

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

CARRERA DE INGENIERIA CIVIL

**SIMULACIÓN DE UN CAUCE FLUVIAL PARA EL
ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA SECCIÓN DE
LAS PILAS DE LOS PUENTES EN PROCESOS DE
EROSIÓN O SEDIMENTACIÓN**

Previa a la obtención de Título de

INGENIERO CIVIL

ELABORADO POR:

VINICIO JAVIER PACHECO ARCINIEGAS

SANGOLQUI, Octubre del 2011

EXTRACTO / ABSTRACT

Una de las ramas de la hidráulica es la hidráulica fluvial, la cual básicamente estudia el comportamiento de los cauces de los ríos en épocas normales y en épocas de creciente. Uno de los ámbitos más importantes de esta rama de la ciencia es el estudio de los procesos erosivos o de sedimentación debido a factores externos como es la geometría de las pilas de los puentes las cuales se apoyan en los cauces de los ríos.

Con este proyecto y luego de la investigación científica se pretende conocer que secciones de las pilas de los puentes son los más recomendados tanto en ríos de llanura como en ríos de montaña.

One branch of Hydraulic is the River Hydraulics, which basically studies the behavior of the riverbeds in normal times and in times of floods. One of the most important areas of this branch of science is the study of erosion and sedimentation due to external factors such as the geometry of the bridges' piles which are based on the riverbeds.

As a result of this project and after the scientific investigation I expect to know which sections of the bridges' piles are the most recommended, either in Lowland Rivers or in Mountain Rivers.

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por el Señor **VINICIO JAVIER PACHECO ARCINIEGAS**, como requerimiento parcial a la obtención del título de **INGENIERO CIVIL**.

Sangolquí, Octubre del 2011

Ing. Miguel Araque
DIRECTOR

Ing. Eugenio Villacís
CODIRECTOR

DEDICATORIA

A mis padres, porque creyeron en mí y porque me sacaron adelante, dándome ejemplos dignos de superación y entrega. Va por ustedes, por lo que valen, porque admiro su fortaleza y por lo que han hecho de mí.

A mi esposa Diana, porque en gran parte gracias a ella, hoy puedo ver alcanzada mi meta, ya que siempre estuvo impulsándome en los momentos más difíciles de mi carrera, y porque el amor que siento por ella, fue lo que me hizo ir hasta el final.

A mis hermanas, Karla Paola y María Fernanda; por haber fomentado en mí el deseo de superación y el anhelo de triunfo en la vida, también va por ustedes ñañitas.

A mis amigos, a todos sin excepción, que vivieron conmigo buenos y malos momentos, ellos entienden claramente que esto es el resultado de muchos años de sacrificio. A mi amigo Ricardo Trujillo (†), con el que empezó este proyecto pero por voluntad de Dios dejó este mundo, siempre estarás en mi corazón y en mis pensamientos, esto es nuestro esfuerzo, siempre lo será.

Este lugar lo guardé especialmente para el amor de mi vida Emilia Alejandra, mi hija, esto y todo lo que hago es por ella, porque quiero que te sientas orgullosa de mí, porque me das alegría, porque sacas lo mejor de mí, va por ti mi amor.

Vinicio Javier Pacheco Arciniegas

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios, por haberme permitido llegar a este punto y darme salud y fortaleza para cumplir mis objetivos además de su infinito e incondicional amor.

Mil gracias a mis padres que me apoyaron siempre en todo proyecto que he emprendido y nunca pierden la fe en mí.

Gracias a Diana, mi esposa por haber sido tan comprensiva y paciente, por haber estado conmigo apoyándome y muchas veces aguantando situaciones difíciles, no podría haberlo hecho sin ella.

A mi tía Gardenia, mil palabras no bastarían para agradecerle su apoyo, su comprensión y sus consejos en los momentos difíciles, todo esto no hubiera sido posible sin su ayuda.

Gracias a todos y cada uno de los profesores de la Escuela Politécnica de Ejército que tuve la suerte de tener en mi formación como profesional, en especial gracias a mi Director y Codirector de Tesis Ing. Miguel Araque e Ing. Eugenio Villacís por su apoyo con su conocimiento y su incondicional colaboración.

Gracias a todos de corazón por haber formado parte de mi vida y de tener confianza en mí, incluso en los momentos más duros, mil gracias.

Vinicio Javier Pacheco Arciniegas

HOJA DE LEGALIZACIÓN DE FIRMAS

ELABORADO POR

Vinicio Javier Pacheco Arciniegas

COORDINADOR DE LA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

Ing. Jorge Zúñiga G.

SECRETARIO ACADÉMICO

Dr. Mario Lozada

Lugar y Fecha: _____

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO I: ASPECTOS TEÓRICOS EN MODELOS	1
1.1. Introducción	1
1.2. Similitud hidráulica	3
1.2.1. Similitud geométrica	4
1.2.2. Similitud cinemática	4
1.2.3. Similitud dinámica	6
1.3. Condiciones de similitud	7
1.4. Escala de modelos hidráulicos	9
1.5. Efectos de escala	10
1.6. Tipos de modelos hidráulicos	10
1.6.1. Modelo de fondo móvil	11
1.6.2. Modelo de fondo fijo	12
CAPÍTULO II: PLANTEAMIENTO Y CONSTRUCCIÓN DEL MODELO	13
2.1. Introducción	13
2.2. Necesidad del modelo hidráulico	14
2.3. Información requerida para el estudio del modelo	15
2.4. Similitud y selección de escala del modelo	15
2.5. Selección del material	16
2.6. Materiales de construcción	16
2.7. Descripción general del modelo	17
2.8. Instalaciones auxiliares	17
CAPÍTULO III: PRÁCTICAS DE LABORATORIO	19
3.1. Práctica No. 1	19
3.1.1. Pilas circulares	19
3.1.2. Líneas de flujo	20
3.1.3. Áreas de potencial socavación	21
3.1.4. Toma de datos	22
3.1.5. Interpretación de resultados	26
3.2. Práctica No. 2	27
3.2.1. Pilas cuadradas	27
3.2.2. Líneas de flujo	28
3.2.3. Áreas de potencial socavación	29
3.2.4. Toma de datos	30
3.2.5. Interpretación de resultados	34
3.3. Práctica No. 3	36

3.3.1. Pilas triangulares	36
3.3.2. Líneas de flujo	37
3.3.3. Áreas de potencial socavación	39
3.3.4. Toma de datos.....	40
3.3.5. Interpretación de resultados	45
3.4. Práctica No. 4	47
3.4.1. Pilas hexagonales.....	47
3.4.2. Líneas de flujo	48
3.4.3. Áreas de potencial socavación	49
3.4.4. Toma de datos.....	51
3.4.5. Interpretación de resultados	56
CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	59
4.1. Conclusiones.....	59
4.2. Recomendaciones.....	61
BIBLIOGRAFÍA	62
ANEXOS	63
A.1.- Simulador Cauce Fluvial, Material Acrílico	63
A.2.- Columnas Diferentes Secciones, Material Acrílico.....	63
A.3.- Tanque Almacenamiento de Agua, Material Plástico	64
A.4.- Mesa, Material Madera y Metal	64
A.5.- Bomba Hidráulica, 1 ½ HP de potencia	65
A.6.- Tubería y accesorios, material PVC	65
A.7.- Llave de purga y limpieza	66
A.8.- Instalaciones eléctricas para accionar la bomba	66
A.9.- Modelo en funcionamiento	67
A.10.- Vista General del Simulador Hidráulico.....	67

CAPÍTULO I: ASPECTOS TEÓRICOS EN MODELOS

1.1. Introducción

Los fenómenos hidráulicos que se presentan regularmente en el mundo son tan complejos que su comprensión y análisis total resulta difícil. Sin embargo se puede realizarlo de manera aproximada y lo más apegado a la realidad posible; uno de los instrumentos más poderosos de que se dispone para tratar de conocer y comprender el comportamiento del agua en la naturaleza y su interacción con el medio en general se encuentra en la investigación mediante los modelos matemáticos y los modelos físicos. Ambos se complementan.

Resulta muy difícil realizar un modelo exacto para comprender los fenómenos físicos; cuando se tienen obras de gran tamaño o con un impacto social importante, se realizan pequeños modelos físicos para así lograr una aproximación al comportamiento de una determinada obra en un cierto medio.

Un modelo es toda esquematización de la realidad hecha con fines de estudio. Todas las ciencias de los objetos reales trabajan con situaciones más o menos idealizadas que constituyen inevitablemente simplificaciones, en verdad deformaciones, de la realidad.

Los modelos de simulación hidráulica son una herramienta para representar de manera simplificada un aspecto de la naturaleza, obras construidas es ella de forma muy aproximada y didáctica, que con un modelo matemático no se lograría en su totalidad.

La dificultad en generar un modelo matemático se debe principalmente al comportamiento poco predecible y variable de un río, fenómenos muy comunes en un cauce fluvial, como la turbulencia, generan dificultades al generar un modelo analítico.

Para iniciar el análisis, primeramente es necesario el estudio del río y sus características. El río que está en la naturaleza es demasiado complejo para poderlo reproducir en un modelo matemático o físico. Se debe entonces imaginar un río más simplificado que el real y que es objeto de nuestro análisis. Difícilmente en un modelo podríamos reproducir las variaciones instantáneas del caudal líquido y del caudal sólido, de la sección transversal, de la pendiente y de todas y cada una de las características hidráulicas que un río posee. Por lo tanto nos fabricamos un río ideal, que es el que se estudia en un modelo, físico o matemático. De ahí que todos los datos arrojados y fórmulas no son para el río que existe en la naturaleza, sino para el río construido, el río ideal. Seguidamente es necesario simplificar y esquematizar la obra proyectada. En el modelo no se considera, por ejemplo, los problemas de estabilidad estructural y de abrasión. Si bien es cierto que las simplificaciones son inevitables, debemos ser plenamente conscientes de ellas para poder interpretar los resultados obtenidos en cualquier modelo.

Se puede hablar de dificultades cuando de un modelo de simulación se trata, su diseño, su tiempo de construcción, disponibilidad de espacio, recursos y disponibilidad de materiales. Sin embargo, un modelo de simulación facilita notablemente el entendimiento del fenómeno en análisis así como la obtención de resultados más confiables para cálculos

posteriores. Esto puede traer mayor tranquilidad a todos los actores que están envueltos en una obra, diseñadores, constructores y beneficiados.

Los modelos hidráulicos reducidos, permiten predecir de manera muy aproximada el comportamiento de las obras y así evitarnos futuras correcciones o reajustes, y sobre todo, catástrofes que lamentar por falta de datos confiables.

1.2. Similitud hidráulica

Existe similitud física entre dos estructuras, cauce fluvial y modelo por ejemplo, cuando existe una correspondencia constante e inequívoca entre las variables del mismo tipo. Conseguir esta similitud entre el río y el modelo hidráulico es imposible, ya que no solo se debe lograr una escala en las propiedades geométricas si no en todas las fuerzas que intervienen en dicho fenómeno. Sin embargo, el entendimiento del problema que se consigue mediante un modelo físico nos permitirá brindar soluciones claras y ajustadas a la realidad. Aunque las fuerzas que intervienen en el río no puedan ser reducidas en la misma escala al modelo, la fuerza dominante será la que describirá el comportamiento del prototipo.

Esto basado en la teoría de similitud, establecida por Kline: “Si dos sistemas obedecen al mismo grupo de ecuaciones y condiciones gobernantes, y si los valores de todos los parámetros y las condiciones se hacen idénticas, los dos sistemas deben de exhibir comportamientos similares con tal de que exista una solución única para el grupo de ecuaciones y condiciones”.

1.2.1. Similitud geométrica

Existe similitud geométrica cuando, de manera estricta, sea igual la relación de todas las longitudes homologas en dos sistemas.

Esta similitud se expresa, con la escala de líneas (l_e), que cuantifica el tamaño relativo de los dos sistemas. Se designa con p al prototipo y con m al modelo.

$$l_e = \frac{l_p}{l_m}$$

En algunos casos esta similitud puede darse solo en las dimensiones sobre planos horizontales y, las dimensiones verticales pueden quedar distorsionadas con otra escala de líneas como en el caso de los modelos de los ríos y los puertos., donde el conservar la misma escala de líneas en las tres direcciones significaría tener tirantes muy pequeños en los modelos.

Para el área y el volumen se tendrá, en un modelo no distorsionado:

$$A_e = \frac{A_p}{A_m} = l_e^2$$

$$v_e = A_e \cdot l_e = \frac{v_p}{v_m} = l_e^3$$

1.2.2. Similitud cinemática

Se garantiza la similitud cinemática en un flujo cuando las regiones donde ocurre tal flujo son geoméricamente similares.

Esa circunstancia se puede garantizar cuando las velocidades en puntos correspondientes del flujo son paralelas y guardan una proporción constante a través de todo el campo de flujo.

Es decir, que existe semejanza cinemática entre modelo y prototipo si:

- las trayectorias de partículas homólogas son geoméricamente semejantes;
- las relaciones entre las velocidades de las partículas homólogas son iguales.

