



SEMINARIO DE HIDRÁULICA DE PUENTES

Facultad de Ingeniería, Departamento de Hidráulica

14 de Octubre – Clase 2B: Información para estudios de Erosión



Ing. Adolfo Guitelman
Ing. Agustín Rigou



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica
SEMINARIO 2025
HIDRAULICA DE PUENTES

**INFORMACIÓN PARA ESTUDIOS DE
SOCAVACIÓN EN PUENTES**



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

Duración	Objetivo	Descripción
Datos históricos	Cauce	<ul style="list-style-type: none"> - Fotografías aéreas - Mapas topográficos - Fotografías del cauce principal y de las laderas - Secciones transversales (en lo posible, dos aguas arriba y dos aguas abajo) - Dirección de la corriente en aguas altas y bajas - Datos hidrológicos e hidráulicos (caudal, área mojada, velocidad, niveles del agua, gradiente hidráulico) - Ubicación y descripción de huecos de socavación - Sondeos, estratigrafías, granulometrías - Factores externos que pueden afectar la estabilidad del puente
	Puente	<ul style="list-style-type: none"> - Geometría de la estructura del puente - Dimensiones de pilas y estribos - Profundidad de cimentación - Ubicación y descripción de medidas de control - Reportes de inspecciones previas incluyendo fotos
Tiempo real	Cauce	<ul style="list-style-type: none"> - Secciones transversales (en lo posible, dos aguas arriba y dos aguas abajo) - Elevación del lecho en la zona del puente para determinar huecos de socavación - Muestras de sedimentos de lecho y en suspensión (peso específico, granulometría, peso volumétrico, velocidad de caída) - Fotografías del cauce y de las bancas - Presencia de basuras
	Puente	<ul style="list-style-type: none"> - Caudal, área mojada, velocidad, gradiente hidráulico - Velocidad y niveles del agua a lo largo del cauce - Dirección de la corriente en aguas altas y bajas



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

Naturaleza de la información	Lista de Elementos a estudiar	Investigaciones a realizar
Mapas, Planos, Fotografías	- Planos topográficos - Planos geológicos - Cartas de cauces navegables - Fotografías antiguas y recientes	Identificar topografía, geología, profundidades de navegación y morfología del río en el sitio, comparándolos con la información obtenida.
Puentes y otras estructuras existentes en el río	- Dimensiones de luz, gálibo, etc. - Fechas de construcción - Reparaciones que se han realizado - Alteración claro, falla, etc. - Perfil de la vía en el valle de inundación - Niveles de cimentación - Niveles históricos de inundación - Sondeos antiguos - Levantamientos topográficos de socavación	Analizar el comportamiento que han tenido las estructuras y cimientos, buscar evidencias de daños e investigar las razones de las reparaciones. Chequear si la carretera o la superestructura del puente fue alguna vez levantado. Buscar evidencias de socavación y chequear las medidas de protección. Chequear por evidencia local de inundación o rompimiento de los terraplenes.
Información hidrológica	- Caudales medidos en las estaciones hidrométricas más cercanas. - Curvas de frecuencia de inundaciones. - Hidrogramas unitarios y curvas de duración de inundaciones. - Información de lluvias, intensidad y distribución de las precipitaciones; intensidad de lluvias máximas. - Información de períodos antracíclicos y datos de periódicos antiguos. - Información de tormentas, huracanes, avalanchas, etc. - Inundaciones de diseño utilizadas para el diseño de otros puentes, presas, etc. - Tipos de suelo y permeabilidad en la cuenca. - Tamaño y características de la cuenca.	Chequear la credibilidad de la información. Buscar evidencias locales para confirmar la información. Investigar velocidades y direcciones de las corrientes máximas.
Hidráulica y capacidad del canal	- Levantamientos batimétricos. - Pendiente de acuerdo a los mapas topográficos. - Cálculo de caudales. - Volúmenes de sedimentos. - Empalizadas.	Medir las dimensiones del canal y del valle de inundación. Tomar fotografías del canal y de las áreas adyacentes. Medir la pendiente del canal. Determinar la rugosidad del canal y de los planos de inundación.
Información geotécnica	- Datos de estudios de suelos. - Información de excavaciones y/o pilotes de estructuras existentes.	Tomar muestras del suelo del lecho. Buscar evidencias de los tamaños máximos de partículas transportados por las inundaciones. Buscar evidencias de afloramientos de roca. Realizar sondeos a profundidades por debajo del posible nivel de socavación. Describir y tomar fotografías de los bancos de materiales.
Morfología de la corriente	- Comparar mapas y fotografías aéreas de diferentes años para buscar evidencias de movimientos laterales de los canales, barras y erosión de los bancos, etc.	Medir la socavación máxima presente en las curvas, contracciones, farallones y estructuras existentes. Buscar evidencias de movimiento de los canales, erosiones y deslizamientos. Buscar información sobre fenómenos de agradación o degradación. Observar los movimientos de las corrientes y sedimentos en el campo.
Intervención antrópica	- Presencia de represas, canales de riego o drenaje, canalizaciones y otras intervenciones de la corriente.	Buscar evidencias sobre el efecto que han tenido las intervenciones antrópicas.
Función de la estructura	- Características de la navegación. - Necesidades viales.	Analizar en campo la funcionalidad de las diversas alternativas de cruce.



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

Estudios básicos de oficina y de campo

Para realizar el diseño de un puente y/o su evaluación con relación a socavación, se deben adelantar estudios básicos con el fin de conocer las características **topográficas, hidrológicas, hidráulicas y de suelos en la zona de emplazamiento de la estructura.** El estudio integral de un río debe comprender el entendimiento de su geomorfología, ya que cambios en su profundidad, ancho y alineamiento, en forma súbita o progresiva, pueden alterar la estabilidad de un puente,



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

ESTUDIOS TOPOGRÁFICOS

Los estudios topográficos incluyen los siguientes pasos:

- **Planificación general del estudio.** Se deben establecer las características del trabajo de campo en lo referente a: longitud total del río en que se van a levantar las secciones transversales y su espaciamiento, errores permitidos, nomenclatura a usar, orden en la toma de las secciones, etc.
- **Generación del progresivado longitudinal.** Se debe realizar un levantamiento altimétrico y planimétrico con poligonales cerradas sobre la orilla del río tributario desde donde se amarrarán las secciones transversales. Referenciación de las secciones transversales. Se debe hacer el amarre altimétrico mediante nivelación de precisión, dejando BMs al inicio de cada sección transversal. En muchos casos de estudios de socavación, basta con poligonales abiertas.



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

ESTUDIOS TOPOGRÁFICOS

Toma de las secciones transversales.

El levantamiento de las secciones transversales se realizará desde aguas abajo hacia aguas arriba, cubriendo una distancia conveniente a ambos lados de la llanura de inundación sobre ambas márgenes del cauce, o hasta los puntos más altos de los diques si existieran.

Las secciones deberán estar debidamente referenciadas en sus extremos, y la separación entre ellas dependerá de cada proyecto. Se requieren como mínimo tres secciones para caracterizar una curva. Asimismo, deberán relacionarse los niveles del agua a banca llena y, de ser posible, los niveles máximos de crecida.

Con el fin de definir el gradiente hidráulico existente, se establecerá la diferencia relativa de nivel entre las secciones mediante el traslado e identificación de cotas. También se deberán detallar las restricciones u obstáculos al flujo, tales como puentes, viaductos o box-culverts, necesarios para definir los puntos de control hidráulico.

