



SEMINARIO DE HIDRÁULICA DE PUENTES

Facultad de Ingeniería, Departamento de Hidráulica

28 de Octubre – Clase 4: Medidas de Protección



Ing. Adolfo Guitelman
Ing. Agustín Rigou



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica
SEMINARIO 2025
HIDRAULICA DE PUENTES

MEDIDAS DE PROTECCION CONTRA LA EROSION Y SOCAVACION



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

EXISTEN UNA SERIE DE RECOMENDACIONES BASICAS , QUE ES CONVENIENTE REPASAR , ANTES DE ENTRAR EN DETALLE , DE LAS PROTECCIONES ESPECIFICAMENTE

- La Protección contra Erosión y Socavación , no asegura por si misma la estabilidad geotécnica y estructural del elemento a proteger , esto debe ser una condición previa .
- La protección contra Erosión y Socavación, sea esta rígida o flexible debe siempre asegurar la contención de los finos del terreno , porque de otra forma no cumplirá adecuadamente su función , esto implica filtro de Terzaghi o un adecuado Geotextil .
- Cuando los fenómenos erosivos esperados , sean de importante magnitud , son preferibles las protecciones Flexibles, dado que estas se acomodan y continúan en servicio aun con importantes deformaciones, como veremos.



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

MEDIDAS PARA LA PROTECCIÓN DE PUENTES

Las medidas de protección se usan para controlar, demorar, minimizar o monitorear problemas de estabilidad de cauces y puentes. La solución al problema de socavación de un puente debe iniciarse con el estudio de las causas que lo originan, incluyendo aspectos desestabilizantes desde el punto de vista topográfico, hidrológico, hidráulico, estructural y de suelos.

En general, las medidas de protección de puentes se clasifican en tres grandes tipos tal como se resume en la siguiente tabla

<p>Medidas hidráulicas</p> <p>Limitan la socavación mediante la modificación de las líneas de corriente y la protección del lecho y de las bancas del cauce contra las fuerzas erosivas del flujo de agua</p>	<p>1) Estructuras de control fluvial.</p> <ul style="list-style-type: none"> · Estructuras longitudinales construidas a lo largo de las orillas del cauce: revestimientos, muros. · Estructuras transversales al flujo de agua: espolones, traviesas de fondo, vertederos de cresta ancha sumergidos. · Combinación de estructuras longitudinales y transversales. <p>2) Protección local de pilas y estribos del puente.</p> <ul style="list-style-type: none"> · Revestimientos con enrocados, bolsas rellenas, gaviones, colchacretos, pentápodos. · Pilas auxiliares y pantallas aguas arriba. · Pantallas estabilizadoras. · Diques de encauzamiento.
<p>Medidas estructurales</p> <p>Modifican estructuralmente el puente para mejorar las condiciones de estabilidad de la cimentación</p>	<p>1) Reforzamiento de la cimentación del puente.</p> <ul style="list-style-type: none"> · Recalces · Encamizados · Profundización de la cimentación · Extensión de la cimentación · Mejoramiento del suelo de cimentación <p>2) Modificaciones del puente.</p> <ul style="list-style-type: none"> · Geometría del puente · Reemplazo de pilas y/o estribos · Reemplazo del puente
<p>Monitoreo</p> <p>Recolección continua de información del cauce y del puente para alertar sobre fallas o problemas potenciales</p>	<p>1) Monitoreo visual</p> <p>2) Monitoreo post creciente</p> <p>3) Monitoreo en tiempo real</p>



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica
SEMINARIO 2025
HIDRAULICA DE PUENTES

Es muy importante entender cuáles son los factores que causan la socavación y cuantificar su profundidad máxima, para determinar alternativas de protección y poder seleccionar la medida de control más adecuada.

Es necesario también prever los efectos negativos que pueda tener la adopción de alguna de las alternativas de solución al problema de socavación sobre el cauce , la orilla opuesta o sobre el mismo puente.



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

MEDIDAS HIDRÁULICAS PARA PROTECCIÓN DE PUENTES

Las medidas hidráulicas de protección son todas las que se diseñan y construyen para modificar las líneas de corriente o resistir las fuerzas erosivas del flujo en un cauce.

Muchas de las medidas hidráulicas de control se consideran temporales pues tarde o temprano el flujo de agua las destruye total o parcialmente, pero entre tanto, han protegido la estructura y permitido que el puente siga en operación hasta que se construyan medidas estructurales mas permanentes.

