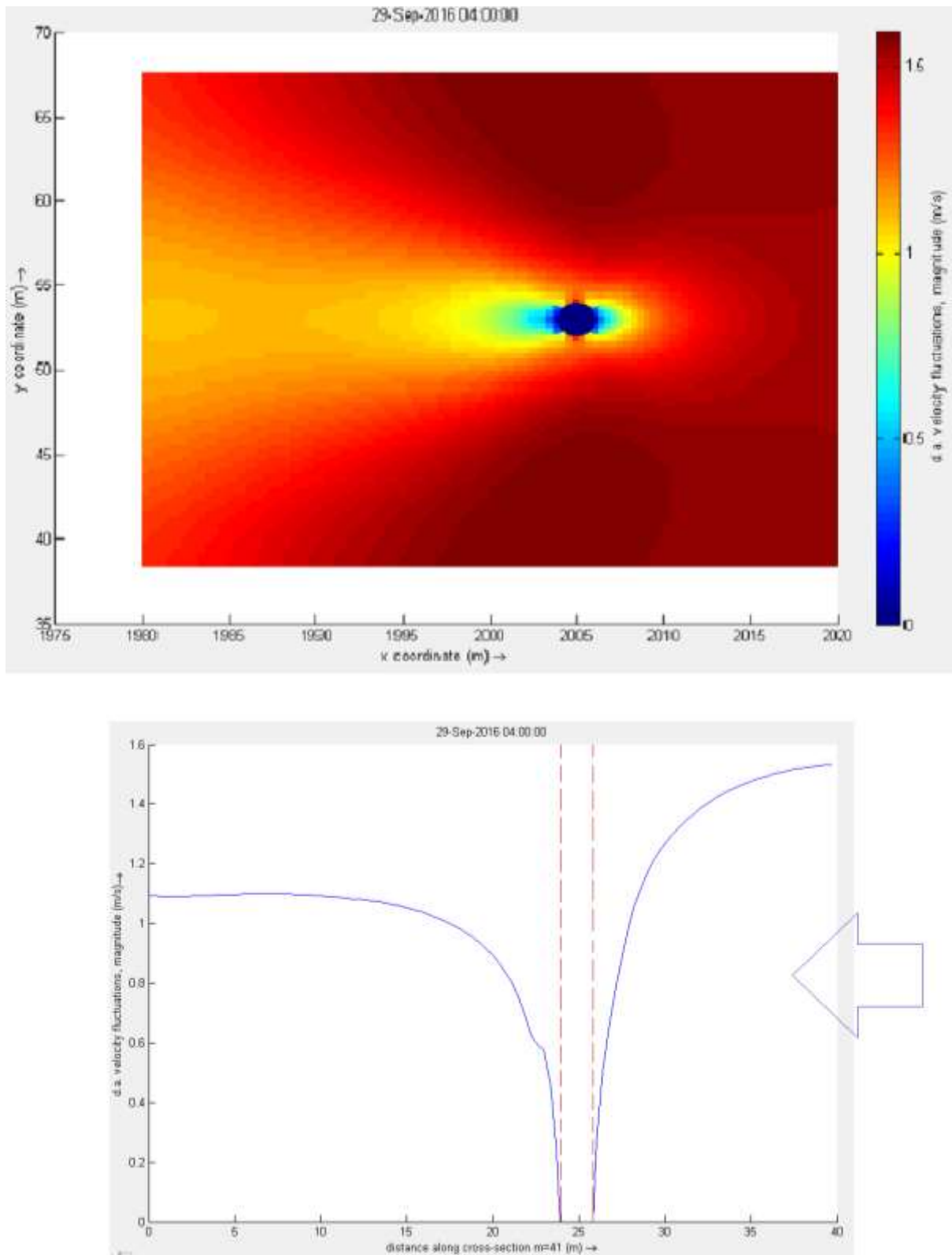


Figura 10: Arriba, Magnitud de velocidad alrededor de la cepa aislada.

Abajo, Perfil longitudinal de velocidad en la cepa aislada.

A continuación, en la figura 11 se muestra el nivel de agua alrededor de la cepa, el flujo llega con una profundidad de 6.42 [m], pero al sentir la cepa se puede apreciar que el flujo se peralta aguas arriba de ella y justo aguas debajo de la cepa, se produce un delta de profundidad por la interferencia en el flujo.