En los sitios donde el nivel de agua no permita un levantamiento topográfico convencional (estación total o nivel de precisión), las secciones deberán obtenerse mediante el uso de una eco-sonda.

Si el puente ya estuviera construido, deberá disponerse de los planos de construcción y realizarse el levantamiento de la estructura existente, poniendo especial énfasis en la nivelación de la losa y de los elementos de apoyo, como pilas y estribos.

Procesamiento de la información.

Deberá entregarse en formato magnético e impreso la siguiente documentación: carteras de apoyo de los levantamientos topográficos, cálculos de poligonales y nivelaciones, plano de localización general de todas las secciones, secciones transversales, tabla de coordenadas de cada punto, así como un informe escrito de las eventualidades ocurridas durante la campaña de campo.



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

Datos generales

- Nombre del río, del camino y tramo.
- Ubicación del cruce.
- Tipo de puente.
- Longitud y número de vanos, elevación de la rasante del puente, orientación del puente, orientación de las pilas.
- Ubicación del área de estudio a nivel macro.
- Documentos disponibles (mapas, fotografías aéreas, reportes de inspecciones previas).
- Informes de reconocimiento de la zona del puente y de su cuenca por vía terrestre y aérea.

Secciones transversales

El levantamiento topográfico mediante una poligonal abierta tendida en una de las márgenes del río, que sirve de base para tomar las secciones transversales y la batimetría en la zona del puente..

- Secciones transversales del cruce inmediatamente aguas arriba y aguas abajo del puente.
- Secciones transversales a una distancia del puente aproximadamente igual a una vez su longitud total o donde se estime que el puente no interfiere mas sobre el flujo tanto hacia aguas abajo como hacia aguas arriba del cauce.

- Socavación en puentes existentes

- Alrededor de las pilas.
- A lo largo de los estribos.

- Presencia de depósitos de sedimentos

- Existencia de islas, barras, lagunas, esteros, cascadas, etc.



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

- **Esquemas**

- Elaboración de esquemas detallados en planta y perfil de la zona del cruce indicando todos los datos que a juicio del ingeniero sean relevantes para el estudio de la socavación del puente.

Estudios hidrológicos

Los estudios hidrológicos llevan a determinar el caudal de diseño por ser éste uno de los parámetros que más influyen en la selección de la abertura del puente y en la evaluación de la socavación. Algunos de los siguientes parámetros deberán ser evaluados durante el estudio.

• **Información de estaciones hidrológicas**

- Estaciones limnimétricas o limnigráficas sobre el río.
- Estaciones climatológicas en la cuenca hidrográfica.
- Estaciones para toma de datos de sedimentos

Características fisiográficas de la cuenca hidrográfica

La determinación de las características fisiográficas de la cuenca se hace sobre fotografías aéreas

y planos topográficos.

- Área y forma de la cuenca hidrográfica hasta el sitio de cruce.
- Orientación, forma y pendiente media de la cuenca.
- Tipo y uso del suelo en la cuenca.
- Red de drenaje.



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

- **Caudales, niveles y velocidades**

- Caudal medio en el cauce.
- Caudal y fecha de las crecientes máximas extraordinarias.
- Caudal de diseño.
- Caudales, niveles y velocidades de creciente correspondientes a períodos de retorno tales como 100 años (Q_{100}), 500 años (Q_{500}) y el caudal que sobrepasaría el puente (Q_{sp}).

Estudios hidráulicos: Lo estudios hidráulicos llevan a determinar los parámetros necesarios para calcular y evaluar la socavación en puentes:

- **Características hidráulicas del río**

- Tipo de río (perenne, efímero, torrencial, aluvial).
- Configuraciones del lecho en cauces aluviales.
- Tendencia a la sedimentación o erosión del lecho a lo largo del tiempo.
- Afluentes y posibles remansos provocados por éstos.
- Posible influencia de las mareas si el cruce se localiza cerca a la desembocadura del mar.
- Funcionamiento hidráulico probable de la corriente basándose en registros de aforo y entrevistas con los vecinos que den información sobre magnitud, duración y frecuencia de las avenidas, época del año y daños causados.
- Cauce suficiente para el paso de crecientes o si se desborda durante avenidas.
- Alineamiento del río, estable o con tendencia a divagar.
- Dirección de la corriente con relación al puente en épocas de flujos altos y bajos, lo que permite junto con el estudio morfológico del río analizar las variaciones del cauce y la forma como el flujo atacaría a la estructura condicionando su ubicación.



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

Materiales de arrastre teniendo en cuenta su clasificación y sus dimensiones.

- Tipo y dimensiones de cuerpos flotantes.
- Tendencia a degradación o agradación del cauce.
- **Descripción de estructuras u obras de control próximas al sitio del puente**
- Puentes (tipo, antigüedad, elevación de la rasante del puente, orientación del puente, orientación de las pilas, dirección de la corriente en épocas de avenidas, sección transversal del cruce, comportamiento del puente ante crecientes).
- Presas (función, operación del embalse, grado de regulación).
- Obras de encauzamiento y protección contra la erosión.
- Obras de encauzamiento y protección contra inundaciones.

- Obras de control de torrentes.
- Dragados.
- Corte de meandros.
- Otros proyectos por realizarse en la zona.

- **Cálculos hidráulicos**

Determinación de parámetros hidráulicos: velocidad, profundidad del agua, área mojada, perímetro mojado, etc.



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

ESTUDIOS DE SUELO

Los estudios de suelos pueden ser tan generales o detallados como el tipo de cauce lo requiera. Ríos bien definidos y con lecho poco erosionable requieren poco detalle en la información, en tanto que ríos inestables en cauces indefinidos o trezados, requieren que se preste la máxima atención a los estudios geológicos. Se necesita usualmente hacer perforaciones, apiques o sondeos para determinar las condiciones de los suelos en la zona del puente. Un informe geológico para hacer estudios de cimentación de un puente debe incluir información sobre:

- Características geológicas de la cuenca
- Perfiles estratigráficos
- Rocas existentes
- Disponibilidad de materiales de construcción
- Materiales del lecho del cauce y su resistencia a la erosión.
- Profundidades de cimentación de estructuras existentes en la vecindad.

Por otra parte, los parámetros mas importantes de los sedimentos del cauce que de una u otra

forma intervienen en el cálculo de las profundidades máximas de socavación son: densidad y peso específico, velocidad de caída, distribución granulométrica, tamaño, desviación estándar geométrica, peso específico de la mezcla agua-sedimento en suspensión, viscosidad de la mezcla

agua-sedimento en suspensión.



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

Los aspectos más importantes para tener en cuenta en suelos cohesivos son el peso volumétrico seco y la resistencia al esfuerzo cortante, en tanto que en suelos granulares priman el peso y el tamaño de las partículas. Las muestras de sedimentos se busca tomarlas dentro y por fuera del hueco de socavación para determinar si existe acorazamiento del cauce o en la zona de la pila. También deben tomarse una o dos muestras de carga de lecho suspendida en el mismo sitio donde se están determinando las profundidades del agua.

El diseñador de un puente siempre debe preguntarse qué resulta mas conveniente desde el punto de vista económico: cimentar la estructura a profundidades mayores, o el costo básico del puente asociado a un riesgo de falla especificado, (Laursen E, M., 1970). El tiempo de retorno incide notoriamente en los costos, por lo tanto, este valor depende de la importancia que la obra tiene dentro del proyecto vial y del riesgo permisible.