El monitoreo de las mismas se requiere durante crecientes para verificar su comportamiento. El principal objetivo de estas medidas es proteger la estructura principal contra socavación durante crecientes a costa de su propio daño, por lo que si sufren algún deterioro deben someterse a reparaciones posteriores, lo que siempre resulta mas barato y fácil que reparar un puente.

Existen tres tipos principales de estructuras hidráulicas de control: **estructuras longitudinales, estructuras transversales y combinación de ellas.**



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

Estructuras Longitudinales

Son estructuras construidas directamente sobre las bancas del cauce de un río o canal y orientadas paralelamente al flujo con el objetivo de que las líneas de corriente con alta velocidad no puedan arrastrar materiales de las orillas. La principal forma de protección longitudinal es con revestimientos que pueden ser rígidos o flexibles prefiriéndose siempre estos últimos ya que se comportan mejor ante posible falla de los mismos por razones como socavación, asentamientos o problemas estructurales. Las estructuras longitudinales buscan proteger el cauce en tres zonas tal como se ilustra en la Figura N° 7.1.

- El talud del dique protector si existiese o talud superior del río, por encima del nivel de aguas máximas extraordinarias (*NAME*).
- La orilla superior del cauce natural por encima del nivel de aguas medias bajas (*NAMB*).
- La orilla inferior del cauce natural situada bajo el nivel de aguas medias bajas y por lo tanto, siempre sumergida.

Usualmente, en tramos rectos se protegen ambas orillas a lado y lado del río, pero en los curvos solo la parte exterior. Las obras de protección directamente construidas sobre la orilla del cauce requieren:

- Conformación de la orilla con una pendiente estable.
- Provisión de drenajes para reducir los efectos de la saturación y las fuerzas de filtración.
- Revestimiento de los taludes con materiales resistentes a la erosión.
- Defensa de la orilla inferior contra socavación.
- Muros de protección de riberas en gaviones u otros materiales.



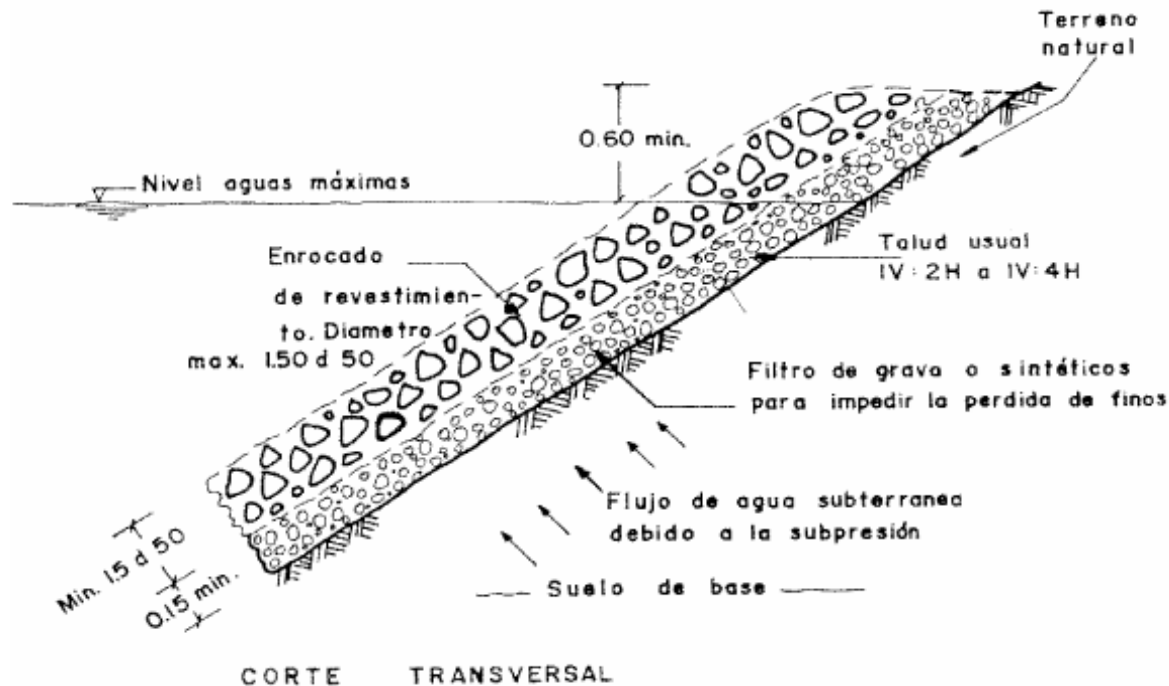
Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