Relaciones de velocidad, aceleración y caudal:

$$\frac{V_m}{V_p} = \frac{\frac{L_m}{T_m}}{\frac{L_p}{T_p}} = \frac{L_m \cdot T_p}{L_p \cdot T_m} = \frac{L_r}{T_r}$$

$$\frac{a_m}{a_p} = \frac{\frac{L_m}{T_m^2}}{\frac{L_p}{T_p^2}} = \frac{L_m \cdot T_p^2}{L_p \cdot T_m^2} = \frac{L_r}{T_r^2}$$

$$\frac{Q_m}{Q_p} = \frac{\frac{L_m^3}{T_m}}{\frac{L_p^3}{T_p}} = \frac{L_m^3 \cdot T_p}{L_p^3 \cdot T_m} = \frac{L_r^3}{T_r}$$

1.2.3. Similitud dinámica

La semejanza dinámica requiere que las masas y las fuerzas que actúan sobre las partículas de un fluido en el modelo y en el prototipo estén en proporción.

Una condición necesaria, pero no suficiente, para que se cumpla la semejanza dinámica es que deben cumplirse al mismo tiempo las semejanzas cinemática y geométrica. Sin embargo, no siempre es posible alcanzar las tres similitudes al mismo tiempo.

Considerando que las fuerzas que actúan sobre una partícula de fluido, expresadas en términos de las mismas unidades físicas, son:

- Inercia:

$$F_i = m \cdot a = \rho \cdot L^3 \cdot \frac{v^2}{L} = \rho \cdot L^2 \cdot v^2$$

- Gravedad:

$$F_g = m \cdot g = \rho \cdot L^3 \cdot g$$

- Viscosidad:

$$F_f = \tau \cdot A = \mu \cdot \frac{dv}{dy} \cdot L^2 = \mu \cdot \frac{v}{L} \cdot L^2 = \mu \cdot v \cdot L$$

- Tensión superficial:

$$F_s = \sigma \cdot L$$

- Presión:

$$F_p = p \cdot A = p \cdot L^2$$

- Elasticidad:

$$F_e = K \cdot A = K \cdot L^2$$

, donde ρ es la densidad del fluido, L es una dimensión de longitud, τ es la tensión tangencial, μ es la viscosidad dinámica, dy/dv es la velocidad diferencial a través de un espesor dy de fluido, σ es la tensión superficial, K es el módulo de elasticidad del fluido, a es la aceleración de una partícula de fluido, p es la presión media y A es el área sobre la que actúa dicha presión, se cumplirá que:

$$F_i = F_g + F_f + F_s + F_p + F_e$$

En sentido global, existirá semejanza dinámica entre el fluido del modelo y del prototipo si se cumple que:

$$\frac{(F_i)_m}{(F_i)_p} = \frac{(F_g + F_f + F_s + F_p + F_e)_m}{(F_g + F_f + F_s + F_p + F_e)_p}$$

1.3. Condiciones de similitud

En la modelación de sistemas a superficie libre, la gravedad, la viscosidad y la rugosidad del contorno son factores importantes, por tanto, es necesario satisfacer simultáneamente las leyes de Froude y de Reynolds.

En los movimientos asociados a un fluido de superficie libre, las fuerzas de inercia son principalmente equilibradas por las de gravedad, tal es el caso del flujo turbulento a superficie libre, donde los efectos viscosos son despreciables. Cuando esto ocurre se la llama la semejanza de

Froude, a medida que aumenta el número de Froude, mayor es la reacción inercial de cualquier fuerza; en tanto disminuye, mayor es el efecto de la fuerza gravitacional.

El número de Froude del modelo deberá ser, en lo posible, igual al del prototipo. Este número nos garantiza que exista la misma proporción entre la fuerza resultante del río y del modelo.

Dado que el proyecto es una simulación de un cauce fluvial a superficie libre, en el cual las fuerzas inerciales y gravitacionales son predominantes, se define que el criterio de similitud según Froude es el que rige el modelo.

$$Fr_m = Fr_p$$

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \cdot y}}$$

Dónde:

Fr_m = Froude Modelo

Fr_p = Froude Prototipo

V = Velocidad

g = Aceleración de la gravedad

y = Calado

1.4. Escala de modelos hidráulicos

Escogido un criterio de similitud se debe proceder a la determinación de las escalas del modelo. En la selección de las escalas intervienen numerosos factores. De un lado están las exigencias teóricas que nacen en el parámetro característico de la información, y, de otro, las circunstancias de tipo práctico vinculadas al laboratorio y a los objetivos de la investigación. El desarrollo de este tema escapa a los alcances de este proyecto, pero bastaría con recordar que una cierta escala, satisfactoria desde el punto de vista teórico, podría no ser compatible con las instalaciones de un determinado laboratorio. Por lo tanto, para la selección de escalas se requiere no sólo el conocimiento profundo de las circunstancias teóricas aplicables, sino también las vinculadas al laboratorio en el que se va a realizar la investigación, tales como espacio disponible, capacidad de bombas instaladas, precisión de los instrumentos existentes y muchos otros factores más. Entonces, resulta que un modelo podría estudiarse en un laboratorio con una determinada escala y en otro laboratorio con una escala diferente.

Un tema vinculado indirectamente a la selección de escalas es el correspondiente a la determinación de los límites del modelo. El establecimiento de las condiciones de frontera es sumamente importante y requiere de gran experiencia.

1.5. Efectos de escala

Resultado principal de las escalas escogidas, del tamaño y otras características del modelo, suele ocurrir que en el modelo aparezcan ciertos fenómenos que no corresponden a los que se presentan en la naturaleza. Estos fenómenos propios del modelo y de la escala escogida reciben el nombre de efectos de escala. Al respecto hay que tener cuidado, por ejemplo, con los fenómenos originados en la tensión superficial, propia del modelo y no del prototipo.

La confianza en el dimensionamiento de un modelo, en la técnica de mediciones y en los resultados experimentales crece con el tamaño del modelo. No obstante, el costo y las facilidades para el manejo de un modelo grande llegan a ser restricciones importantes. El encontrar un balance apropiado en cada modelo y en cada tipo de simulación forma parte del “arte” del investigador.

El criterio de similitud escogido, la selección de escalas, la determinación de los límites del modelo y la consideración de los efectos de escala son de primerísima importancia para interpretar adecuadamente los resultados del modelo.

1.6. Tipos de modelos hidráulicos

Los modelos fluviales pueden ser de varios tipos. Primero los modelos hidráulicos a escala pueden dividirse en no distorsionados y distorsionados. En los modelos hidráulicos no distorsionados se ocupa una escala única para todas las dimensiones.

Esto origina prototipos extremadamente grandes y costosos. Por otro lado se puede realizar los mismos análisis sobre un modelo con escala distorsionada que consisten en modelos con una diferente escala para cada dimensión.

Estos modelos resultan más económicos pero inducen a mayores pérdidas de energía, por lo cual sus resultados serán menos exactos que en un modelo sin distorsión.

Por otro lado estos modelos pueden ser de lecho fijo o de fondo móvil. Los de fondo fijo se usan cuando se estudia el comportamiento a corto plazo del río. Los modelos de fondo móvil se los usa cuando el fenómeno de erosión o transporte de sólidos es de suma importancia sobre una estructura.

1.6.1. Modelo de fondo móvil

Los modelos de lecho móvil o modelos fluviales. Son de lecho móvil, erosionable, y también reproducen un tramo extenso del río. El objetivo del modelo es por un lado las magnitudes hidráulicas y por el otro el comportamiento del fondo erosionable: erosiones, sedimentaciones, etc. El modelo debe representar correctamente la geometría y la rugosidad y debe emplear criterios de semejanza respecto al sedimento utilizado y respecto al caudal sólido.

En los modelos de obras locales en lecho móvil, de corta extensión y realizados para el estudio de fenómenos locales de la superficie libre y sobre todo del lecho, tal como la erosión local, se debe

reproducir correctamente la geometría y emplear criterios de semejanza respecto al sedimento.

1.6.2. Modelo de fondo fijo

En los modelos de estructuras hidráulicas, es decir, de obras de corta extensión, emplazadas en los ríos y estudiadas en sus características hidráulicas. El fondo es fijo, no erosionable; la preparación del modelo debe atender sobre todo a la correcta reproducción de la geometría.

Los modelos de lecho fijo o modelos hidráulicos de ríos, en sentido estricto, son de contornos o lecho fijo, no erosionable, y reproducen un tramo extenso del río. El objetivo del modelo es el estudio de las magnitudes hidráulicas: calados, velocidades, superficie inundada, etc. El modelo debe representar correctamente la geometría y la rugosidad fluvial.

CAPÍTULO II: PLANTEAMIENTO Y CONSTRUCCIÓN DEL MODELO

2.1. Introducción

En la hidráulica una de las ramas de estudio primordial es la hidráulica fluvial, la cual básicamente estudia el comportamiento de los cauces de los ríos en épocas normales y en épocas de creciente, además de la influencia de la intervención humana para aprovechamiento de sus recursos o la reducción de los riesgos de daños.

Uno de los ámbitos más importantes de esta rama de la ciencia es el estudio de los procesos erosivos o de sedimentación debido a factores externos introducidos por el hombre como es la geometría de las pilas de los puentes las cuales se apoyan en los cauces de los ríos.

Para todo esto se construye un modelo hidráulico, con el cual se ensayará de manera práctica la influencia que las pilas de las columnas de los puentes tienen sobre los cauces de los ríos en procesos de sedimentación y erosión.

Con este modelo hidráulico, y los resultados que se obtengan con los ensayos y prácticas de laboratorio se pretende conocer que secciones de las pilas de los puentes son los más recomendados tanto en ríos de llanura como en ríos de montaña, y de esta manera aportar con valores y datos concretos que beneficien a la comunidad en general.

2.2. Necesidad del modelo hidráulico

Para iniciar cualquier estudio es necesario tomar en cuenta la importancia que tiene la estructura de análisis, su costo, su configuración y ver las posibles consecuencias que su falla provocaría; se debe entonces pensar en una investigación en modelo.

Otro punto importante para inclinarnos a una investigación en modelo se da cuando el diseño presenta deficiencias en su base teórica, es insuficiente o no existe en su totalidad; esto es algo que se da regularmente.

Una investigación en modelo permite la visualización del comportamiento de la estructura en tres dimensiones y, muchas veces permite descubrir problemas que no habían sido tomados en cuenta durante el diseño en la parte teórica y de escritorio.

Pero además, se pone en consideración el valor económico que un modelo hidráulico suma a los gastos de un proyecto; se puede decir con seguridad que no es un rubro considerable en relación a los aportes y posibles ahorros que se dan a la obra en su costo total, pues es mejor resolver todos y cada uno de los problemas que se presenten en el modelo que cuando la obra esté construida.

El modelo permite la comprobación, o, a veces, el descubrimiento de factores muy relevantes en la realización de la obra.

Con todos estos puntos se llega a reforzar varios factores en el modelo que se reflejarán posteriormente en el grado de seguridad de la

estructura, que finalmente es el objetivo de cualquier estudio o análisis en cualquier área de la ciencia.

2.3. Información requerida para el estudio del modelo

Para la elaboración del presente modelo de simulación de cauce fluvial se tomaron en consideración algunos aspectos, principalmente la sección del cauce donde se desarrollarán los diferentes ensayos. Éste consiste en un tramo recto donde se modelará el cauce y la influencia del mismo sobre las diferentes pilas de puente, su forma y la respuesta que tienen a los procesos de sedimentación y erosión.

2.4. Similitud y selección de escala del modelo

La escala que se debe adoptar para la realización del modelo hidráulico debe permitir observar claramente el fenómeno hidráulico que se investiga, no debe ser muy pequeña. Una escala muy reducida provocaría dificultad en el investigador, en la apreciación de los eventos en el modelo y en tomar medidas apropiadas para el trabajo de investigación que realiza. Por otro lado una escala muy grande puede facilitar significativamente estos aspectos pero, hace que el modelo sea excesivamente costoso.

Se tomaron en cuenta recomendaciones de expertos, docentes que han trabajado previamente en este tipo de proyectos en otras ocasiones, además de recopilaciones bibliográficas, artículos y se determinó que

un modelo con escala de 1:18 es la mejor alternativa para el desarrollo del presente proyecto.

Se tomó en cuenta para la selección de escala un factor muy importante además de los ya citados, como es la disponibilidad de espacio y las dimensiones de las instalaciones del Laboratorio de Hidráulica en la Escuela Politécnica del Ejercito, que es donde el modelo se instalará y servirá de apoyo didáctico para los estudiantes.

2.5. Selección del material

Por tratarse de un simulador no basado en ningún cauce natural, el material no se define partiendo de las características naturales de éste, sin embargo se busca que el modelo cubra las características más generales de un cauce como tal, independientemente del tipo de río que se esté analizando. Partiendo de ésta premisa se buscó el material más adecuado para la elaboración del simulador de cauce.

Basado en modelos similares, en la disponibilidad del material, su fácil instalación y de ser el caso, su reparación inmediata, se ha definido como material principal para la elaboración del modelo hidráulico al acrílico transparente.

2.6. Materiales de construcción

Todos los elementos del modelo; fijos como el canal que simula el cauce fluvial, y móviles como las columnas de diferentes secciones, fueron

construidas con acrílico transparente, el cual posee una rugosidad de Manning de 0,0085. La mesa en donde se instaló el modelo es de estructura en metal y madera. Las tuberías son de policloruro de vinilo de 1", accesorios como codos, universales, adaptadores, reducciones, acoples son también de policloruro de vinilo (PVC), las instalaciones eléctricas son hechas con conductores tipo UF-NMC con cobre de temple suave, están además aislados con una capa uniforme de material termoplástico Cloruro de Polivinilo (PVC) resistente a la humedad, para garantizar una buena conducción eléctrica hacia la bomba.