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

DETERMINACIÓN DE CAUDALES DE DISEÑO

El caudal medio del río corresponde usualmente al caudal con un período de retorno de por ejemplo 2 años o a una creciente frecuente que ha conformado el cauce principal y es muy probablemente menor que el caudal de diseño. Este caudal no es representativo de condiciones extraordinarias de flujo ni podrá ser el caudal de diseño para el puente. Debe prestarse especial atención a la determinación del caudal de creciente pues es la base del diseño hidráulico del puente y de la evaluación de las profundidades de socavación. Dicha determinación se hace de acuerdo al proyecto específico teniendo en cuenta los siguientes criterios: tipo de obra, vida útil de la obra, tiempo de retorno o frecuencia de la creciente, seguridad y economía.

Para determinar el caudal de creciente en una cuenca en un punto determinado, existen muchos métodos que incluyen parámetros tales como: área, pendientes y longitud de la cuenca, tipo de vegetación, tipo de suelo, pluviogramas, distribución espacial de lluvias, caudales máximos, etc. El uso de cualquiera de los métodos depende del tamaño de la cuenca, del tipo de estructura que se vaya a diseñar, pero sobre todo de la información disponible. Algunos de los métodos

comúnmente usados se pueden clasificar en: métodos empíricos, semi-empíricos, probabilísticos, hidro-meteorológicos, métodos de sección y pendiente. • **Métodos empíricos:** se usan para tener una idea preliminar sobre el gasto de diseño y si sólo se cuenta con información de algunas características físicas de la cuenca. Ejemplos de estos métodos son: envolventes de Creager, envolvente de Lowry, método de Talbot.



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

Métodos semi-empíricos: consideran la precipitación y características de la cuenca hidrográfica para la determinación del caudal. El método racional y el de Burkli-Ziegler son ejemplos de métodos semi-empíricos.

- **Métodos hidro-meteorológicos:** se basan en la respuesta de la cuenca hidrográfica ante un evento dado que se resume en la relación precipitación-escorrentía-caudal. Los hidrogramas unitarios son métodos hidro-meteorológicos.

- **Métodos de sección y pendiente:** se debe escoger un tramo de río con condiciones lo más homogéneas posibles para estimar la pendiente media del cauce, el coeficiente de rugosidad de Manning, el perímetro mojado, el área mojada y el radio hidráulico que corresponden a un nivel de creciente asumido (*NAME*).

Esta información permite aplicar la ecuación de Manning y encontrar el caudal correspondiente. Su uso es conveniente para verificar datos o cuando no hay información de tipo hidrológico



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

• **Métodos probabilísticos:** se basan en suponer que los caudales máximos anuales aforados en una sección de un cauce son una muestra aleatoria de una población de gastos máximos. Hay varios métodos probabilísticos en uso y la diferencia entre ellos es la forma de la distribución probabilística que suponen tiene la población. Ejemplos de estos métodos son: valores extremos tipo I o Gumbel, Log-Pearson tipo III, Hazen-Fuller-Foster, Levediev, Nash. Los métodos probabilísticos determinan el caudal dependiendo de un período de retorno el cual está ligado al riesgo aceptable para una determinada estructura. El riesgo aceptable depende de la importancia de la obra y de aspectos económicos, sociales, técnicos, políticos, ecológicos, entre otros.

$$R = 1 - \left(1 - \frac{1}{T_r}\right)^{n_s} \dots\dots\dots$$

R = riesgo de falla
 T_r = período de retorno
 n_s = vida útil de la obra

El período de retorno se define como el número de años para que una creciente sea igualada o excedida al menos una vez en promedio.



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

V. T. Chow, D. R. Maidment y L. W. Mays, (1988), indican como criterio general de diseño que se usen períodos de retorno entre **10 y 50** años para puentes del sistema **secundario de carreteras** y entre **50 y 100** años para puentes en el sistema **principal de carreteras**. Períodos de retorno en la práctica son: **50 años para puentes pequeños**, de **50 a 100 años para puentes medianos** y de **100 a 500 años para puentes grandes**.

Dada la importancia de los puentes como parte de la infraestructura vial de un país y considerando que la seguridad del usuario debe estar por encima de todo, para la evaluación de puentes nuevos o ya construidos desde el punto de vista hidráulico y de socavación, y sobre todo, cuando haya incertidumbre en la información hidrológica disponible, resulta conveniente considerar períodos de retorno de 100 años (Q_{100}) y hacer chequeos para ver lo que ocurriría si se presentan super-crecientes de 500 años (Q_{500}), o mayores, de forma que el puente sea sobrepasado, (Q_{sp}).



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

HIDRÁULICA EN EL SITIO DEL CRUCE CON UN PUENTE

La construcción de un puente implica en ocasiones que se invada parte del cauce con el consecuente estrechamiento de su sección transversal, produciéndose cambios en la velocidad del flujo y en la pendiente hidráulica de la corriente en que se construye. El estrechamiento del cauce por un puente resulta en luces más pequeñas que reducen costos de construcción, pero por otro lado produce una pérdida de energía que se traduce en sobreelevación de la superficie del agua hacia aguas arriba de la contracción. A esta sobreelevación se le llama altura de remanso y debe tenerse en cuenta para calcular tanto la longitud como el claro vertical del puente. El remanso del flujo puede provocar inundaciones aguas arriba del puente con consecuencias negativas para los usos del suelo y otras actividades. En el sitio del estrechamiento se produce un aumento en la energía cinética del flujo que ocasiona socavaciones a veces excesivas en los apoyos del puente. El incremento en la energía potencial aguas arriba del puente ocasiona velocidades mayores en el estrechamiento, aumentándose la capacidad de transporte del flujo. La mayor capacidad de transporte se traduce en socavación del fondo en el estrechamiento y en las cercanías. A medida que la socavación continúa, el área hidráulica debajo del puente aumenta y la velocidad y la resistencia al flujo decrecen, resultando en una reducción en el remanso. Esto significa que la altura del remanso es menor si existe socavación en el cauce. Sin embargo, el incremento de la sección hidráulica ocurre algún tiempo después de iniciado el proceso erosivo. Al principio de la avenida, el proceso erosivo será nulo, teniéndose una sección recta equivalente a una de lecho fijo. Por lo tanto, el caso más desfavorable desde el punto de vista de la socavación en un puente resulta cuando se calcula el remanso considerando lecho fijo, caso en el que la altura del remanso será máxima y el poder erosivo mayor.



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

Modelos Unidimensionales	Modelos Bidimensionales	Modelos Tridimensionales
HEC2	SMS	SSIIM-CFD
HEC-RAS	SED2D	FLOW3D
RIVERCAD	RIVER 2D	DELFT 3D
ISIS	BRI-STARS	CH3D-SED
MIKE 11	G-STARS	TRISULA
WSPRO	HYDRO2DE	
HEC-6	RAM-2	
SEDIMOD	CCHE2D	
FLUVIAL-11	DELFT 2D	
DAMBRK	HEC RAS 2D	
SOBEK		



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica
SEMINARIO 2025
HIDRAULICA DE PUENTES

ANALISIS DE EROSION Y SOCAVACION LOCAL



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

FACTORES QUE AFECTAN LA SOCAVACIÓN LOCAL EN PILAS

La profundidad de socavación de equilibrio en una pila puede ser escrita según adaptación de B.W. Melville (1988) de la siguiente forma , aplicando **análisis dimensional** :

$$d_s = f(\rho_w, \rho_s, \nu, V, h, D, \sigma_g, g, a, F, \phi)$$

d_s = profundidad de socavación en la pila

ρ_w = densidad del agua (se asume constante para casos prácticos)

ρ_s = densidad del sedimento (se asume constante para casos prácticos)