REVESTIMIENTO CON ENROCADOS

Los enrocados son protecciones en piedra o fragmentos de roca que se colocan en los canales en tierra y cauces naturales. Están compuestos de una capa de material bien gradado, durable, redondeado o angular, suelto o con mortero de pega, sin o sobre filtros de gravilla y arena o Geotextiles.





Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

TAMAÑO DE LAS PIEDRAS

Existen **muchos métodos** para calcular el tamaño de las piedras a emplear y cualquiera de los existentes dan resultados que varían dentro de rangos bastante amplios. Para aquellos casos en que el enrocado encontrado en la zona no reúna los requisitos de tamaño y peso, debe usarse mortero de pega tomándose las necesarias precauciones para permitir el drenaje a través de él y evitar que fuerzas de subpresión levanten el revestimiento. Otra posibilidad, es el uso de materiales prefabricados. Se presentan a continuación algunos métodos para el cálculo del tamaño de la piedra de protección.

Método modificado de Isbash

La fórmula modificada de Isbash toma en cuenta los taludes del canal o de la orilla del cauce natural. Con ella se obtienen resultados que están de acuerdo con la experiencia. Fue recomendada para el diseño de enrocados por el Comité de Trabajo de la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE).

W = peso de las piedras de diámetro medio (D_{50}) [Kgv]

G_p = gravedad específica de las piedras, usualmente = 2.65

ϕ = ángulo que forma el talud del revestimiento con la horizontal
[grados]

V = velocidad del flujo en el lecho [m/seg]

D_{50} = diámetro de la piedra para el cual el 50% del material por peso es menor [m]

$$W = \frac{0.0232 G_p V^6}{(G_p - 1)^3 \cos^3 \phi}$$



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

Método del “Bureau de Reclamación”

El "Bureau de Reclamación" de los Estados Unidos efectuó ensayos en su laboratorio de hidráulica sobre arenas, gravas y piedra seleccionadas, con tamaños hasta de 2½" en la dimensión máxima. Los resultados obtenidos de estos experimentos concuerdan con los resultados de otros investigadores y las observaciones de campo sobre enrocados hasta de 18" se ajustan bastante bien a la curva que los representa y que está dada por la Ecuación :

$$D_{100} = \frac{0.0668V^2}{G_p - 1}$$

D_{100} = diámetro del enrocado para el cual el 100% del material por peso es más fino [m]

V = velocidad media de la corriente [m/s]

G_p = gravedad específica de las piedras, usualmente = **2.65**

La ecuación anterior se aplica especialmente para determinar el tamaño mínimo que deben tener las piedras para resistir la velocidad del flujo en enrocados colocados aguas abajo de pozos de quietamiento.



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

Método de la División de Carreteras de California

La expresión utilizada para el dimensionamiento del enrocado es:

$$W = \frac{0.0113 G_p V^6}{(G_p - 1)^3 \text{sen}^3(70 - \phi)}$$

W = peso mínimo de las piedras de la capa exterior del enrocado [Kgv]

V = velocidad media de la corriente [m/s]

G_p = gravedad específica de las piedras, usualmente = 2.65

ϕ = ángulo que forma el talud con la horizontal [grados]

Metodo del INA – Argentina – Lopardo

$$U_{\max} = 2 U_c = 1,4 \sqrt{g (s - 1) d} \left(\frac{h_0}{d} \right)^{\frac{1}{6}}$$



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

Filtros

Los filtros son usados bajo el enrocado para evitar la pérdida de partículas finas del suelo que se puede producir después del paso de una creciente en suelos sin o con poca cohesión, tales como gravas y arenas finas. Los filtros son de tipo granular o geotextiles, siendo mas comunes los primeros, pero también se pueden emplear telas sintéticas reemplazando algún componente del filtro gradado.

En el caso de usarse geotextiles, el tamaño de la piedra en contacto con el filtro debe limitarse, o colocarse una capa protectora de material, para evitar que la tela sea deformada o rota debido a la colocación del enrocado o por la diferencia de tamaños que pueden generar esfuerzos de tensión que deformen la tela. Los filtros deben reunir dos requisitos básicos: estabilidad y permeabilidad.