2.7. Descripción general del modelo

El modelo consta de una mesa metálica con madera de dos niveles, en el nivel inferior se encuentra el tanque de almacenamiento de agua, una bomba de 1 ½ hp, instalaciones y tuberías. En el segundo nivel se halla el modelo en acrílico, con sus respectivos elementos, canal, puente, columnas, y desfogue de agua. El modelo se ha elaborado de manera tal que el agua recircula constantemente evitando así el desperdicio de agua en cualquier etapa de su uso. Las columnas de acrílico son móviles, para poder cambiar la sección del tipo de columna con mayor facilidad.

2.8. Instalaciones auxiliares

El modelo también dispone de instalaciones auxiliares como son la instalación eléctrica que provee de energía a la bomba que permite la

circulación del agua en el cauce, y una llave de desfogue de limpieza en el fondo del tanque de almacenamiento de agua para eventuales limpiezas y mantenimiento del modelo.

CAPÍTULO III: PRÁCTICAS DE LABORATORIO

3.1. Práctica No. 1

3.1.1. Pilas circulares

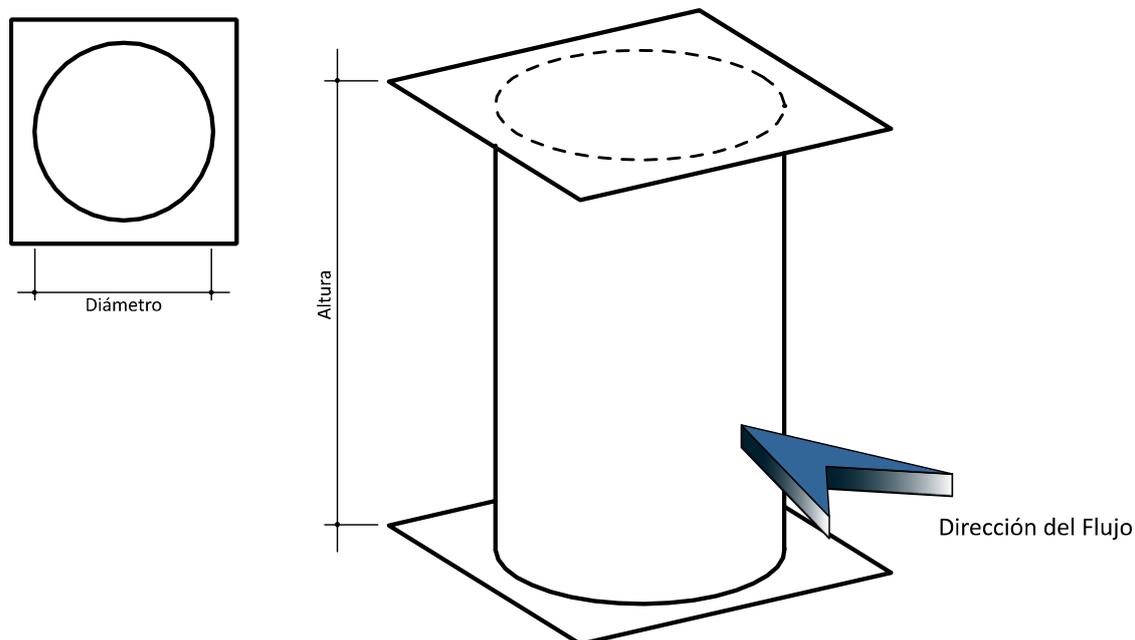
Para esta práctica se emplea la columna con sección circular, con las siguientes características:

Diámetro: 11.5 cm

Altura: 30 cm

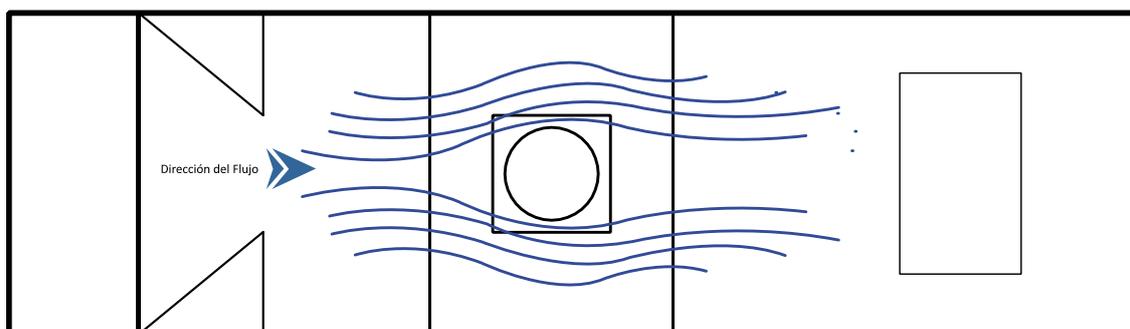
Posición: Única

Esquema:



- Para comenzar la práctica poner en funcionamiento el modelo con los elementos y accesorios. Medir la longitud del tramo a analizar, L.

- Establecida la condición de trabajo, calcular área de la sección del canal, velocidad del flujo, tiempo y caudal.
- Para el caudal establecido, ubicar la columna con la sección a analizar, en este caso circular, y observar el fenómeno que se presenta sobre este tipo de columna.
- Hacer el análisis en planta y en corte (vista lateral del modelo) para apreciar con mayor detalle la acción del flujo sobre la pared de la columna circular.



3.1.2. Líneas de flujo

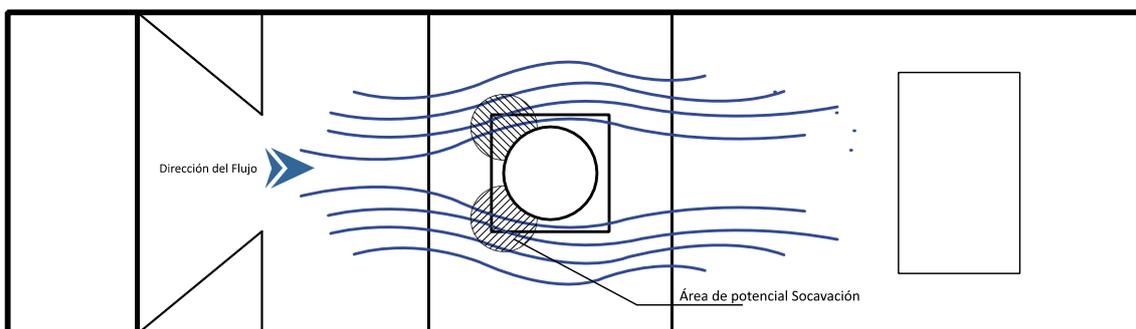
La forma circular de la columna permite que se formen líneas de flujo muy similares a las mostradas en el gráfico. La sección circular hace que la formación de vórtices sean mínimos que no influyen aparentemente sobre la pila y su cimentación, sin embargo no se los puede dejar pasar por alto o restarles importancia.

3.1.3. Áreas de potencial socavación

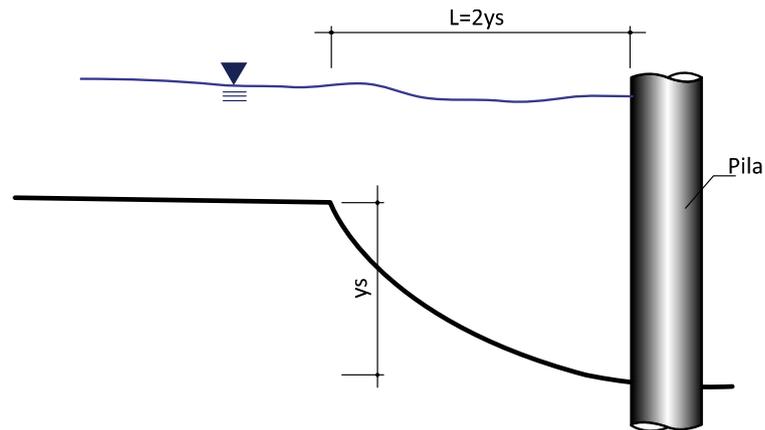
El primer dato reconocible es apreciar donde se producirá la afectación de la influencia del río sobre la pila y directamente en el suelo de cimentación.

El área de potencial socavación depende principalmente de la sección de la pila y visualmente se aprecia fácilmente, tanto en la superficie del fluido como en la vista lateral de la pared del simulador de cauce.

No existe definida una fórmula para calcular con exactitud el área de potencial socavación, sin embargo por la forma espiral de los vórtices que se forman al contacto con las paredes de la pila, se asume que el área tiene forma elíptica tendiendo a circular.



Según el Dr. Ing. Arturo Roche Felices, en su publicación de enero del año 2010, titulada “Erosión en Pilares y Estribos de Puentes”, la extensión que alcanza en planta, la potencial socavación se puede definir como dos veces la profundidad máxima de socavación en la pila analizada.



3.1.4. Toma de datos

La nomenclatura empleada para la toma de datos y cálculos se presenta a continuación:

- A: Ancho del Canal [m]
- L1: Longitud de Análisis [m]
- g: gravedad [9.81 m/seg²]
- y_s: profundidad de socavación local [m]
- h: profundidad del flujo directamente aguas arriba de la pila
- k₁: factor de corrección que tiene en cuenta la forma de la pila
- k₂: factor de corrección que tiene en cuenta el ángulo de ataque del flujo
- k₃: factor de corrección por la forma del lecho
- k₄: factor de corrección por acorazamiento del sedimento del lecho
- D: ancho de la pila [m]
- L: longitud de la pila [m]
- Fr: número de Froude en la sección directamente aguas arriba de la pila

V: velocidad media del flujo directamente aguas arriba de la pila [m/s]

Se presentan también las fórmulas empleadas para la obtención de los datos y resultados.

Cálculo de Velocidad

$$V = \frac{Ll}{t}$$

Cálculo de Caudal

$$Q = V \cdot A \cdot y$$

Cálculo de Número de Froude

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \cdot y}}$$

Cálculo de Profundidad de Socavación

Se realizaron cálculos de profundidad de socavación con tres diferentes fórmulas; Shen, Laursen y con la fórmula de Colorado State University (CSU),

$$Shen = 1.17(D)^{0.62} \cdot V^{0.62}$$

$$Laursen = 1.11(D)^{0.5} \cdot h^{0.5}$$

, se muestran los resultados de las tres fórmulas, pero por ser más completa y tomar en cuenta factores importantes se ha preferido trabajar con los resultados de Colorado State University (CSU)

$$\frac{y_s}{h} = 2 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot \left(\frac{D}{h}\right)^{0.65} \cdot Fr^{0.43}$$

Cálculo de Extensión de la Socavación

$$Ls = 2 \cdot ys$$

Los factores de corrección k_1 , k_2 , k_3 y k_4 son exclusivamente para el cálculo de la profundidad de socavación local en la pila de sección planteada.

El factor de corrección k_1 se refiere a la influencia de la forma de la sección transversal del pilar en la socavación producida. La más frecuente es la sección circular para la que k_1 es igual a 1.

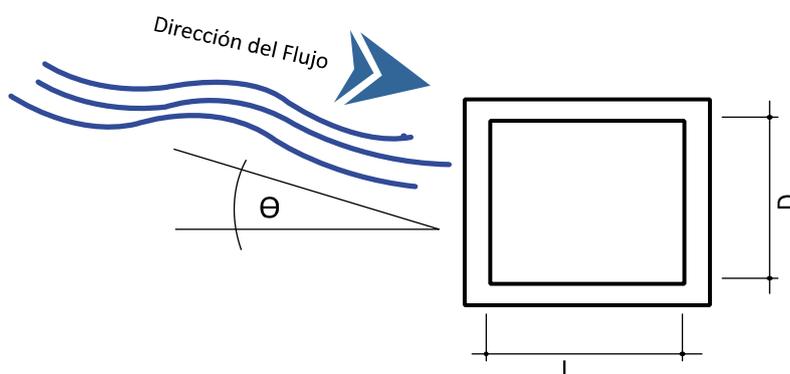
A medida que el perfil sea más hidrodinámico disminuye, aunque sea levemente, la intensidad de la erosión local. En una sección rectangular el valor de k_1 es igual a 1.1, para una relación L/D igual a 2. A continuación se presentan los factores de corrección que se tomaron de acuerdo a la sección de las pilas.

Forma de la Pila	k_1
Circular	1
Cuadrada	1.1
Triangular	0.9
Hexagonal	1.1

El factor de corrección k_2 es muy importante y se refiere a la influencia del ángulo de ataque de la corriente. Esta influencia no se da en las secciones circulares, puesto que son simétricas en todas direcciones.

En cambio, por ejemplo, en los pilares de sección rectangular, la influencia del ángulo de ataque en la socavación puede ser muy fuerte en la medida en la que el ángulo sea mayor y en la que lo sea la relación entre la longitud L del pilar a lo largo de la corriente y el ancho D del pilar, transversal a la corriente.

Se presenta valores del factor de corrección k2 en función del ángulo de ataque theta y de la relación L/D.



$$k_2 = \left(\cos \theta + \frac{L}{D} \sin \theta \right)^{0.65}$$

Ángulo de ataque	L/D = 4	L/D = 8	L/D = 12
0°	1	1	1
15°	1.5	2	2.5
30°	2	2.75	3.5
45°	2.3	3.3	4.3
90°	2.5	3.9	5

Si L/D es mayor que 12, se usan los valores correspondientes a L/D= 12 como máximos.