ν = viscosidad cinemática (se asume constante para casos prácticos)

V = velocidad media de la corriente

h = profundidad del flujo

D = diámetro característico del sedimento

σ_g = desviación estándar geométrica del sedimento

g = aceleración debida a la fuerza de gravedad

a = ancho de la pila

F = parámetro que describe la forma de la pila

ϕ = ángulo de ataque del flujo que indirectamente considera la longitud de la pila



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

Las densidades del agua y del sedimento y la viscosidad cinemática se asumen constantes , a los efectos prácticos

$$\frac{d_s}{a} = f\left(\frac{V^2}{gD}, \frac{h}{a}, \frac{D}{a}, \sigma_g, F, \phi\right)$$

Sin embargo, además de los anteriores, existen otros factores que afectan la profundidad de Socavación

- Tiempo de duración del proceso erosivo
- Tipo de sedimento: granular o cohesivo
- Estratificación del lecho del río
- Configuración del cauce
- Presencia de hielo y basuras
- Tamaño y posición de la cimentación

La mayoría de los métodos de cálculo existentes se han desarrollado para cauces aluviales y no consideran todos los factores antes mencionados. Factores comúnmente considerados son: dimensiones y forma de la pila, ángulo de ataque del flujo, profundidad y velocidad del flujo.



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

FACTORES QUE AFECTAN LA SOCAVACIÓN LOCAL EN ESTRIBOS

La profundidad de socavación de equilibrio para un estribo se puede escribir según B. W. Melville (1992) de la siguiente forma:

$$d_s = f(\rho_w, \rho_s, \nu, V, h, D, \sigma_g, L, F, \theta, G, g)$$

d_s = profundidad de socavación

ρ_w = densidad del agua (se asume constante para casos prácticos)

ρ_s = densidad del sedimento (se asume constante para casos prácticos)

ν = viscosidad cinemática (se asume constante para casos prácticos)

V = velocidad media de la corriente

h = profundidad del flujo

D = diámetro característico del sedimento

σ_g = desviación estándar geométrica del sedimento

L = longitud del estribo que se opone al paso del agua

F = parámetro que describe la forma del estribo

θ = ángulo de ataque del flujo

G = parámetro que describe el efecto de la distribución lateral del flujo y la geometría de la sección transversal de aproximación

g = aceleración debida a la fuerza de gravedad



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

Al igual que en el caso de las pilas, el listado anterior deja por fuera algunos factores como son el **tiempo de duración de la creciente, tipo de los sedimentos, estratigrafía del lecho**, presencia de hielo y basuras, y la **geometría del cauce de aproximación**.

En general, los métodos de cálculo de profundidades de socavación en estribos consideran cauces aluviales y tienen como factores más importantes los siguientes: **longitud del estribo que se opone al paso del agua, forma del estribo, ángulo de ataque del flujo sobre el estribo, profundidad y velocidad del flujo**.



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

Longitud del estribo y profundidad del flujo

B. W. Melville (1992) clasifica los estribos en largos y cortos según que la longitud que se opone al paso del flujo sea mayor que 25 veces la profundidad del agua, o menor que 1 vez esta profundidad, respectivamente.

Este investigador ha demostrado experimentalmente que la profundidad de socavación máxima para el caso de estribos largos es 10 veces la profundidad del flujo y para estribos cortos es 2 veces la longitud que se opone al paso del agua.

La profundidad de socavación en estribos intermedios depende tanto de la longitud como de la profundidad del flujo.

· **Estribos cortos ($L < h$)**

$$\frac{d_s}{L} = f\left(\frac{V^2}{gD}, \frac{h}{L}, \frac{D}{L}, \sigma_g, F, \theta, G\right)$$

· **Para estribos largos ($L > 25h$)**

$$\frac{d_s}{h} = f\left(\frac{V^2}{gD}, \frac{L}{h}, \frac{D}{h}, \sigma_g, F, \theta, G\right)$$

En estudios de laboratorio se ha comprobado que un incremento en la longitud proyectada del estribo o del terraplén de acceso dentro del flujo aumenta proporcionalmente la socavación, pero esto no se presenta en la realidad. Este resultado se debe a que en el laboratorio, el caudal que es interceptado por el estribo y regresa al cauce principal es función de la longitud de la obstrucción, en tanto que en el campo, el flujo no se distribuye uniformemente y el caudal que regresa al cauce no es función únicamente de la longitud de la obstrucción, (Figura 1.21). Por esta razón, las ecuaciones para el cálculo de la socavación en estribos, que se basan en ensayos de laboratorio, dan profundidades de socavación muy grandes. Las profundidades dadas por las ecuaciones ocurrirían en el campo para condiciones que duplican aquellas del experimento, (HEC-18, 1993).

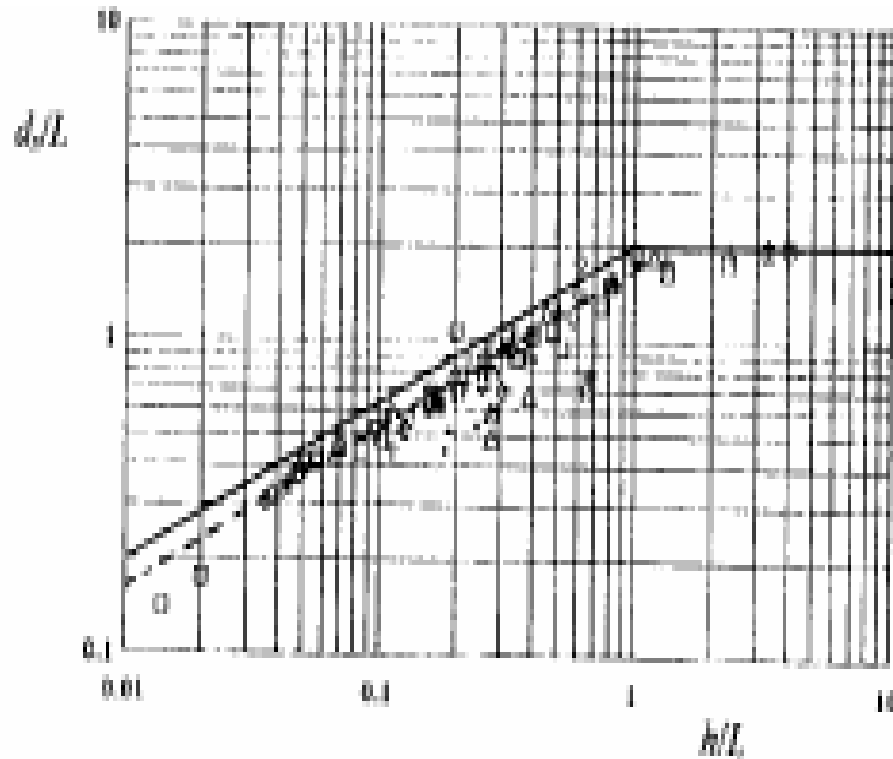


Figura 1.20 Influencia de la longitud del estribo sobre la profundidad de socavación. Estribos cortos. Melville, W. B., 1992.