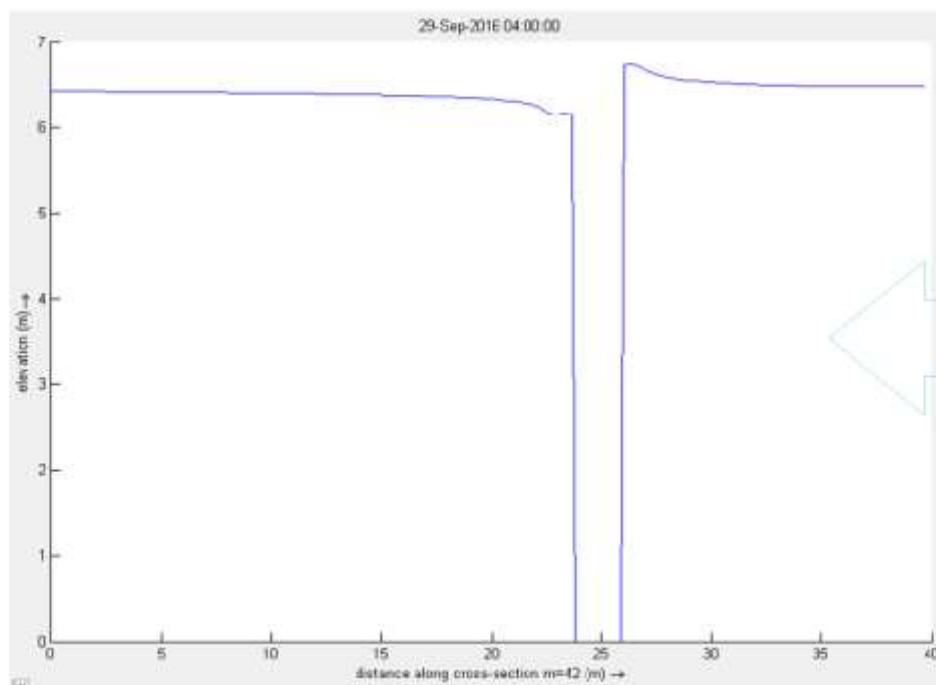
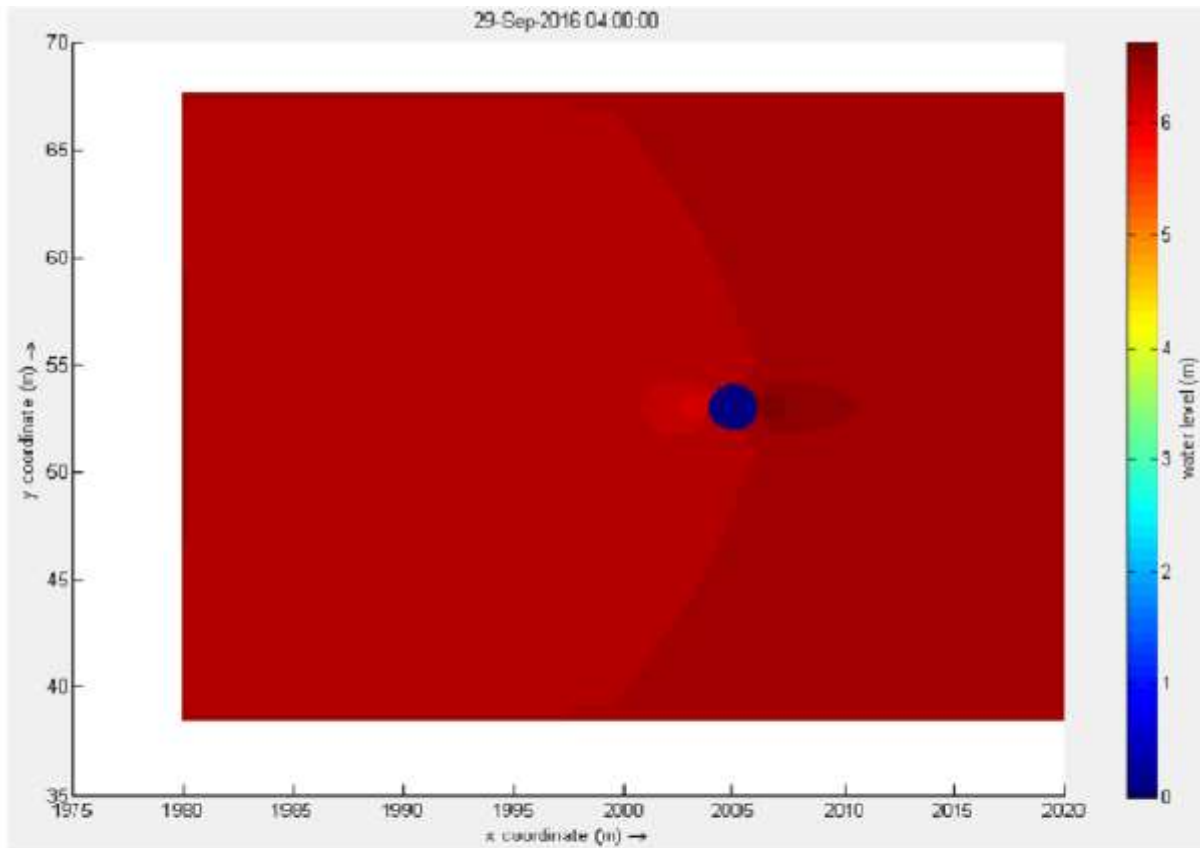