El factor de corrección k3 se refiere a la condición del lecho, específicamente a la fase del transporte sólido por influencia de las dunas. Cuando el transporte de fondo es inexistente o se produce con un lecho plano, o con dunas de pequeña altura,

comprendida entre 0,60 y 3 m el valor de k_3 es igual a 1,1. Para dunas de altura mediana, comprendida entre 3 y 10, el valor de k_3 varía entre 1,1 y 1,2. Para dunas grandes, mayores 10 m, el valor de k_3 es de 1,3. Se recomienda usar un valor de k_3 de 1.1 considerando que el lecho tiende a ser plano durante crecientes.

El factor de corrección k_4 disminuye la profundidad de socavación por acorazamiento del hueco de socavación para materiales del lecho con D_{50} mayor o igual que 2 mm o D_{95} mayor o igual que 20 mm ($D_{50} \geq 0.002$ m o $D_{95} \geq 0.02$ m). El factor de corrección k_4 es igual o menor que 1. En una situación extrema puede ser tan bajo como 0.4,

3.1.5. Interpretación de resultados

DATOS

Simulador Cauce Fluvial
 y: 0.0325 m
 A: 0.4 m
 L1: 0.46 m

CALCULOS

CALCULO DE TIEMPO
 Tiempo en recorrer una partícula una $L=0.46$ m 2.55267 seg

Columna

D: 0.115 m
 k1: 1
 k2: 1
 k3: 1.1
 k4: 1

CALCULO DE CAUDAL

Área Sección Canal: 0.013 m²
 Velocidad: 0.1802 m/seg
 CAUDAL: 0.00234 m³/seg
 2.34265 lt/seg
 FROUDE: 0.31914

Medición de Tiempo (seg)

UBICACION		
Izquierdo	Centro	Derecho
3.08	2.25	2.08
3.48	2.70	2.15
3.51	2.13	2.34
3.09	2.58	2.05
2.44	2.10	2.31

CALCULO DE PROFUNDIDAD DE SOCAVACION [ys]

Formula de Shen	0.106 m
Formula de Laursen	0.068 m
Formula de Colorado State University (CSU)	0.099 m

CALCULO DE EXTENSION DE LA SOCAVACION [Ls]

Formula Dr. Ing. Arturo Roche Felices	0.199 m
---------------------------------------	----------------

Después de haber realizado los cálculos necesarios, se observa que la profundidad de socavación máxima es de 0.099 m según CSU. La Extensión de la Socavación es de 0.199 m.

3.2. Práctica No. 2

3.2.1. Pilas cuadradas

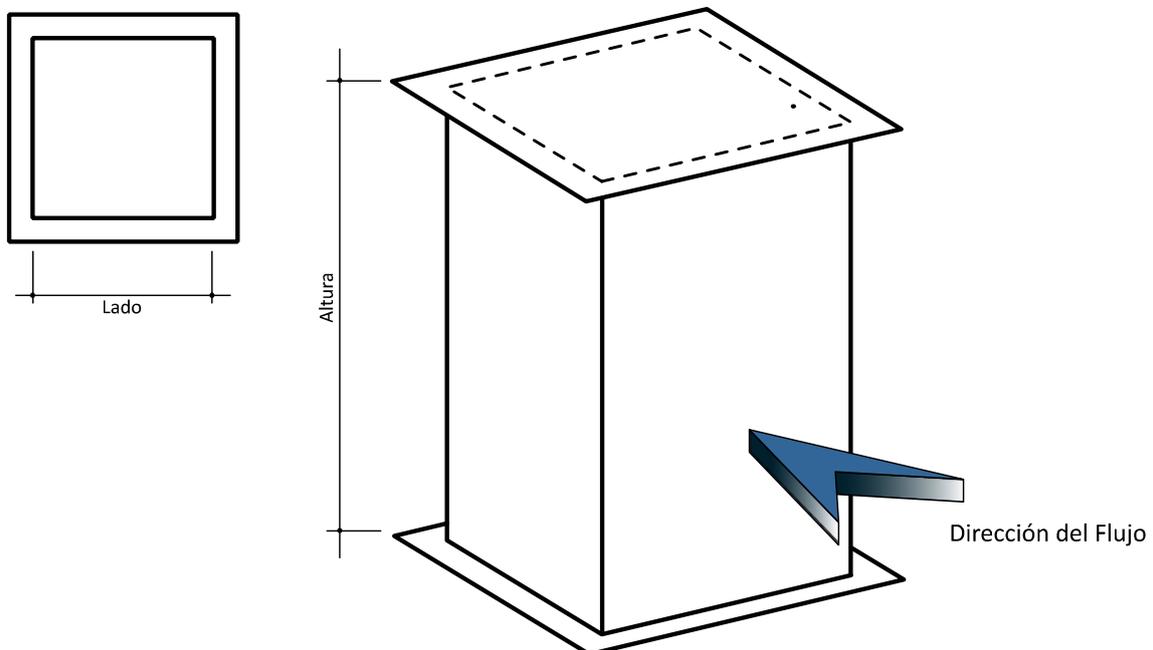
Para esta práctica se emplea la columna con sección circular, con las siguientes características:

Diámetro: 11.5 cm

Altura: 30 cm

Posición: Única

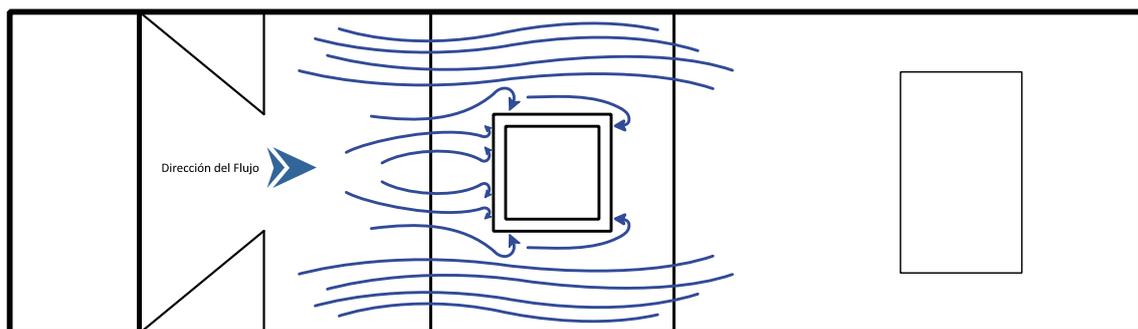
Esquema:



- Para comenzar la práctica poner en funcionamiento el modelo con los elementos y accesorios. Medir la longitud del tramo a analizar, L.

- Establecida la condición de trabajo, calcular área de la sección del canal, velocidad del flujo, tiempo y caudal.
- Para el caudal establecido, ubicar la columna con la sección a analizar, en este caso cuadrada, y observar el fenómeno que se presenta sobre este tipo de columna.
- Hacer el análisis en planta y en corte (vista lateral del modelo) para apreciar con mayor detalle la acción del flujo sobre la pared de la columna cuadrada.

3.2.2. Líneas de flujo



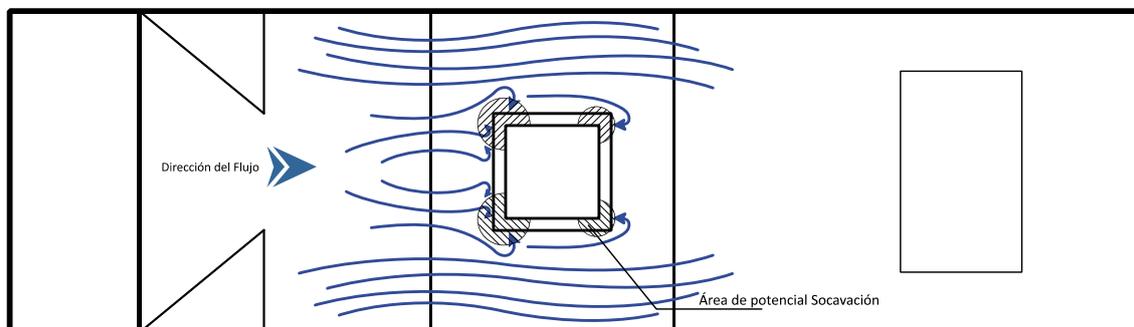
La forma cuadrada de la columna permite que se formen líneas de flujo muy similares a las mostradas en el gráfico. La sección cuadrada hace que la formación de vórtices sea tanto en la pared normal al flujo como en los vértices. El mayor desgaste de material de cimentación se produce en la pared anterior de la columna que tiene contacto directo con el flujo como se puede apreciar.

3.2.3. Áreas de potencial socavación

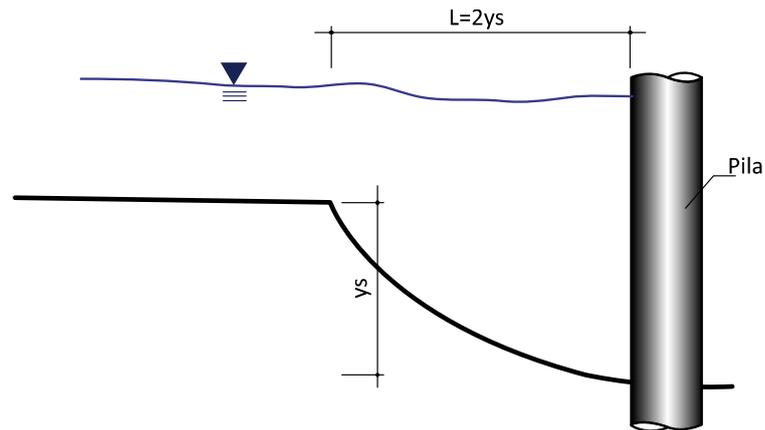
El primer dato reconocible es apreciar donde se producirá la afectación de la influencia del río sobre la pila y directamente en el suelo de cimentación.

El área de potencial socavación depende principalmente de la sección de la pila y visualmente se aprecia fácilmente, tanto en la superficie del fluido como en la vista lateral de la pared del simulador de cauce.

No existe definida una fórmula para calcular con exactitud el área de potencial socavación, sin embargo por la forma espiral de los vórtices que se forman al contacto con las paredes de la pila, se asume que el área tiene forma elíptica tendiendo a circular.



Según el Dr. Ing. Arturo Roche Felices, en su publicación de enero del año 2010, titulada "Erosión en Pilares y Estribos de Puentes", la extensión que alcanza en planta, la potencial socavación se puede definir como dos veces la profundidad máxima de socavación en la pila analizada.



3.2.4. Toma de datos

La nomenclatura empleada para la toma de datos y cálculos se presenta a continuación:

- A: Ancho del Canal [m]
- L1: Longitud de Análisis [m]
- g: gravedad [9.81 m/seg²]
- y_s: profundidad de socavación local [m]
- h: profundidad del flujo directamente aguas arriba de la pila
- k₁: factor de corrección que tiene en cuenta la forma de la pila
- k₂: factor de corrección que tiene en cuenta el ángulo de ataque del flujo
- k₃: factor de corrección por la forma del lecho
- k₄: factor de corrección por acorazamiento del sedimento del lecho
- D: ancho de la pila [m]
- L: longitud de la pila [m]
- Fr: número de Froude en la sección directamente aguas arriba de la pila

V: velocidad media del flujo directamente aguas arriba de la pila [m/s]

Se presentan también las fórmulas empleadas para la obtención de los datos y resultados

Cálculo de Velocidad

$$V = \frac{Ll}{t}$$

Cálculo de Caudal

$$Q = V \cdot A \cdot y$$

Cálculo de Número de Froude

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \cdot y}}$$

Cálculo de Profundidad de Socavación

Se realizaron cálculos de profundidad de socavación con tres diferentes fórmulas; Shen, Laursen y con la fórmula de Colorado State University (CSU),

$$Shen = 1.17(D)^{0.62} \cdot V^{0.62}$$

$$Laursen = 1.11(D)^{0.5} \cdot h^{0.5}$$

, se muestran los resultados de las tres fórmulas, pero por ser más completa y tomar en cuenta factores importantes se ha preferido trabajar con los resultados de Colorado State University (CSU)

$$\frac{y_s}{h} = 2 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot \left(\frac{D}{h}\right)^{0.65} \cdot Fr^{0.43}$$

Cálculo de Extensión de la Socavación

$$L_s = 2 \cdot y_s$$

Los factores de corrección k_1 , k_2 , k_3 y k_4 son exclusivamente para el cálculo de la profundidad de socavación local en la pila de sección planteada.

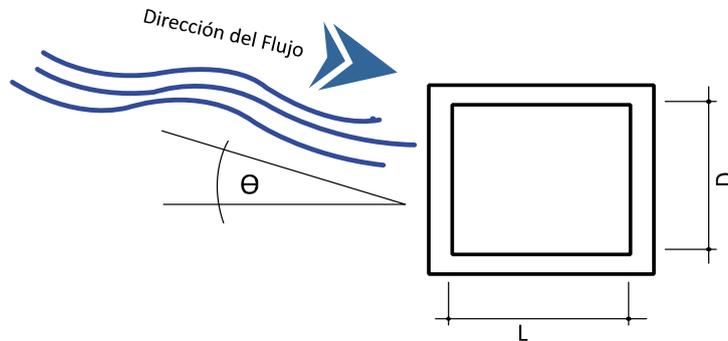
El factor de corrección k_1 se refiere a la influencia de la forma de la sección transversal del pilar en la socavación producida. La más frecuente es la sección cuadrada para la que k_1 es igual a 1. A medida que el perfil sea más hidrodinámico disminuye, aunque sea levemente, la intensidad de la erosión local. En una sección rectangular el valor de k_1 es igual a 1.1, para una relación L/D igual a 2. A continuación se presentan los factores de corrección que se tomaron de acuerdo a la sección de las pilas.