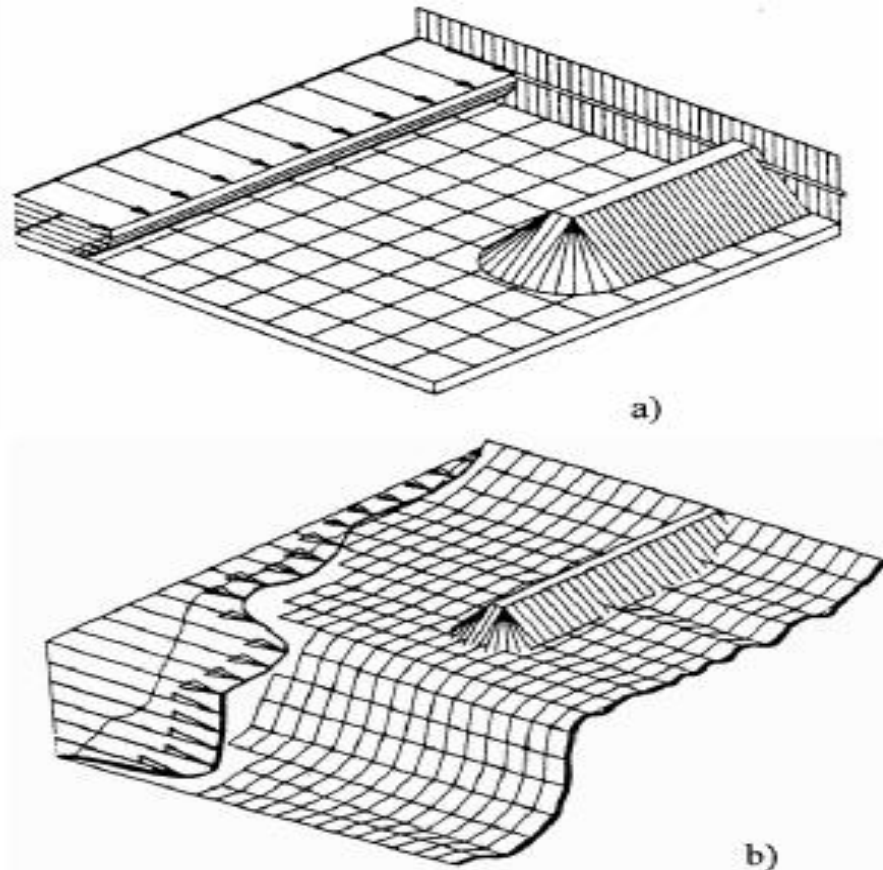


Figura 1.21 Comparación de la distribución del flujo frente a un estribo a) en laboratorio. b) en el campo. HEC-18, 1993.



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

Forma del Estribo

Las formas más frecuentes de estribos. Diferentes formas de estribos desvían el flujo de agua de distinta manera; las formas que se adaptan mejor al flujo crean menos perturbación y por lo tanto ocasionan menos profundidad de socavación. Estribos con pared inclinada hacia el cauce y con aletas son los que tienen mejor comportamiento.

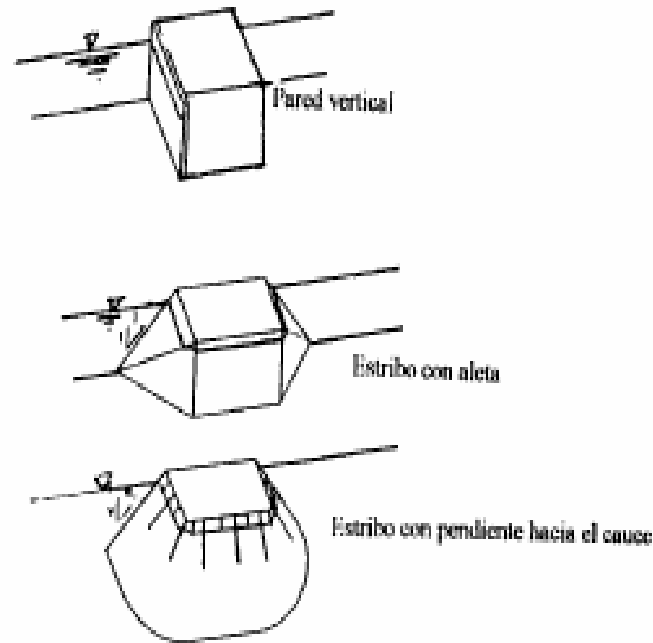


Figura 1.22 Formas comunes de estribos. Melville B. W., 1992.



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

Angulo de ataque del flujo

La profundidad de socavación aumenta con el aumento del ángulo de ataque del flujo sobre la estructura. Estribos que apuntan hacia aguas arriba producen mayores profundidades de socavación. Por el contrario, la profundidad de socavación disminuye cuando los estribos apuntan hacia aguas abajo.

El ángulo de ataque debe analizarse para flujos bajos y altos y chequear la socavación para ambas condiciones. La Figura 1.24 ilustra la forma de medir el ángulo de ataque del flujo sobre los estribos. Si los estribos están construidos en forma paralela, los ángulos de ataque son complementarios y la suma es igual a 180° .

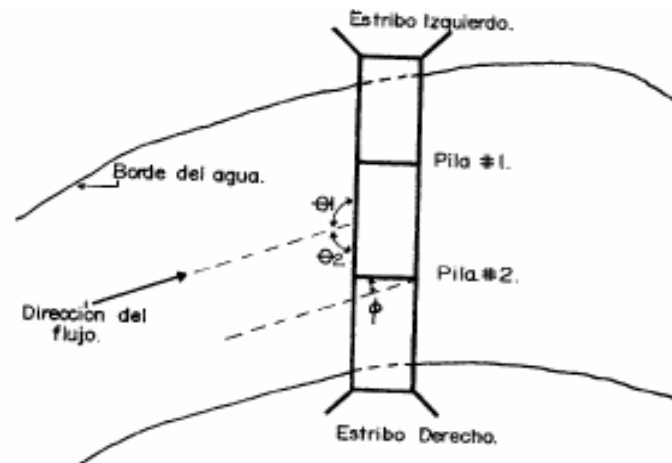


Figura 1.24 Angulo de ataque del flujo sobre el de estribos. Melville B. W., 1992.



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

Características del material del lecho como tamaño, gradación, y cohesión

El tamaño de la arena poca influencia tiene sobre la socavación. Así mismo, el tamaño de las partículas más grandes, que no son removidas por el vórtice o la turbulencia, tampoco afectan en gran medida la socavación pero sí el tiempo en que ocurre. Material grueso puede hacer que el lecho alrededor de la estructura se acorace causando que la profundidad de socavación disminuya.

Realmente, el grado en que el tamaño de la partícula decrece la socavación no está completamente definido para los casos ni de los estribos ni de las pilas. Los materiales que forman las fronteras de un río pueden ir desde boleas hasta arenas y arcillas. Los materiales del cauce pueden tener gradaciones complejas y estar estratificados tanto en sentido vertical como a través de la sección del cauce. Al igual que para el caso de las pilas, no se conoce con certeza la mecánica de la socavación en estribos construidos en materiales cohesivos ni existe mucha información que permita cuantificar la influencia del tamaño del sedimento sobre la socavación. En general, se considera que el efecto de sedimentos bien gradados es disminuir la profundidad de socavación. (Figura 1.26).

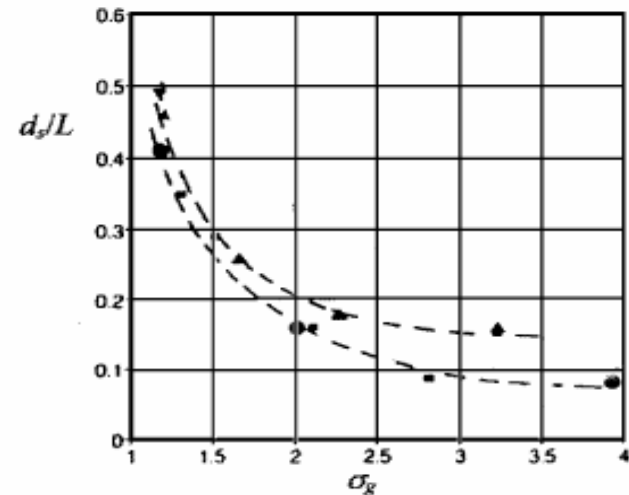


Figura 1.26 Influencia de la gradación del sedimento. Melville, B. W., 1992.