Filtros granulares en suelos sin o con poca cohesión

El cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos da unas especificaciones para el diseño de filtros (U.S. Army, Corps of Engineers, 1978) para suelos sin o con poca cohesión, que se resumen así:

· **Para estabilidad**

$$\frac{D_{15f}}{D_{85b}} \leq 5$$

f = material de filtro
 b = material de base a proteger
 D_x = x % del material es menor que el diámetro D



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

La siguiente condición busca prevenir movimiento del material de base dentro del filtro

$$\frac{D_{50f}}{D_{50b}} \leq 25$$

Para la permeabilidad

$K = D_{10}^2$ asegura que el material de filtro sea lo suficientemente permeable

K = coeficiente de permeabilidad

$\frac{D_{15f}}{D_{15b}} \geq 5$ asegura que el material del filtro sea más permeable que el material de la base.

De lo anterior se deduce que el material de filtro tiene un coeficiente de permeabilidad 25 veces mayor que el material de base, puesto que D_{15} es muy parecido al D_{10} .



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

Filtros granulares en suelos cohesivos

Si el material de base es cohesivo tipo arcilla o suelos de baja permeabilidad, estos requisitos no se aplican, debiendo cumplirse los siguientes

Para la estabilidad

$$D_{15f} \leq 0.4 \text{ mm}$$

Para la permeabilidad

Si el material de base es muy fino, el material de filtro requerido debe ser también fino y más de una capa de filtro gradado puede necesitarse, caso en el que cada capa debe satisfacer las condiciones de estabilidad y permeabilidad con respecto a la capa contigua.

REVESTIMIENTO CON GAVIONES

La protección se logra con una serie de colchones de gaviones consistentes en cajones de malla de alambre rellenos de piedra colocados sobre la ribera y apoyados en un muro de pata. El tamaño de cada cajón puede ser de 4x1 m² hasta 4x4 m². El espaciamiento entre alambres es de 5 a 14 cm.

La malla del gavión se rellena con piedras o cantos rodados de tamaño mínimo de 10 cm. El tamaño de las piedras que quedan próximas a las mallas no debe ser menor de 1.5 veces la separación entre alambres.

Los gaviones son obras temporales o semi-permanentes muy usados en ríos por su flexibilidad y economía frente a otras alternativas.