Forma de la Pila	k_1
Circular	1
Cuadrada	1.1
Triangular	0.9
Hexagonal	1.1

El factor de corrección k_2 es muy importante y se refiere a la influencia del ángulo de ataque de la corriente. Esta influencia no se da en las secciones circulares, puesto que son simétricas en todas direcciones.

En cambio, por ejemplo, en los pilares de sección rectangular, la influencia del ángulo de ataque en la socavación puede ser muy fuerte en la medida en la que el ángulo sea mayor y en la que lo sea la relación entre la longitud L del pilar a lo largo de la corriente

y el ancho D del pilar, transversal a la corriente. Se presenta valores del factor de corrección k2 en función del ángulo de ataque theta y de la relación L/D.



$$k_2 = \left(\cos \theta + \frac{L}{D} \sin \theta \right)^{0.65}$$

Ángulo de ataque	L/D = 4	L/D = 8	L/D = 12
0°	1	1	1
15°	1.5	2	2.5
30°	2	2.75	3.5
45°	2.3	3.3	4.3
90°	2.5	3.9	5

Si L/D es mayor que 12, se usan los valores correspondientes a L/D= 12 como máximos.

El factor de corrección k3 se refiere a la condición del lecho, específicamente a la fase del transporte sólido por influencia de las dunas. Cuando el transporte de fondo es inexistente o se produce con un lecho plano, o con dunas de pequeña altura, comprendida entre 0,60 y 3 m el valor de k3 es igual a 1,1. Para dunas de altura mediana, comprendida entre 3 y 10, el valor de k3 varía entre 1,1 y 1,2. Para dunas grandes, mayores 10 m, el valor

de k_3 es de 1,3. Se recomienda usar un valor de k_3 de 1.1 considerando que el lecho tiende a ser plano durante crecientes.

El factor de corrección k_4 disminuye la profundidad de socavación por acorazamiento del hueco de socavación para materiales del lecho con D_{50} mayor o igual que 2 mm o D_{95} mayor o igual que 20 mm ($D_{50} \geq 0.002$ m o $D_{95} \geq 0.02$ m). El factor de corrección k_4 es igual o menor que 1. En una situación extrema puede ser tan bajo como 0.4,

3.2.5. Interpretación de resultados

DATOS

Simulador Cauce Fluvial

y: 0.0325 m

A: 0.4 m

L1: 0.46 m

Columna

D: 0.115 m

k1: 1.1

k2: 1

k3: 1.1

k4: 1

CALCULOS

CALCULO DE TIEMPO

Tiempo en recorrer una 2.55267 seg

partícula una $L=0.46$ m

CALCULO DE CAUDAL

Área Sección Canal: 0.013 m²

Velocidad: 0.1802 m/seg

CAUDAL: 0.00234 m³/seg

2.34265 lt/seg

FROUDE: 0.31914

Medición de Tiempo (seg)

CALCULO DE PROFUNDIDAD DE SOCAVACION [ys]

UBICACION

Formula de Shen 0.106 m

	Izquierdo	Centro	Derecho		
				Formula de Laursen	0.068 m

	3.08	2.25	2.08		
				Formula de Colorado State University (CSU)	0.109 m

	3.48	2.70	2.15		
--	------	------	------	--	--

	3.51	2.13	2.34		
				CALCULO DE EXTENSION DE LA SOCAVACION [Ls]	

	3.09	2.58	2.05		
				Formula Dr. Ing. Arturo Roche Felices	0.219 m

	2.44	2.10	2.31		
--	------	------	------	--	--

Después de haber realizado los cálculos necesarios, se observa que la profundidad de socavación máxima es de 0.109 m según CSU. La Extensión de la Socavación es de 0.219 m.

3.3. Práctica No. 3

3.3.1. Pilas triangulares

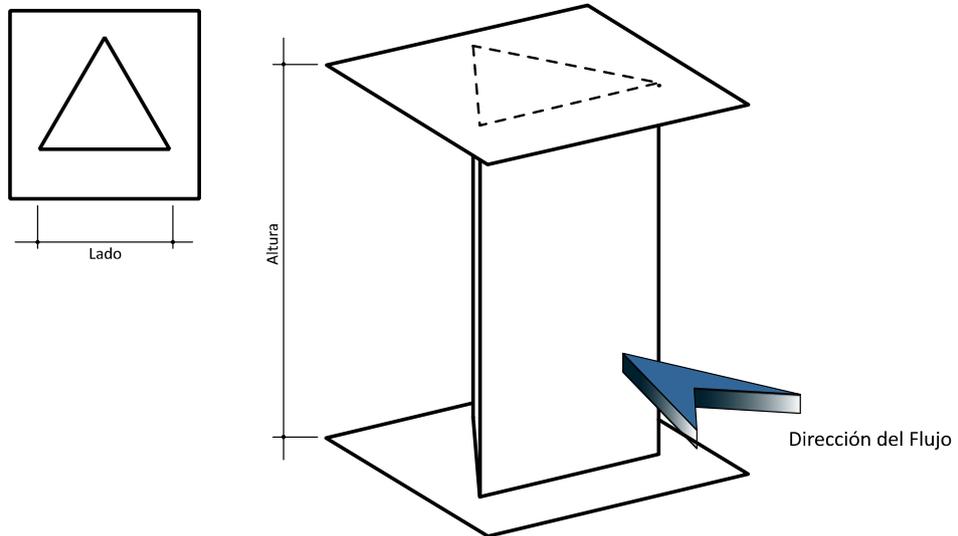
Para esta práctica se emplea la columna con sección triangular,
con las siguientes características:

Lado: 12.5 cm

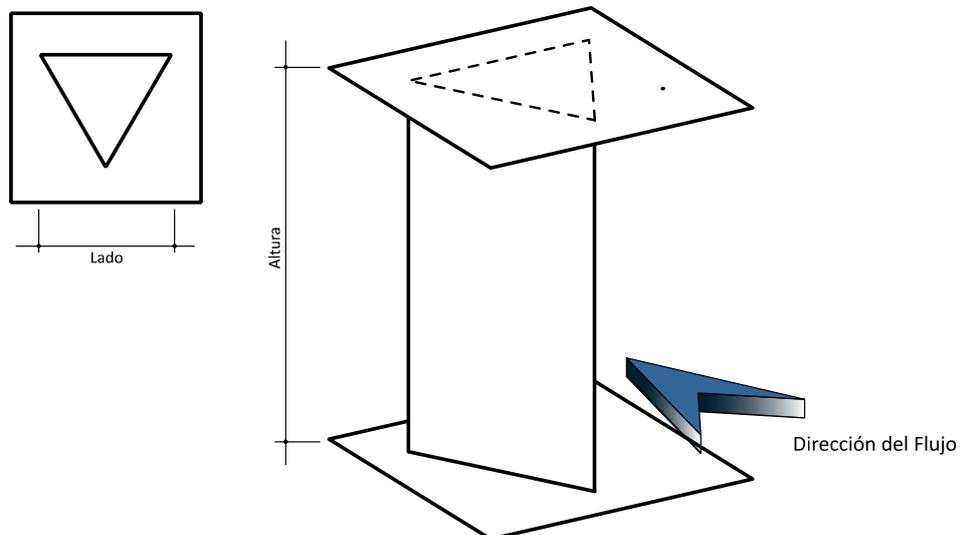
Altura: 30 cm

Posición: 1) Lado Normal al fluido 2) Vértice al Fluido

Esquema 1:



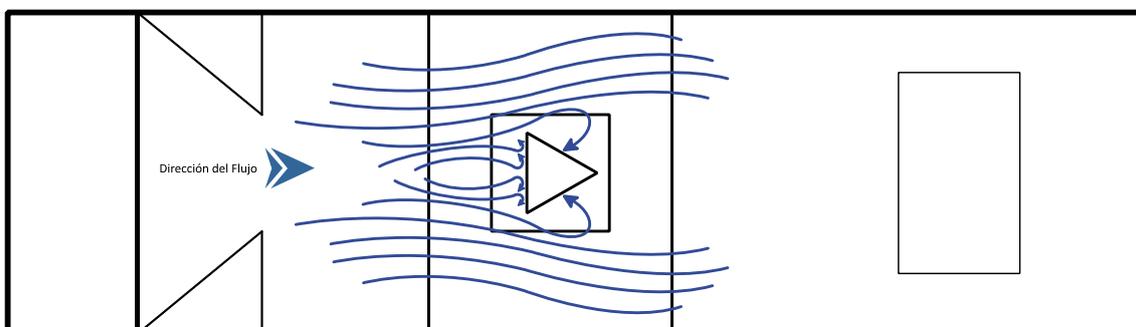
Esquema 2:



- Para comenzar la práctica poner en funcionamiento el modelo con los elementos y accesorios. Medir la longitud del tramo a analizar, L.
- Establecida la condición de trabajo, calcular área de la sección del canal, velocidad del flujo, tiempo y caudal.
- Para el caudal establecido, ubicar la columna con la sección a analizar, en este caso triangular como se muestra en el esquema 1, con un lado perpendicular al flujo, y observar el fenómeno que se presenta sobre este tipo de columna; de igual manera con la posición del esquema 2 con el vértice alineado al flujo
- Hacer el análisis en planta y en corte (vista lateral del modelo) para apreciar con mayor detalle la acción del flujo sobre la pared de la columna triangular.

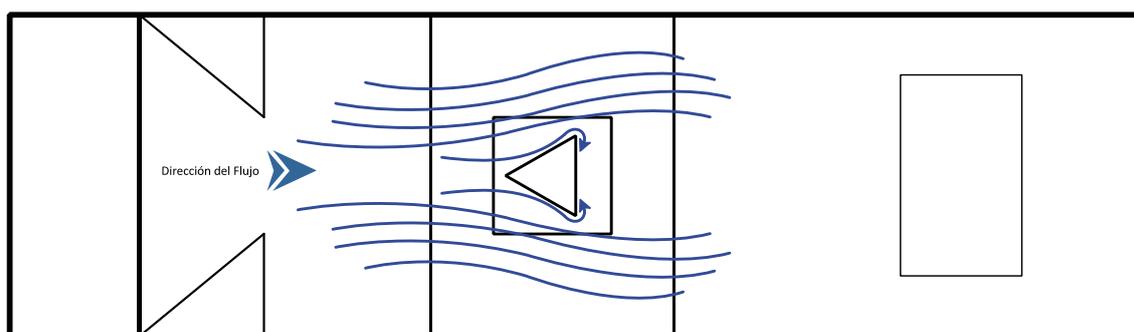
3.3.2. Líneas de flujo

Esquema 1:



La forma triangular de la columna y la posición adoptada permite que se formen líneas de flujo muy similares a las mostradas en el gráfico. La sección triangular hace que la formación de vórtices sea muy notoria en la parte posterior de la columna sobre los dos lados no expuestos al fluido directamente. Similar a la columna cuadrada, la pared que recibe directamente el flujo, presenta vórtices de menor magnitud pero que representan un problema en el suelo de cimentación.

Esquema 2:



La sección triangular hace que la formación de vórtices sea muy notoria en los vértices posteriores de la columna. La forma triangular y la posición planteada con el vértice apuntando en línea opuesta a la dirección del flujo, hace que el fluido no cause mayor daño a la pila, sin embargo se aprecia que hay presencia de turbulencia por lo que se requieren analizarlo para evitar problemas en el sector afectado.

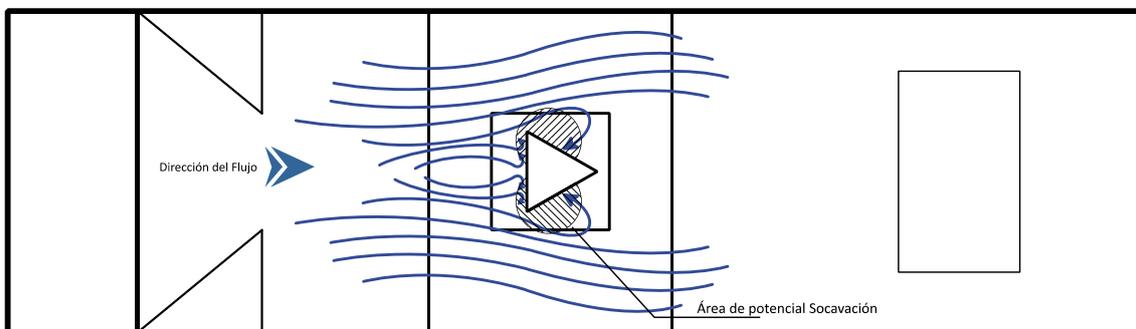
3.3.3. Áreas de potencial socavación

El primer dato reconocible es apreciar donde se producirá la afectación de la influencia del río sobre la pila y directamente en el suelo de cimentación.