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica
SEMINARIO 2025
HIDRAULICA DE PUENTES

CONCEPTOS BASICOS DE LA EROSION y SOCAVACION EN PUENTES



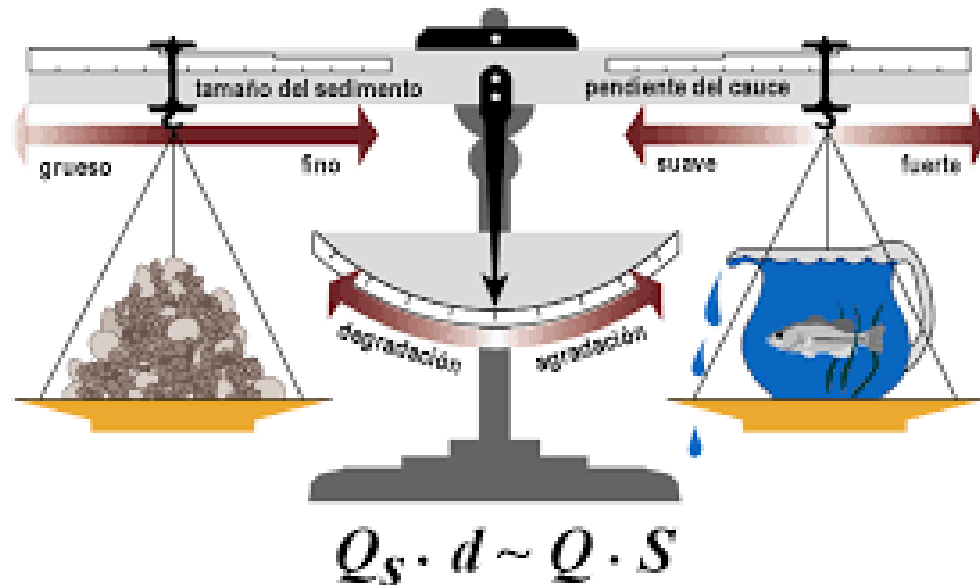
Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

La socavación es la remoción de materiales del lecho y de las banquetas de un cauce debido a la acción erosiva del flujo de agua alrededor de una estructura hidráulica.

La socavación del fondo de un cauce definido es el producto del desequilibrio entre el aporte sólido que trae el agua a una cierta sección y la mayor cantidad de material que es removido por el agua en esa sección.





Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

Granular vs Cohesivo

Los materiales se socavan en diferentes formas: suelos granulares sueltos se erosionan rápidamente mientras que los suelos arcillosos son más resistentes a la erosión. Sin embargo, la socavación final de suelos cohesivos o cementados puede ser tan profunda como la socavación en suelos arenosos, variando el tiempo en el cual se produce. La profundidad máxima de socavación se alcanza en horas para suelos arenosos, en tanto que puede tardar días en suelos cohesivos, meses en piedras areniscas, años en piedras calizas, y siglos en rocas tipo granito. Es posible que varias crecientes se requieran para que se produzca máxima profundidad de socavación dependiendo del tipo de material.



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

Formas de socavación

Dos formas de socavación se presentan en un cauce según que haya o no haya movimiento de sedimentos desde aguas arriba: **socavación en lecho móvil** y **socavación en agua clara**.

Socavación en lecho móvil

Se presenta cuando hay **transporte de sedimentos del lecho desde aguas arriba** hasta el sitio del Puente y por lo tanto parte de este sedimento queda atrapado en el hueco de socavación. En este caso, la socavación alcanza equilibrio cuando la cantidad de material que es transportado iguala la cantidad de material que es removido. Se le conoce también como socavación en lecho vivo.

Socavación en agua clara

Se presenta cuando **no hay transporte de sedimentos** del lecho desde aguas arriba al sitio del Puente y por lo tanto no hay reabastecimiento del hueco socavado. En este caso, la socavación alcanza equilibrio cuando el esfuerzo cortante en el lecho es menor que el requerido para el inicio del movimiento de las partículas, o sea cuando el **flujo no puede remover más partículas del hueco formado**.



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

Situaciones típicas de socavación en **AGUA CLARA** se presentan cuando

- El cauce está formado por **materiales muy gruesos**.
- **Depósitos locales** de materiales de lecho con tamaño más grande que el tamaño de la partícula arrastrada por la corriente.
- **Cauces acorazados** donde la fuerza tractiva es suficientemente alta como para penetrar el lecho en la zona de pilas y estribos.
- **Canales con vegetación** donde el flujo solo puede penetrar la cubierta en la zona de pilas y estribos.
- **Corrientes de baja pendiente** y flujos bajos.

Puentes construidos en corrientes con material grueso, están sujetos durante una creciente a socavación en agua clara para caudales bajos, lecho móvil para caudales altos y nuevamente agua clara cuando comienzan a bajar los caudales.

Existen investigaciones con **resultados contradictorios** en el sentido que las profundidades de socavación en **lecho móvil** exceden a las correspondientes en **agua clara** y viceversa.

J. **Raudkivi** (1986) reporta que **J. Chabert y P. Engeldinger** (1956) fueron los primeros en describir el fenómeno de la socavación en una pila circular en términos del tiempo y de la velocidad. Ellos mostraron que la socavación en agua clara alcanza su máximo en forma asintótica en un tiempo mayor,

del orden de días, que la socavación en lecho móvil, Figura 1.1

La socavación en lecho móvil se desarrolla rápidamente y fluctúa alrededor de un valor medio como respuesta al paso de formas del lecho. Esto se debe a que la socavación en agua clara ocurre principalmente en lechos de material grueso, por lo que la profundidad máxima de socavación solo se presentaría después de varias crecientes.