Figura 11: Arriba, Profundidad del flujo alrededor de la cepa aislada.
 Abajo, Perfil longitudinal de profundidad del flujo en la cepa aislada.

En la figura 12, arriba, se puede apreciar los resultados de socavación local en la cepa aislada en lecho arenoso, para un tiempo de 52 horas. La socavación máxima alcanzada es de 7 metros de profundidad, se nota la cavidad de erosión por la acción de los vórtices primarios y del flujo descendente alrededor de la cepa. También hay depositación por los costados de la cavidad de erosión y por aguas abajo de la cepa. No se alcanza a estabilizar la cavidad de erosión, pues el flujo no llega al equilibrio para el tiempo modelado.

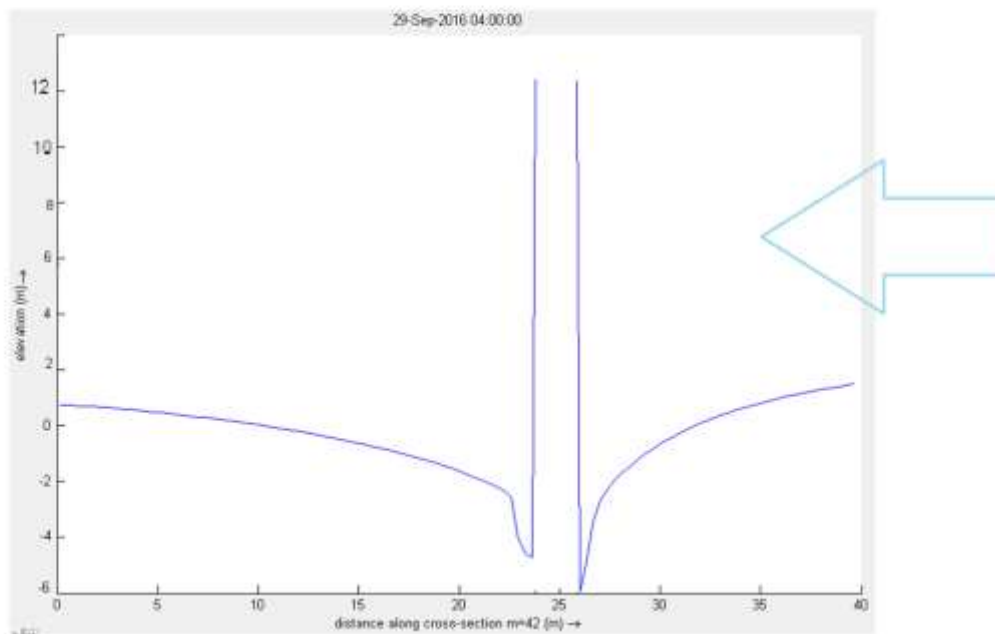
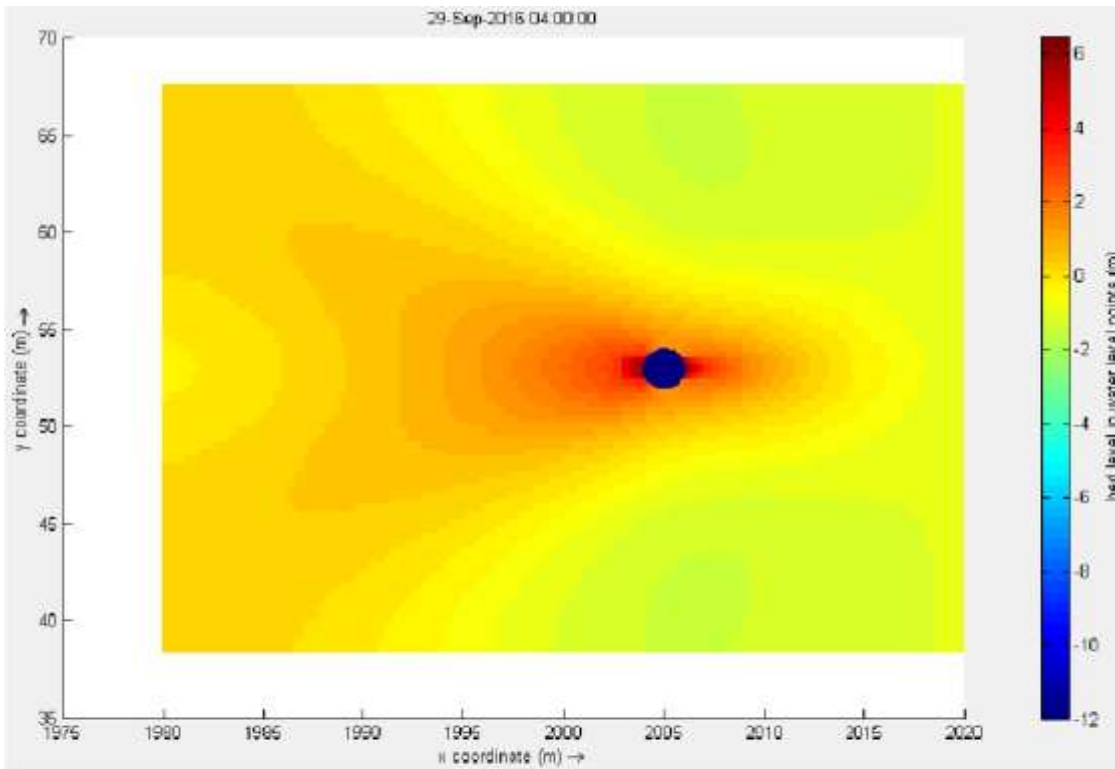


Figura 12: Arriba, Magnitud de la socavación local en la cepa aislada en lecho arenoso.
 Abajo, Perfil longitudinal de la socavación local en la cepa aislada en lecho arenoso.

Luego, en la figura 12, abajo, se muestra el perfil longitudinal de socavación local en la cepa donde se puede apreciar que los valores máximos de socavación son alcanzados justo alrededor de ella, alcanzando aproximadamente 7 metros de profundidad justo aguas debajo de la cepa.

También se puede ver que se produce depositación luego de la fosa socavada.

Finalmente se puede comparar los resultados obtenidos utilizando los métodos empíricos de cálculo de socavación, con el resultado del modelo bidimensional, como se muestra en la tabla 5.

Tabla 5: Resultados obtenidos de socavación local obtenidos utilizando métodos empíricos y modelo bidimensional.

Método	Socavación [m]	
	Velocidad Media en sección transversal	Velocidad Máxima en subsección
Breusers, Nicollet y Shen (BNSh) (1977).	3.99	3.99
Yaroslatziev (1969).	9.14	12.95
Universidad estatal de colorado (CSU) (1995).	2.91	3.17
Modelo Bidimensional, con software DELFT 3D	-	7

4. CONCLUSIONES.

De los resultados de cálculo de socavación local en cepa utilizando los métodos empíricos, se tiene que el más conservador es el método de Yaroslatziev con una profundidad de socavación de 12.95 metros versus los métodos de BNSh y CSU para los cuales se obtiene una profundidad de socavación de 3.99 y 3.17 metros.