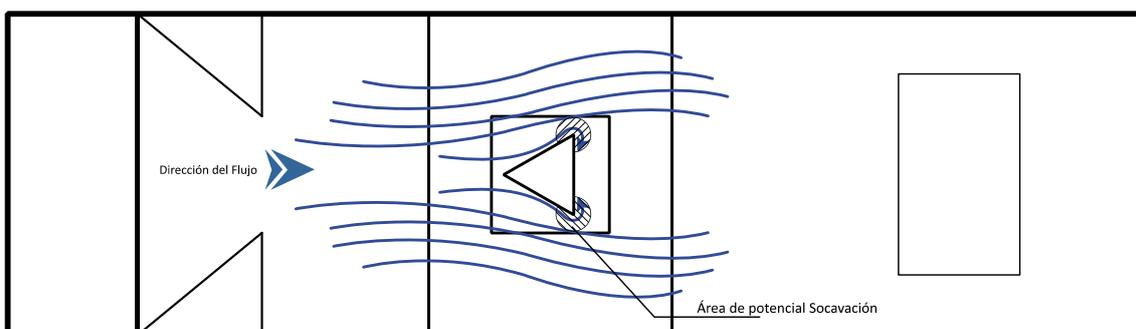
El área de potencial socavación depende principalmente de la sección de la pila y visualmente se aprecia fácilmente, tanto en la superficie del fluido como en la vista lateral de la pared del simulador de cauce.

No existe definida una fórmula para calcular con exactitud el área de potencial socavación, sin embargo por la forma espiral de los vórtices que se forman al contacto con las paredes de la pila, se asume que el área tiene forma elíptica tendiendo a circular.

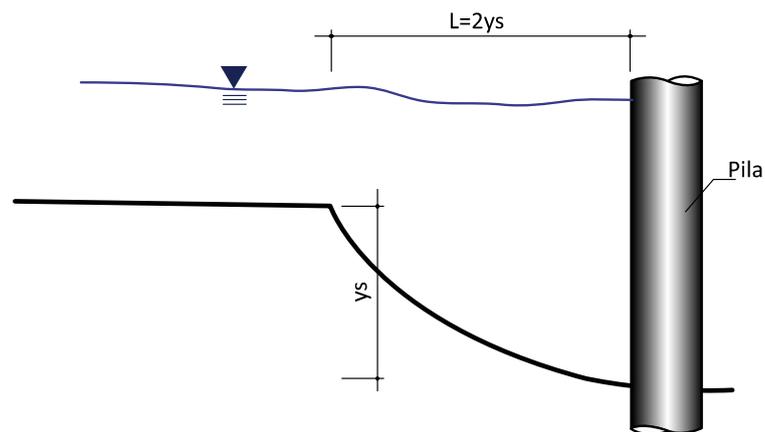
Esquema 1:



Esquema 2:



Según el Dr. Ing. Arturo Roche Felices, en su publicación de enero del año 2010, titulada “Erosión en Pilares y Estribos de Puentes”, la extensión que alcanza en planta, la potencial socavación se puede definir como dos veces la profundidad máxima de socavación en la pila analizada.



3.3.4. Toma de datos

La nomenclatura empleada para la toma de datos y cálculos se presenta a continuación:

- A: Ancho del Canal [m]
- L1: Longitud de Análisis [m]
- g: gravedad [9.81 m/seg²]
- ys: profundidad de socavación local [m]
- h: profundidad del flujo directamente aguas arriba de la pila
- k1: factor de corrección que tiene en cuenta la forma de la pila
- k2: factor de corrección que tiene en cuenta el ángulo de ataque del flujo
- k3: factor de corrección por la forma del lecho

- k4: factor de corrección por acorazamiento del sedimento del lecho
- D: ancho de la pila [m]
- L: longitud de la pila [m]
- Fr: número de Froude en la sección directamente aguas arriba de la pila
- V: velocidad media del flujo directamente aguas arriba de la pila [m/s]

Se presentan también las fórmulas empleadas para la obtención de los datos y resultados.

Cálculo de Velocidad

$$V = \frac{Ll}{t}$$

Cálculo de Caudal

$$Q = V \cdot A \cdot y$$

Cálculo de Número de Froude

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \cdot y}}$$

Cálculo de Profundidad de Socavación

Se realizaron cálculos de profundidad de socavación con tres diferentes fórmulas; Shen, Laursen y con la fórmula de Colorado State University (CSU),

$$Shen = 1.17(D)^{0.62} \cdot V^{0.62}$$

$$Laursen = 1.11(D)^{0.5} \cdot h^{0.5}$$

, se muestran los resultados de las tres fórmulas, pero por ser más completa y tomar en cuenta factores importantes se ha preferido trabajar con los resultados de Colorado State University (CSU)

$$\frac{y_s}{y} = 2 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot \left(\frac{D}{y}\right)^{0.65} \cdot Fr^{0.43}$$

Cálculo de Extensión de la Socavación

$$L_s = 2 \cdot y_s$$

Los factores de corrección k_1 , k_2 , k_3 y k_4 son exclusivamente para el cálculo de la profundidad de socavación local en la pila de sección planteada.

El factor de corrección k_1 se refiere a la influencia de la forma de la sección transversal del pilar en la socavación producida. La más frecuente es la sección circular para la que k_1 es igual a 1.

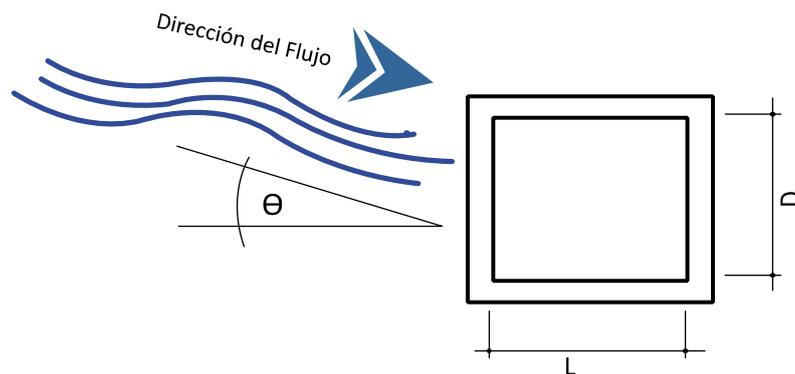
A medida que el perfil sea más hidrodinámico disminuye, aunque sea levemente, la intensidad de la erosión local. En una sección rectangular el valor de k_1 es igual a 1.1, para una relación L/D igual a 2. A continuación se presentan los factores de corrección que se tomaron de acuerdo a la sección de las pilas.

Forma de la Pila	k_1
Circular	1
Cuadrada	1.1
Triangular	0.9
Hexagonal	1.1

El factor de corrección k_2 es muy importante y se refiere a la influencia del ángulo de ataque de la corriente. Esta influencia no se da en las secciones circulares, puesto que son simétricas en todas direcciones.

En cambio, por ejemplo, en los pilares de sección rectangular, la influencia del ángulo de ataque en la socavación puede ser muy fuerte en la medida en la que el ángulo sea mayor y en la que lo sea la relación entre la longitud L del pilar a lo largo de la corriente y el ancho D del pilar, transversal a la corriente.

Se presenta valores del factor de corrección k_2 en función del ángulo de ataque θ y de la relación L/D .



$$k_2 = \left(\cos \theta + \frac{L}{D} \sin \theta \right)^{0.65}$$

Ángulo de ataque	$L/D = 4$	$L/D = 8$	$L/D = 12$
0°	1	1	1
15°	1.5	2	2.5
30°	2	2.75	3.5
45°	2.3	3.3	4.3
90°	2.5	3.9	5

Si L/D es mayor que 12, se usan los valores correspondientes a $L/D=12$ como máximos.

El factor de corrección k_3 se refiere a la condición del lecho, específicamente a la fase del transporte sólido por influencia de las dunas. Cuando el transporte de fondo es inexistente o se produce con un lecho plano, o con dunas de pequeña altura, comprendida entre 0,60 y 3 m el valor de k_3 es igual a 1,1. Para dunas de altura mediana, comprendida entre 3 y 10, el valor de k_3 varía entre 1,1 y 1,2. Para dunas grandes, mayores 10 m, el valor de k_3 es de 1,3. Se recomienda usar un valor de k_3 de 1.1 considerando que el lecho tiende a ser plano durante crecientes.

El factor de corrección k_4 disminuye la profundidad de socavación por acorazamiento del hueco de socavación para materiales del lecho con D_{50} mayor o igual que 2 mm o D_{95} mayor o igual que 20 mm ($D_{50} \geq 0.002$ m o $D_{95} \geq 0.02$ m). El factor de corrección k_4 es igual o menor que 1. En una situación extrema puede ser tan bajo como 0.4.

3.3.5. Interpretación de resultados

Esquema 1

DATOS

Simulador Cauce Fluvial

y: 0.0325 m
A: 0.4 m
L1: 0.46 m

CALCULOS

CALCULO DE TIEMPO

Tiempo en recorrer una partícula una L=0.46 m 2.55267 seg

Columna

CALCULO DE CAUDAL

D: 0.115 m
k1: 1.1
k2: 1
k3: 1.1
k4: 1

Área Sección Canal: 0.013 m²
Velocidad: 0.1802 m/seg
CAUDAL: 0.00234 m³/seg
2.34265 lt/seg
FROUDE: 0.31914

Medición de Tiempo (seg)

CALCULO DE PROFUNDIDAD DE SOCAVACION [ys]

UBICACION		
Izquierdo	Centro	Derecho
3.08	2.25	2.08
3.48	2.70	2.15
3.51	2.13	2.34
3.09	2.58	2.05
2.44	2.10	2.31

Formula de Shen	0.106 m
Formula de Laursen	0.068 m
Formula de Colorado State University (CSU)	0.109 m
CALCULO DE EXTENSION DE LA SOCAVACION [Ls]	
Formula Dr. Ing. Arturo Roche Felices	0.219 m

Después de haber realizado los cálculos necesarios, se observa que la profundidad de socavación máxima es de 0.109 m según CSU. La Extensión de la Socavación es de 0.219 m.

Esquema 2

DATOS

Simulador Cauce Fluvial

y: 0.0325 m

A: 0.4 m

L1: 0.46 m

Columna

D: 0.115 m

k1: 0.9

k2: 1

k3: 1.1

k4: 1

Medición de Tiempo (seg)

UBICACION

Izquierdo	Centro	Derecho
3.08	2.25	2.08
3.48	2.70	2.15
3.51	2.13	2.34
3.09	2.58	2.05
2.44	2.10	2.31

CALCULOS

CALCULO DE TIEMPO

Tiempo en recorrer una 2.55267 seg

partícula una L=0.46 m

CALCULO DE CAUDAL

Área Sección Canal: 0.013 m²

Velocidad: 0.1802 m/seg

CAUDAL: 0.00234 m³/seg

2.34265 lt/seg

FROUDE: 0.31914

CALCULO DE PROFUNDIDAD DE SOCAVACION [ys]

Formula de Shen 0.106 m

Formula de Laursen 0.068 m

Formula de Colorado State University (CSU) 0.090 m

CALCULO DE EXTENSION DE LA SOCAVACION [Ls]

Formula Dr. Ing. Arturo Roche Felices 0.179 m

Después de haber realizado los cálculos necesarios, se observa que la profundidad de socavación máxima es de 0.090 m según CSU.

La Extensión de la Socavación es de 0.179 m.

3.4. Práctica No. 4

3.4.1. Pilas hexagonales

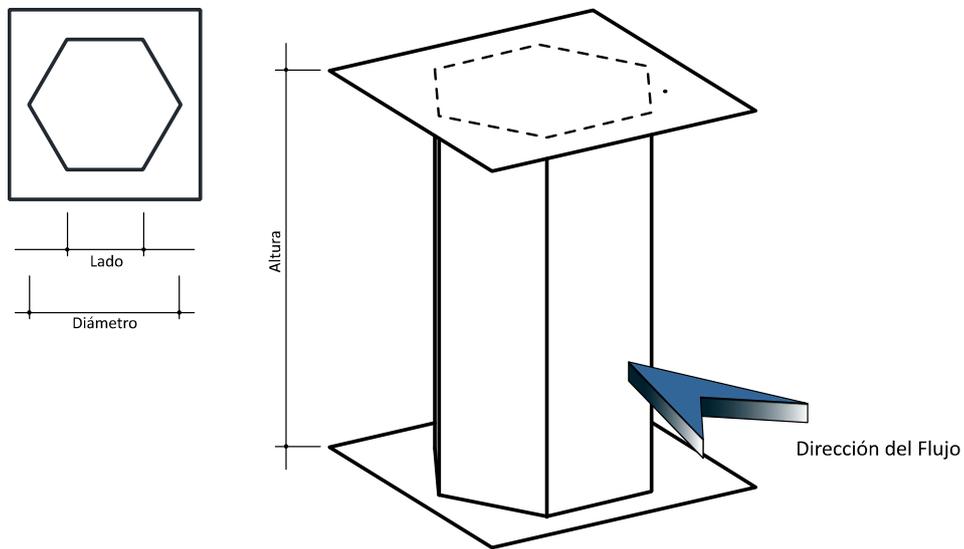
Para esta práctica se emplea la columna con sección hexagonal, con las siguientes características:

Lado: 6 cm

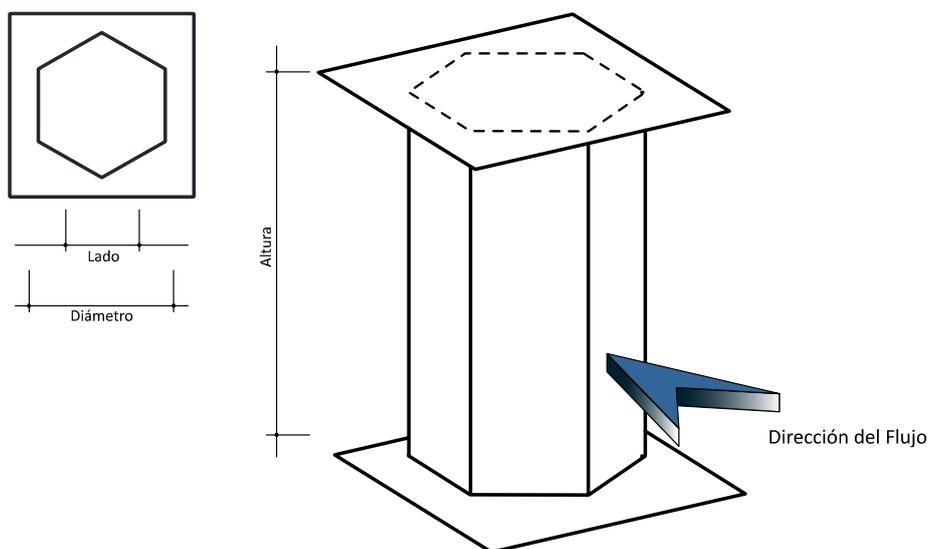
Altura: 30 cm

Posición: 1) Pared Normal al flujo 2) Vértice Normal a flujo

Esquema 1:



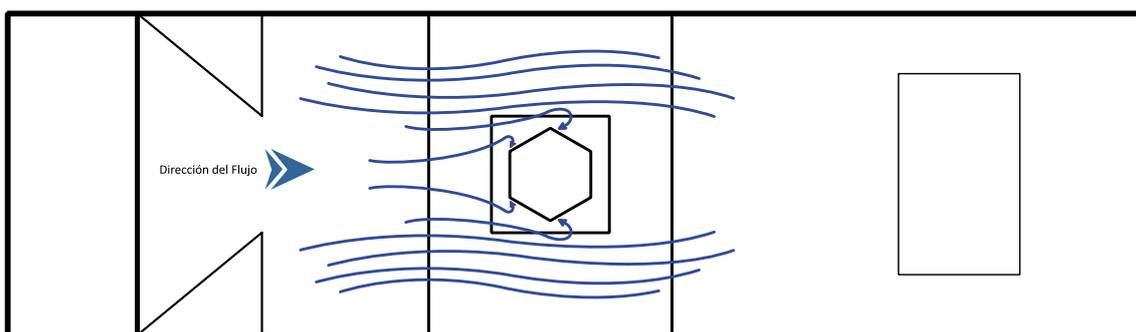
Esquema 2:



- Para comenzar la práctica poner en funcionamiento el modelo con los elementos y accesorios. Medir la longitud del tramo a analizar, L.
- Establecida la condición de trabajo, calcular área de la sección del canal, velocidad del flujo, tiempo y caudal.
- Para el caudal establecido, ubicar la columna con la sección a analizar, en este caso hexagonal, y observar el fenómeno que se presenta sobre este tipo de columna. Adoptar las dos posiciones planteadas en los esquemas 1 y 2 con la pared normal a la dirección del flujo y con el vértice en dirección al flujo.
- Hacer el análisis en planta y en corte (vista lateral del modelo) para apreciar con mayor detalle la acción del flujo sobre la pared de la columna circular.

3.4.2. Líneas de flujo

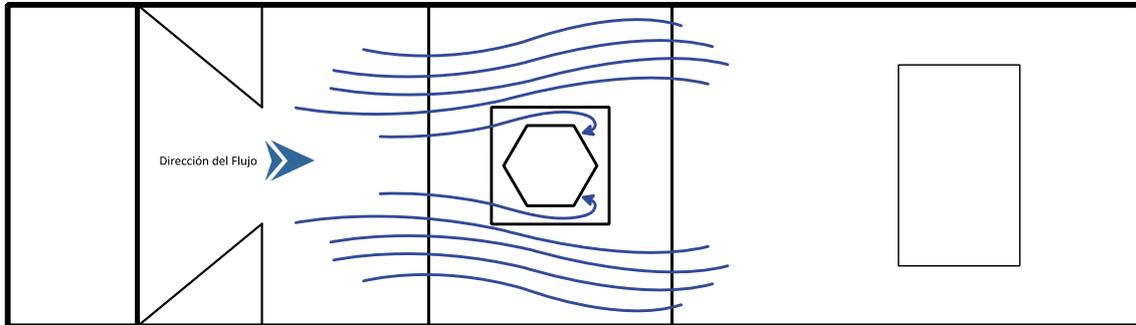
Esquema 1



La forma hexagonal de la columna permite que se formen líneas de flujo muy similares a las de la sección cuadrada pero de mayor tamaño. Esta posición con la pared apuntando al flujo, crea

vórtices que afectan gran parte de la sección de la columna como se aprecia en el gráfico.

Esquema 2



La forma hexagonal de la columna y la posición con el vértice apuntando a la dirección del flujo permite que se formen líneas de flujo muy similares a las líneas mostradas en la sección triangular y de posición similar. La sección triangular hace que la formación de vórtices sean mínimos en la parte anterior de la columna sin embargo en la parte posterior se aprecian turbulencias que afectan esta parte de la columna.

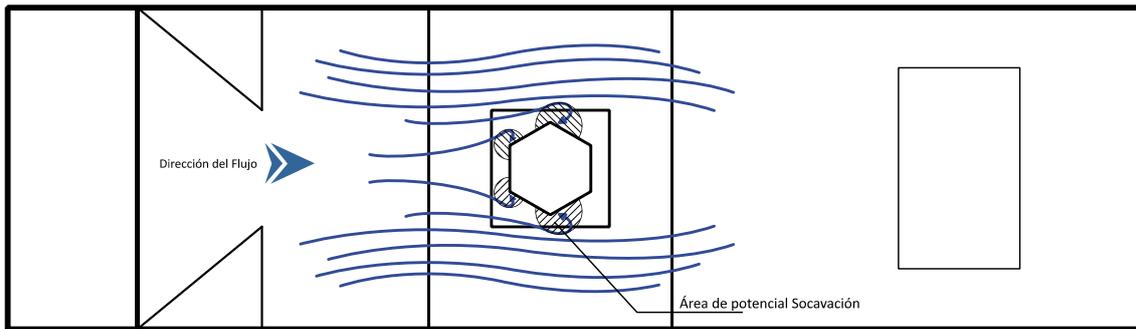
3.4.3. Áreas de potencial socavación

El primer dato reconocible es apreciar donde se producirá la afectación de la influencia del río sobre la pila y directamente en el suelo de cimentación.

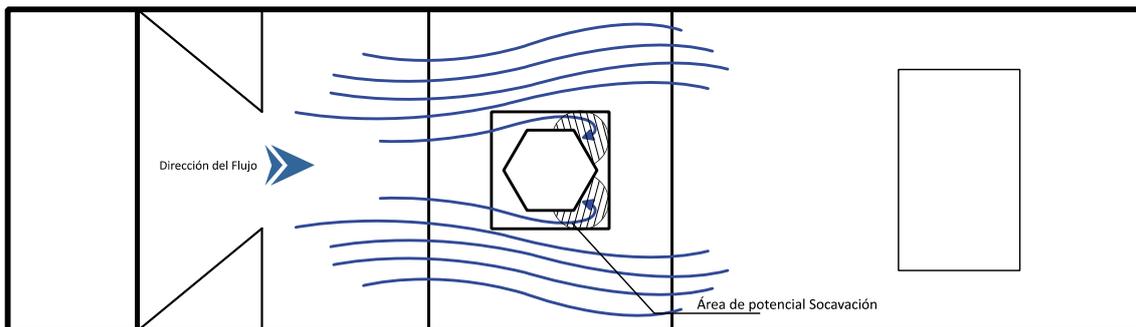
El área de potencial socavación depende principalmente de la sección de la pila y visualmente se aprecia fácilmente, tanto en la superficie del fluido como en la vista lateral de la pared del simulador de cauce.

No existe definida una fórmula para calcular con exactitud el área de potencial socavación, sin embargo por la forma espiral de los vórtices que se forman al contacto con las paredes de la pila, se asume que el área tiene forma elíptica tendiendo a circular.

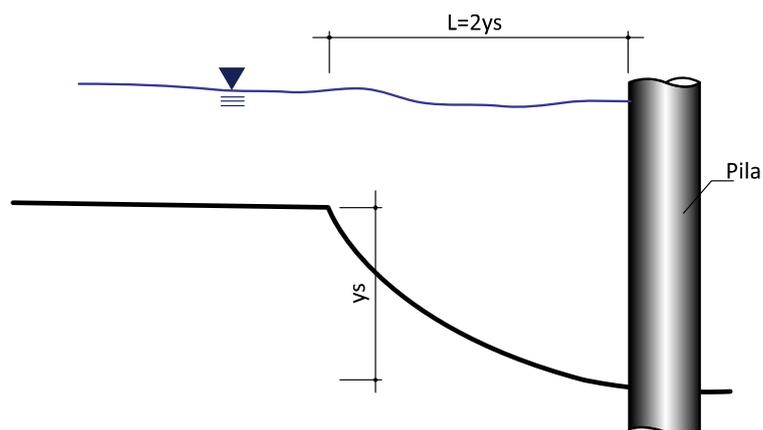
Esquema 1:



Esquema 2:



Según el Dr. Ing. Arturo Roche Felices, en su publicación de enero del año 2010, titulada “Erosión en Pilares y Estribos de Puentes”, la extensión que alcanza en planta, la potencial socavación se puede definir como dos veces la profundidad máxima de socavación en la pila analizada.



3.4.4. Toma de datos

La nomenclatura empleada para la toma de datos y cálculos se presenta a continuación:

- A: Ancho del Canal [m]
- L1: Longitud de Análisis [m]
- g: gravedad [9.81 m/seg²]
- ys: profundidad de socavación local [m]
- h: profundidad del flujo directamente aguas arriba de la pila
- k1: factor de corrección que tiene en cuenta la forma de la pila
- k2: factor de corrección que tiene en cuenta el ángulo de ataque del flujo
- k3: factor de corrección por la forma del lecho
- k4: factor de corrección por acorazamiento del sedimento del lecho
- D: ancho de la pila [m]
- L: longitud de la pila [m]
- Fr: número de Froude en la sección directamente aguas arriba de la pila

V: velocidad media del flujo directamente aguas arriba de la pila [m/s]

Se presentan también las fórmulas empleadas para la obtención de los datos y resultados.

Cálculo de Velocidad

$$V = \frac{LI}{t}$$

Cálculo de Caudal

$$Q = V \cdot A \cdot y$$

Cálculo de Número de Froude

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \cdot y}}$$

Cálculo de Profundidad de Socavación

Se realizaron cálculos de profundidad de socavación con tres diferentes fórmulas; Shen, Laursen y con la fórmula de Colorado State University (CSU),

$$Shen = 1.17(D)^{0.62} \cdot V^{0.62}$$

$$Laursen = 1.11(D)^{0.5} \cdot h^{0.5}$$

, se muestran los resultados de las tres fórmulas, pero por ser más completa y tomar en cuenta factores importantes se ha preferido trabajar con los resultados de Colorado State University (CSU)

$$\frac{y_s}{h} = 2 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot \left(\frac{D}{h}\right)^{0.65} \cdot Fr^{0.43}$$

Cálculo de Extensión de la Socavación

$$Ls = 2.ys$$

Los factores de corrección k_1 , k_2 , k_3 y k_4 son exclusivamente para el cálculo de la profundidad de socavación local en la pila de sección planteada.

El factor de corrección k_1 se refiere a la influencia de la forma de la sección transversal del pilar en la socavación producida. La más frecuente es la sección circular para la que k_1 es igual a 1.

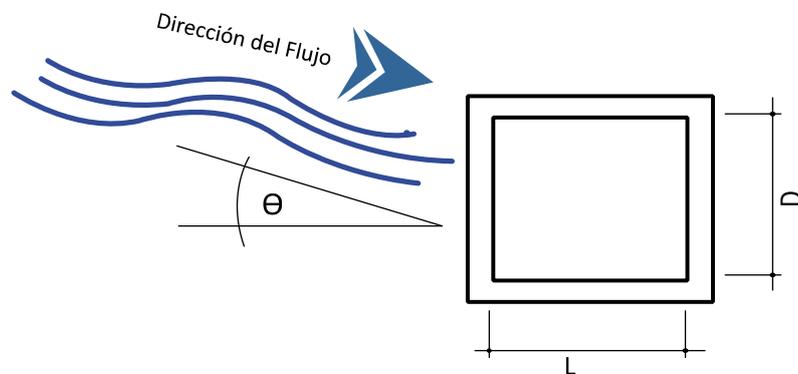
A medida que el perfil sea más hidrodinámico disminuye, aunque sea levemente, la intensidad de la erosión local. En una sección rectangular el valor de k_1 es igual a 1.1, para una relación L/D igual a 2. A continuación se presentan los factores de corrección que se tomaron de acuerdo a la sección de las pilas.

Forma de la Pila	k_1
Circular	1
Cuadrada	1.1
Triangular	0.9
Hexagonal	1.1

El factor de corrección k_2 es muy importante y se refiere a la influencia del ángulo de ataque de la corriente. Esta influencia no se da en las secciones circulares, puesto que son simétricas en todas direcciones.

En cambio, por ejemplo, en los pilares de sección rectangular, la influencia del ángulo de ataque en la socavación puede ser muy fuerte en la medida en la que el ángulo sea mayor y en la que lo sea la relación entre la longitud L del pilar a lo largo de la corriente y el ancho D del pilar, transversal a la corriente.