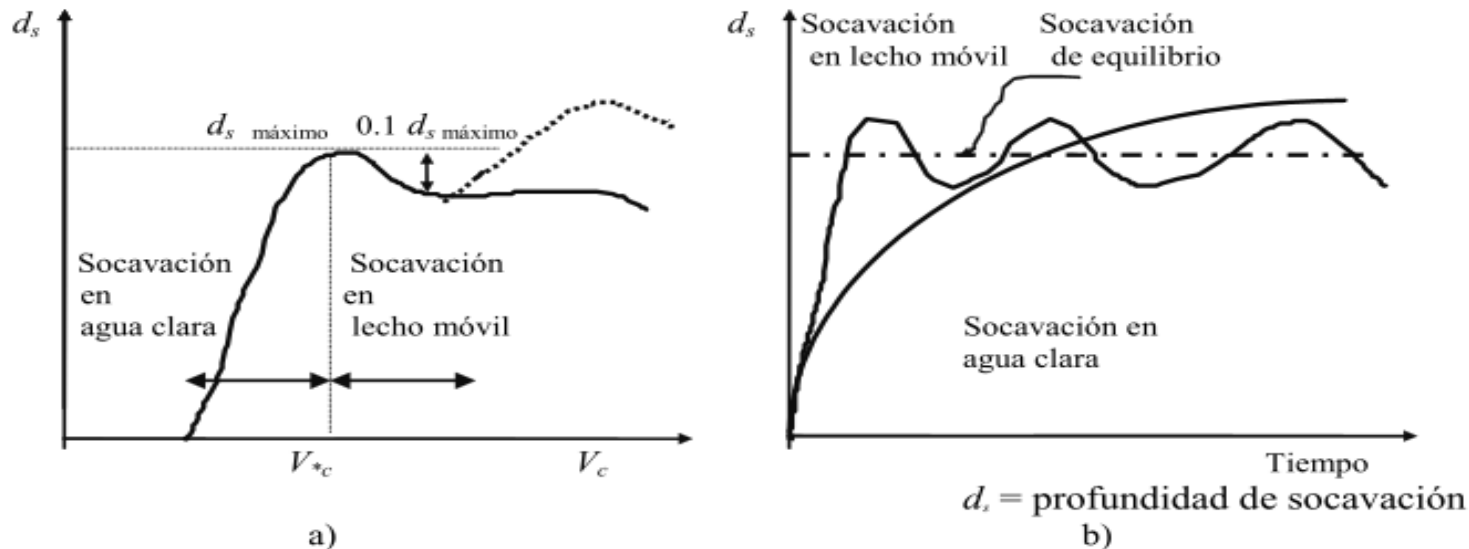


Figura 1.1 Profundidad de socavación en la pila en un cauce arenoso. a) En función de la velocidad crítica. b) En función del tiempo. Raudkivi, A. J. y Ettema, R., 1983.



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

Agua clara $V < V_c$

CHEZY MANNING

Lecho móvil $V > V_c$

$$V = C\sqrt{RI} = \frac{1}{n} R^{2/3} I^{1/2} \quad \longleftrightarrow \quad V_c = 6.19h^{1/6} D_{50}^{1/3}$$

Tipos de socavación

Además de conocer la posición de la superficie libre del agua es necesario saber la posición del fondo del cauce alterado por causas naturales o artificiales. **Cuatro tipos de socavación** se tienen en cuenta al hacer la evaluación de la socavación en puentes

- **Socavación a largo plazo.**
- **Socavación por migración lateral de la corriente.**
- **Socavación general por contracción y otras causas.**
- **Socavación local. (Pilas y Estribos)**

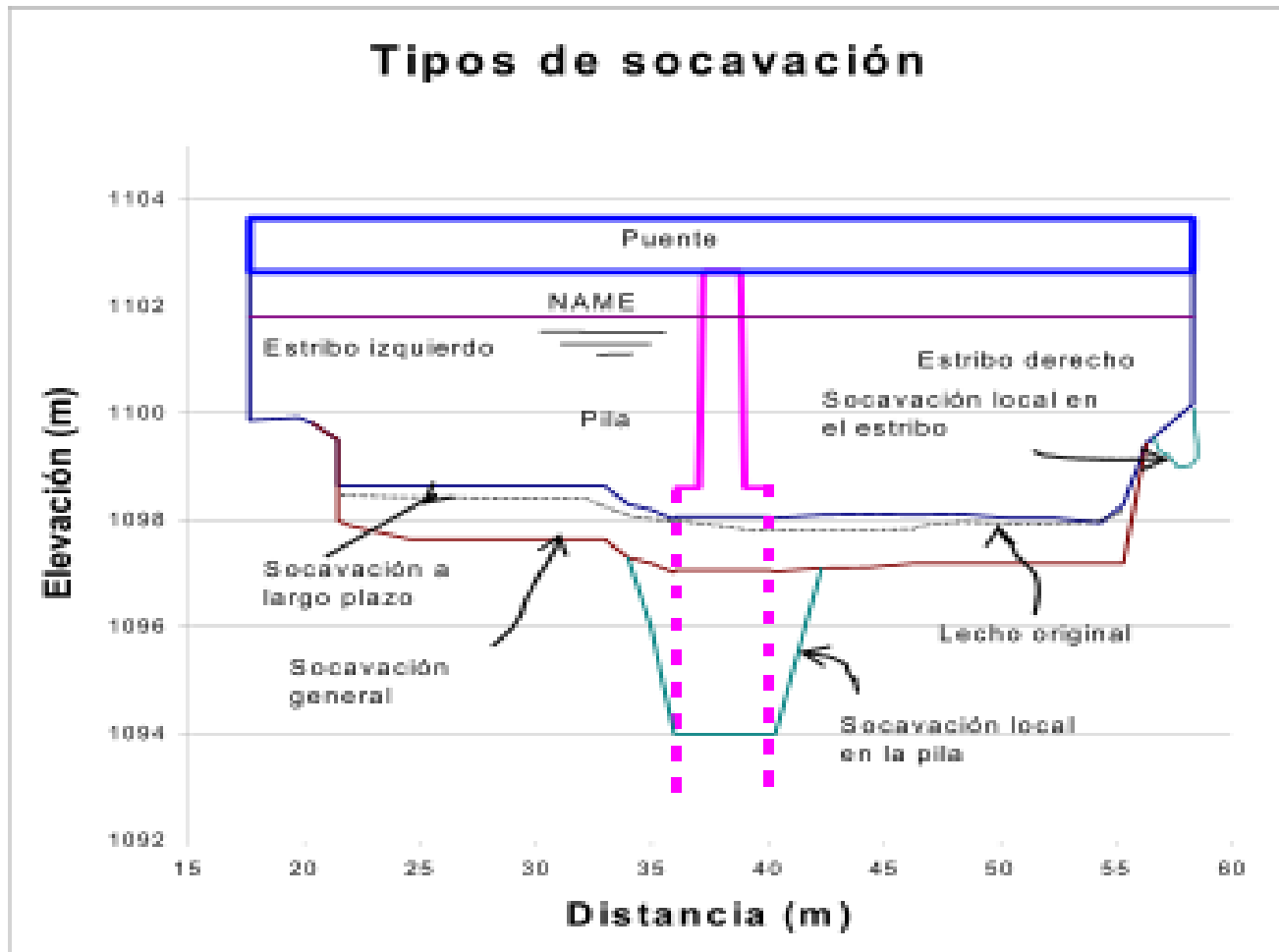


Figura 1.2 Tipos de socavación a calcular en un puente.



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

FACTORES EXTERNOS QUE PUEDEN AFECTAR LA ESTABILIDAD DE UN PUENTE

La socavación en puentes es un problema de hidráulica fluvial en el que muchas disciplinas se encuentran: **hidrología**, **hidráulica**, **geotecnia** y **estructuras**, entre otras, y por lo tanto, su conocimiento es esencial para estudiar y entender tanto como sea posible el comportamiento del cauce natural ante una obra humana como es la construcción de un puente.

Desde el punto de vista de la **hidráulica fluvial**, todos los ríos están sujetos en mayor o menor grado a procesos de erosión, equilibrio o sedimentación, que pueden llegar a afectar la estabilidad de un puente o de otra obra, que se construya en el cauce de un río.

Un río se considera en estado de equilibrio cuando no varía el perfil del fondo y de las márgenes del cauce y por lo tanto existe compensación entre los sedimentos que son transportados hacia el sitio y desde el sitio; está en estado de erosión o degradación, si el nivel del lecho baja o si las márgenes se desplazan hacia afuera, lo que se presenta cuando la carga de sedimentos es inferior a la capacidad de transporte del flujo de agua; está en estado de sedimentación o agradación, si el nivel del lecho se eleva o si las márgenes se desplazan hacia el interior del cauce y ocurre cuando hay excesos de sedimentos en el cauce.