El modelo de socavación local usando el software DELFT 3D, arroja un valor de socavación de 7 metros, pero al no alcanzar a estabilizarse el flujo en el tiempo de 52 horas, no se logra establecer con seguridad si esa profundidad podría seguir aumentando. Lo más probable es que si, debido a que el diagrama de socavación alrededor de la cepa -que muestra el foso de erosión- (figura 13) no alcanza la forma esperada según lo mostrado en la figura 2.

Al correr la secuencia del modelo desde el tiempo 0 hasta 52 horas, se aprecia cómo se comienza formar la fosa de erosión, pero esta no llega al punto de equilibrio. En el modelo también se aprecia depositación alrededor de la cavidad de erosión, específicamente hacia aguas debajo de ella y por los costados.

De los resultados obtenidos del modelo de alturas y velocidades en el punto de estudio utilizando software HEC-RAS, se tiene que incluso para todos los periodos de retorno estudiados (2, 5, 10, 25, 50 y 100 años) la cepa queda sometida a una gran profundidad siendo la mínima ($T = 2$ años) de 4.16 metros con una velocidad de 1.63 [m/s].

Finalmente, al término de este estudio se cumplieron los objetivos en relación al cálculo de socavación local en una cepa aislada situada en un lecho arenoso. Pudiendo así, calcular la socavación local utilizando el software DELFT 3D mediante herramientas *thin dams* -zonas secas- que proporciona el programa. Para llevar a cabo esto, es necesario tener en consideración que debe refinar la grilla hasta lograr un tamaño lo suficientemente pequeño para manipularla manualmente y así darle la forma circular.

De la misma forma, se otorgaron valores de cota elevados sobre la grilla modificada y alrededor de ella se mantienen los valores del fondo del canal para que al interpolar la forma cilíndrica que adquiere la cepa. Luego de esto, se rodea utilizando la herramienta de zonas secas, para que así al llegar el flujo rodee la cepa,

de lo contrario la forma que se dio en la grilla sería arrastrada por el flujo y no se lograría identificar una cepa aislada en medio del canal.

Se observa que la máxima socavación local que se obtuvo con el modelo bidimensional -7 metros- se encuentra entre los valores obtenidos utilizando métodos empíricos de cálculo de socavación, de esta forma, se puede concluir que el modelo bidimensional puede ser validado, podría valer la pena calibrarlo para un estudio más detallado de cálculo de socavación local en cepas de puente en río con lecho arenoso.

7. REFERENCIAS.

Astorga Bustillos, F.R., & Campa Rodríguez, A. (2015). “Métodos Para el Cálculo de la Socavación Local en Pilas de Puentes”. *Tecnociencia Chihuahua*, Vol. IX Núm. 1. Enero-abril 2015, pp. 36-48.

Escobar González, M. (2013). *Cuantificación de la Erosión Local en el Río Biobío Debido al Nuevo Escenario Vial*. Concepción, junio 2013, p. 37.

Jiménez Pérez, F. G., Roldan Herrera, M.D., & Uribe Chávez, D. Y. (2006). *Reducción de la Socavación Local en Pilas Circulares Mediante el Uso de Rugosidades Artificiales*. México, pp. 50-55.

Manual de Carreteras (2002), Vol.3, Sección 3.707 Procedimientos y Técnicas de Hidráulica y Mecánica Fluvial.

Mery M., H. (2013). *Hidráulica Aplicada al Diseño de Obras*. Ril Editores. Santiago, Chile, pp. 104-112.

Rocha Felices, A. (2013). “Erosion en Pilares y Estribos de Puentes”. *Introducción a la Hidráulica de las Obras Viales*, Tercera Edición, Junio 2013, pp. 14-18.

Soberón Escandón, A. B. (2015). *Rastreo de la Crecida Máxima Registrada en el Río Biobío, Aplicado a la Verificación Hidráulica del Puente Llacolén, Región del Biobío*. Universidad de Chile, Santiago, Chile.