Se presenta valores del factor de corrección k2 en función del ángulo de ataque theta y de la relación L/D.



$$k2 = \left(\cos \phi + \frac{L}{D} \text{sen } \phi \right)^{0.65}$$

Ángulo de ataque	L/D = 4	L/D = 8	L/D = 12
0°	1	1	1
15°	1.5	2	2.5
30°	2	2.75	3.5
45°	2.3	3.3	4.3
90°	2.5	3.9	5

Si L/D es mayor que 12, se usan los valores correspondientes a L/D= 12 como máximos.

El factor de corrección k_3 se refiere a la condición del lecho, específicamente a la fase del transporte sólido por influencia de las dunas. Cuando el transporte de fondo es inexistente o se produce con un lecho plano, o con dunas de pequeña altura, comprendida entre 0,60 y 3 m el valor de k_3 es igual a 1,1. Para dunas de altura mediana, comprendida entre 3 y 10, el valor de k_3 varía entre 1,1 y 1,2. Para dunas grandes, mayores 10 m, el valor de k_3 es de 1,3. Se recomienda usar un valor de k_3 de 1.1 considerando que el lecho tiende a ser plano durante crecientes.

El factor de corrección k_4 disminuye la profundidad de socavación por acorazamiento del hueco de socavación para materiales del lecho con D_{50} mayor o igual que 2 mm o D_{95} mayor o igual que 20 mm ($D_{50} \geq 0.002$ m o $D_{95} \geq 0.02$ m). El factor de corrección k_4 es igual o menor que 1. En una situación extrema puede ser tan bajo como 0.4,

3.4.5. Interpretación de resultados

Esquema 1

<u>DATOS</u>			<u>CALCULOS</u>	
Simulador Cauce Fluvial			CALCULO DE TIEMPO	
y:	0.0325 m		Tiempo en recorrer una	2.55267 seg
A:	0.4 m		partícula una L=0.46 m	
L1:	0.46 m			
Columna			CALCULO DE CAUDAL	
D:	0.12 m		Área Sección Canal:	0.013 m ²
k1:	1.1		Velocidad:	0.1802 m/seg
k2:	1		CAUDAL:	0.00234 m ³ /seg
k3:	1.1			2.34265 lt/seg
k4:	1		FROUDE:	0.31914
Medición de Tiempo (seg)			CALCULO DE PROFUNDIDAD DE SOCAVACION [ys]	
UBICACION			Formula de Shen	0.109 m
Izquierdo	Centro	Derecho	Formula de Laursen	0.069 m
3.08	2.25	2.08	Formula de Colorado State University (CSU)	0.113 m
3.48	2.70	2.15		
3.51	2.13	2.34	CALCULO DE EXTENSION DE LA SOCAVACION [Ls]	
3.09	2.58	2.05	Formula Dr. Ing. Arturo Roche Felices	0.225 m
2.44	2.10	2.31		

Después de haber realizado los cálculos necesarios, se observa que la profundidad de socavación máxima es de 0.113 m según CSU.

La Extensión de la Socavación es de 0.225 m.

Esquema 2

DATOS

Simulador Cauce Fluvial

y: 0.0325 m

A: 0.4 m

L1: 0.46 m

Columna

D: 0.104 m

k1: 0.9

k2: 1

k3: 1.1

k4: 1

CALCULOS

CALCULO DE TIEMPO

Tiempo en recorrer una 2.55267 seg

partícula una L=0.46 m

CALCULO DE CAUDAL

Área Sección Canal: 0.013 m²

Velocidad: 0.1802 m/seg

CAUDAL: 0.00234 m³/seg

2.34265 lt/seg

FROUDE: 0.31914

Medición de Tiempo (seg)

UBICACION

Izquierdo	Centro	Derecho
3.08	2.25	2.08
3.48	2.70	2.15
3.51	2.13	2.34
3.09	2.58	2.05
2.44	2.10	2.31

CALCULO DE PROFUNDIDAD DE SOCAVACION [ys]

Formula de Shen 0.099 m

Formula de Laursen 0.065 m

Formula de Colorado State University (CSU) **0.084 m**

CALCULO DE EXTENSION DE LA SOCAVACION [Ls]

Formula Dr. Ing. Arturo Roche Felices **0.168 m**

Después de haber realizado los cálculos necesarios, se observa que la profundidad de socavación máxima es de 0.084 m según CSU.

La Extensión de la Socavación es de 0.168 m.

Se presenta un resumen de los datos obtenidos para facilidad de comparación y análisis. Se ordenaron los resultados de acuerdo al tipo de sección de la pila.

SECCION PILA	PROFUNDIDAD SOCAVACION [m]	EXTENSION DE SOCAVACION [m]
CIRCULAR	0.099	0.199
CUADRADA	0.109	0.219
TRIANGULAR [Pared]	0.109	0.219
TRIANGULAR [Vértice]	0.090	0.179
HEXAGONAL [Pared]	0.113	0.225
HEXAGONAL [Vértice]	0.084	0.168

Como se puede apreciar en el resumen, las secciones triangular y hexagonal, cuando están con un vértice en línea con el flujo, causan menos daño que las demás secciones analizadas, inclusive la sección circular, que aparentemente por no tener aristas suponía ser la más óptima.

CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

- Los modelos físicos de geometría similar permiten visualizar los fenómenos hidráulicos sin distorsiones y más cercanos a la realidad.
- Se analizaron las fuerzas predominantes en el modelo para escoger el criterio de similitud dinámica a utilizar. La gravedad y rugosidad del contorno son factores importantes en los modelos a superficie libre.
- La selección de la escala adecuada se la realizó escogiendo el modelo de mayor tamaño que pueda ser construido en el laboratorio, considerando las disponibilidades físicas de espacio, de caudales y de carga hidráulica al inicio del modelo.
- La construcción del modelo debe ser realizada con precisión, puesto que al ser una estructura a reducida escala, un pequeño error constructivo puede modificar el comportamiento hidráulico del modelo.
- La modelación física constituye una herramienta valiosa para la obtención de una solución práctica a la elaboración del diseño definitivo de obras de importancia como puentes. Los métodos numéricos plantean soluciones con modelos matemáticos idealizados, realizando simplificaciones importantes, que a su vez causan efectos que deben ser valorados mediante ensayos experimentales, a través de modelos físicos a escala reducida.

- La forma de la pila es un factor importante en fenómenos de socavación local, sin embargo se debe acotar que las dimensiones son un punto que influye directamente en este tipo de acciones.
- Analizando los datos, se puede sacar como conclusión que la sección circular no es la más óptima para el uso de pilas, el hecho de no tener aristas no evita que forme vórtices que socaven la cimentación de la misma.
- Las pilas con forma triangular y hexagonal ubicadas con el vértice en línea con el flujo, resultaron las que menos daño causan. El ancho D de la pila es el valor que influye directamente en la profundidad de socavación.
- El ángulo de ataque del flujo a la pila resulta importante en las pilas con sección diferente a la circular, sin embargo se debe analizar este factor para fases de diseño y construcción.

4.2. Recomendaciones

- Existe variada bibliografía sobre fenómenos de socavación en pilas, sin embargo es recomendable que se aprecien y se analicen los posibles problemas a presentarse en un simulador, de manera que se prevean y se tomen correcciones de ser el caso, en una etapa que no represente pérdidas económicas mayores y se complemente la bibliografía con la experimentación en un modelo reducido.
- Las formas de las pilas analizadas son un punto de partida para el futuro análisis de formas de secciones combinadas o experimentales, que en tamaño no resultaría costoso y se apreciarían los posibles fenómenos de manera más didáctica y clara.
- El simulador de caudal es el punto de partida para futuros modelos de escala reducida, que complemente y promueva la investigación de fenómenos como los analizados.
- Se recomienda de manera especial, que los trabajos y ejercicios realizados así como la teoría impartida, se refuercen y complementen de manera didáctica en simuladores o modelos de escala reducida en el laboratorio, de manera que se aclaren las posibles dudas que se tengan de uno o más temas.
- Promover la experimentación y la construcción de más modelos de escala reducida para incorporar al laboratorio de hidráulica de la facultad y facilitar su uso y aplicación.

BIBLIOGRAFÍA

- Hidráulica de los Canales Abiertos, Ben Te Chow, editorial Mc Grawn Hill, 1982, Cap. 15.
- Obras Hidráulicas, José Zurita Ruiz, Ediciones CEAC, 1985, Cap. 4.
- Schlag, Albert. Hidráulica. Primera Edición, México: Editorial Limusa S.A., 1977.
- Domínguez, Javier. Introducción a la Hidráulica Fluvial. Capítulo 12 Modelos Fluviales. Facultad de Ingeniería Civil. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, 1998.
- LINSLEY, Ray y FRANZINI, Joseph. Ingeniería de los Recursos Hidráulicos. Primera Edición, México: Editorial Continental, 1980.
- Introducción a la Hidráulica Fluvial, Arturo Rocha Felices, Primera Edición Noviembre 1998, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería
- Ingeniería de Ríos, Juan P. Martin Vide, Universitat Politècnica de Catalunya, Edicions UPC, S.L.
- Los Modelos como herramienta valiosa para el Diseño Hidráulico, Rocha Felices Arturo. (2003).
- Publicación Año 2010, Erosión en pilares y estribos de puentes, Dr. Ing. Arturo Rocha Felices.

ANEXOS



A.1.- Simulador Cauce Fluvial, Material Acrílico

Por ser un material fácil de trabajar, y resistente a la acción del agua, y basándose en trabajos previos, se elaboró el simulador de cauce fluvial con acrílico transparente



A.2.- Columnas Diferentes Secciones, Material Acrílico

Las columnas de sección circular, cuadrada, triangular y hexagonal se elaboraron también en acrílico transparente al igual que el simulador de cauce fluvial. El material es fácil de manipular y permite apreciar los fenómenos claramente.



A.3.- Tanque Almacenamiento de Agua, Material Plástico

El tanque de almacenamiento de agua es prefabricado en plástico común, resistente con tapa a la medida, que fue perforada para el ingreso del agua al recircular en el simulador de cauce fluvial.



A.4.- Mesa, Material Madera y Metal

El simulador de cauce fluvial, el tanque de almacenamiento, la bomba y demás accesorios se instalaron en una mesa de estructura mixta, metal y madera. Las dimensiones van de acuerdo a la disponibilidad de espacio físico en el laboratorio.



A.5.- Bomba Hidráulica, 1 ½ HP de potencia

Para impulsar el agua almacenada en el tanque, se emplea una bomba hidráulica de 1 ½ HP de potencia, que está instalada en la parte inferior de la mesa metálica y junto al tanque de almacenamiento de agua, con sus respectivas instalaciones eléctricas e hidráulicas.



A.6.- Tubería y accesorios, material PVC

Para las instalaciones de conducción de agua se empleó tubería de Policloruro de vinilo y de igual forma para los accesorios como codos, llaves universales, neplós y demás.



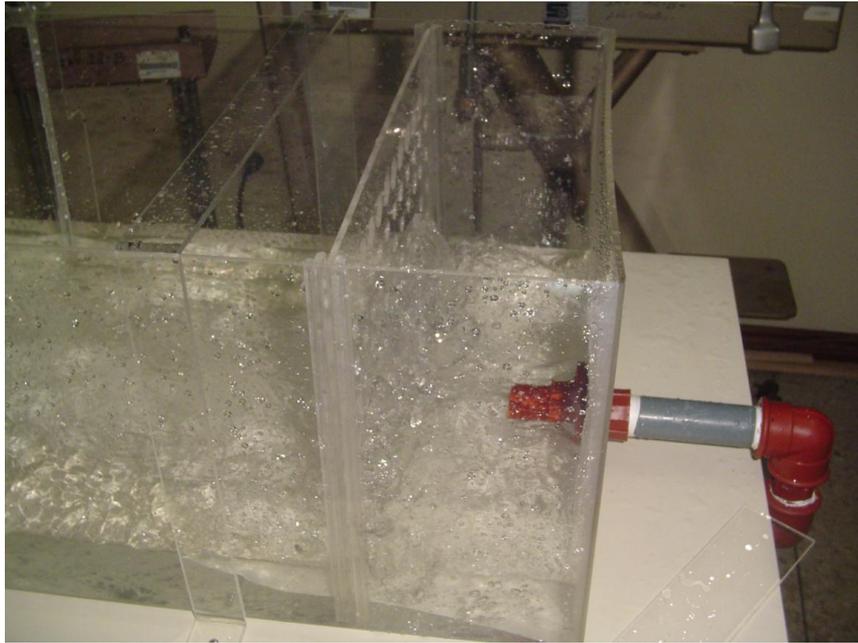
A.7.- Llave de purga y limpieza

En la parte inferior de la mesa se instaló una llave de limpieza para poder vaciar el tanque de almacenamiento y realizar mantenimiento y limpieza de ser necesario.



A.8.- Instalaciones eléctricas para accionar la bomba

La bomba cuenta con un interruptor para accionarla y empezar su normal funcionamiento, está ubicado en la parte inferior de la mesa sobre una de las patas para mayor comodidad.



A.9.- Modelo en funcionamiento

Para empezar el uso del simulador de cauce, se debe esperar que el fluido se estabilice ya que por la potencia de la bomba, el primer chorro es muy fuerte y no permite ver con normalidad los fenómenos investigados.



A.10.- Vista General del Simulador Hidráulico

Se aprecia en su totalidad y en funcionamiento el simulador de cauce fluvial en las instalaciones del laboratorio de la Escuela Politécnica del Ejército.