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

- **Características y tipo de río.** Es necesario saber la geometría del cauce, y establecer si el río es relativamente estable o inestable en su forma y cuán sensible es al cambio dependiendo de los materiales del lecho y de las bancas. El río puede ser recto, meándrico o entrenzado; pequeño, mediano o grande; torrencial o aluvial, puede estar en su juventud, en su madurez o ser clasificado como viejo. Cada tipo de río, implica tener en cuenta diferentes consideraciones de diseño.
- **Hidrología.** El registro de caudales y niveles máximos es esencial para el diseño de un ponedero ya que las máximas profundidades de socavación se presentan en condiciones de crecientes tal como se ilustra en la Figura 1.28.

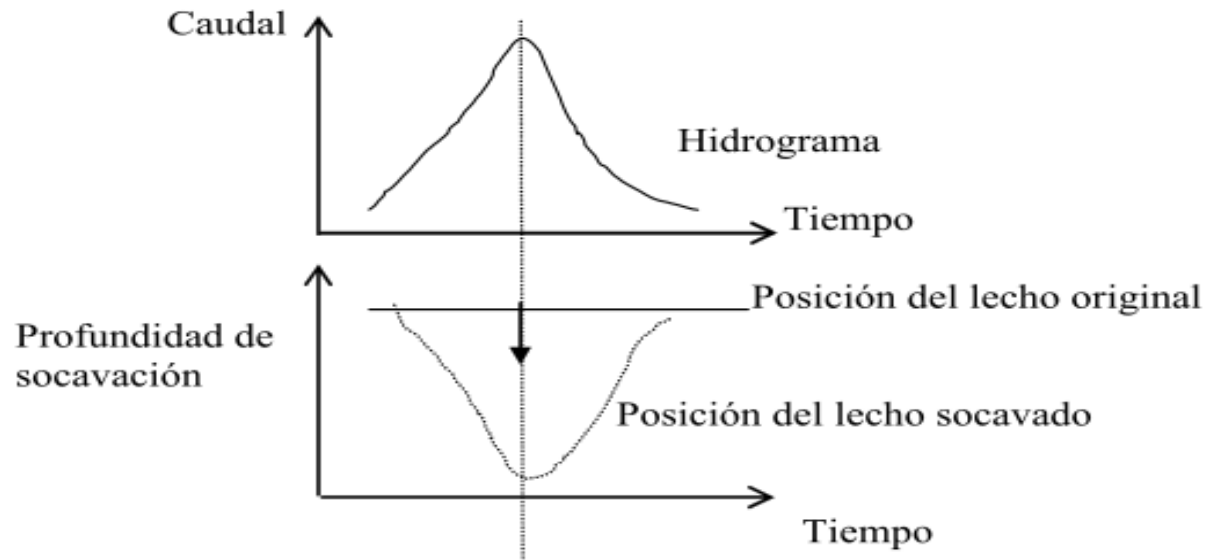


Figura 1.28 Correlación entre hidrograma de crecientes y profundidades de socavación.



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

- **Características de la cuenca de drenaje.** El agua fluyendo en un río y el sedimento transportado están usualmente ligados con la clase de cuenca hidrográfica. Por lo tanto, es necesario estudiar las características geológicas, hidrológicas, topográficas y el uso de la cuenca hidrográfica. La cuenca puede tener entre otros usos: recreacionales, urbanísticos, industriales, agrícolas, control de inundaciones, pastoreo. Es necesario establecer posibles respuestas de la cuenca ante cambios en su uso o en su cobertura vegetal y como estos cambios pueden alterar la estabilidad de un puente.
- **Alineamiento del flujo.** El estudio detallado del comportamiento del río a lo largo del tiempo y con caudales variables es necesario para el correcto diseño y orientación de las estructuras. Las características cambiantes del río en cuanto a niveles de agua, distribución de la velocidad, dirección del flujo, posición del thalweg y forma tienen un efecto significativo en la intensidad y dirección del ataque a los estribos, las pilas y los terraplenes. Estos factores determinan la importancia y la duración del ataque del agua y por ende, la necesidad de obras de control para hacer que el sistema del río opere aceptablemente dentro de un rango amplio de condiciones. Es también necesario que las estructuras del puente se alineen con la dirección más desfavorable del flujo.



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

- **Flujo en las zonas de inundación.** El flujo de agua se presenta no solamente en el cauce principal sino también en las laderas y zonas bajas inundables. Los caudales de diseño de un puente usualmente fluyen en ambas zonas y solamente mediante el estudio de las características y la geometría del cauce principal y las zonas de inundación se puede determinar el tipo y la distribución del flujo. El conocimiento de las características del flujo en las laderas y planicies de inundación es básico para el diseño de las zonas de estrechamiento o invasión del cauce por el puente.
- **Localización del puente.** El sitio del puente debe ser parte del sistema de transporte en el área y se selecciona considerando aspectos técnicos, ambientales y económicos. Algunos aspectos a considerar son: longitud del puente, longitud de los estribos, costo de la tierra a adquirir, costos de mantenimiento.
- **Obstrucciones al flujo.** Causas de obstrucciones al flujo que pueden afectar la estabilidad de un puente son: estructuras mal alineadas, estructuras con poca capacidad hidráulica, acumulación de basuras y desechos debido a mal manejo de la cuenca hidrográfica y a pobre mantenimiento del cauce, formaciones del lecho. Todos estos son factores que pueden afectar negativamente la estabilidad de un puente.
- **Estabilización del cauce.** Adicionalmente al análisis de los anteriores factores se debe determinar también la existencia y/o la necesidad de obras de estabilización de las bancas del cauce. La localización y el diseño de varios tipos de estructuras de control fluvial dependen de las características del río y de las condiciones impuestas por el puente.



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

- **Respuestas a corto plazo.** El estudio de las interacciones puente-río es necesaria para tratar de establecer la respuesta a corto plazo del sistema fluvial ante la construcción de una estructura. La zona del río debe ser considerada tanto aguas arriba como aguas abajo del puente. Las técnicas que se usan en este análisis incluyen desde modelos matemáticos, modelos físicos, relaciones geomórficas cualitativas basadas en principios de la hidráulica fluvial y experiencia y buen criterio del ingeniero.
- **Respuestas a largo plazo.** La respuesta a largo plazo del ponteadero, o de un estrechamiento longitudinal o en el río mismo, deben considerarse basándose en todos los proyectos de desarrollo que se tengan sobre el río, incluida la carretera. Evaluaciones cualitativas, cuantitativas, modelos físicos y computacionales. Estos dos últimos son las mejores herramientas para predecir los cambios en el sistema del río tanto a corto como a largo plazo. Se justifican en proyectos muy importantes ya que la construcción de un modelo demanda mucho tiempo y dinero, además que se requiere de mucha información para su calibración.
- **Selección del sitio.** Los factores antes citados tales como: forma y alineamiento del río, variaciones del río con el tiempo, tipo de material del lecho y las bancas, características hidrológicas e hidráulicas del río, pasado, presente y futuro de las condiciones de la cuenca hidrográfica, etc., tienen su peso en la decisión final sobre la selección del sitio del puente y la evaluación de su estabilidad. Después de hacerse un análisis detenido de los posibles ponederos teniendo en cuenta los anteriores factores, se procede a la determinación de la geometría y longitud de las zonas de aproximación al puente, el tipo y localización de los estribos, el número y localización de las pilas, la profundidad de la cimentación para que sea estable a la socavación, la localización de las zonas de invasión en los planos de inundación, y las medidas de control fluvial para asegurar que el río se ajuste en la mejor forma posible a las condiciones impuestas por el puente.