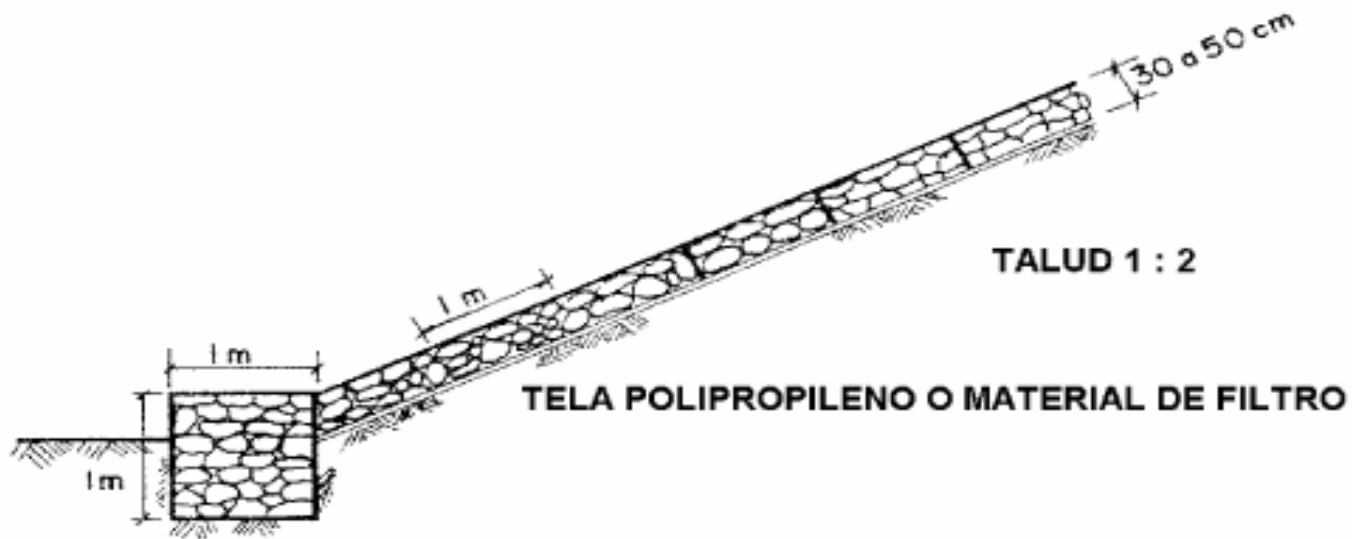


Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

Espesor [m]	Talud
0.30	Menor de 1V:2H
0.50	Menor de 1V:1H y mayor de 1V:2H
1.00	Mayor de 1V:1H





Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

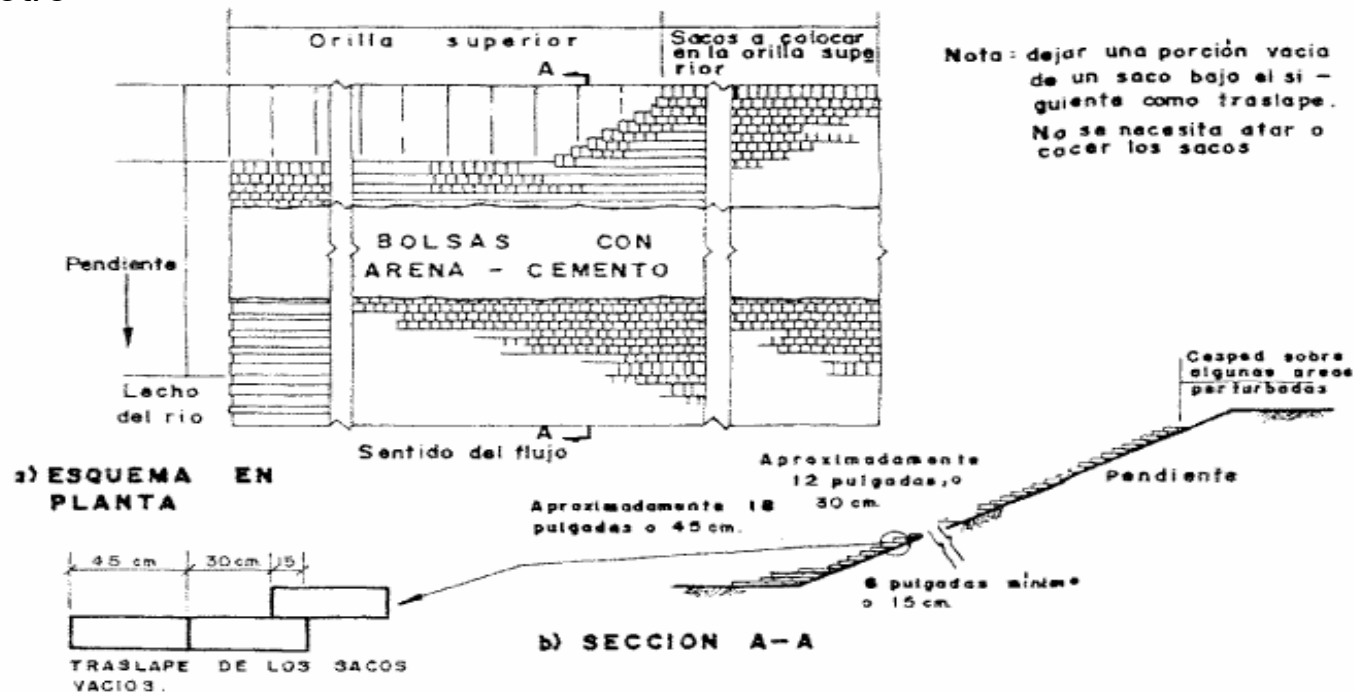
HIDRAULICA DE PUENTES

REVESTIMIENTOS CON SACOS

Sacos traslapados rellenos de arena y suelo se han usado ampliamente alrededor de estructuras hidráulicas como medida de protección de emergencia contra avenidas.

Esta protección es de corta vida a no ser que los sacos se rellenen de mezclas de suelo-cemento o arena-cemento.

Es recomendable no llenar totalmente los sacos sino dejar una parte vacía para hacer el traslape entre uno y otro





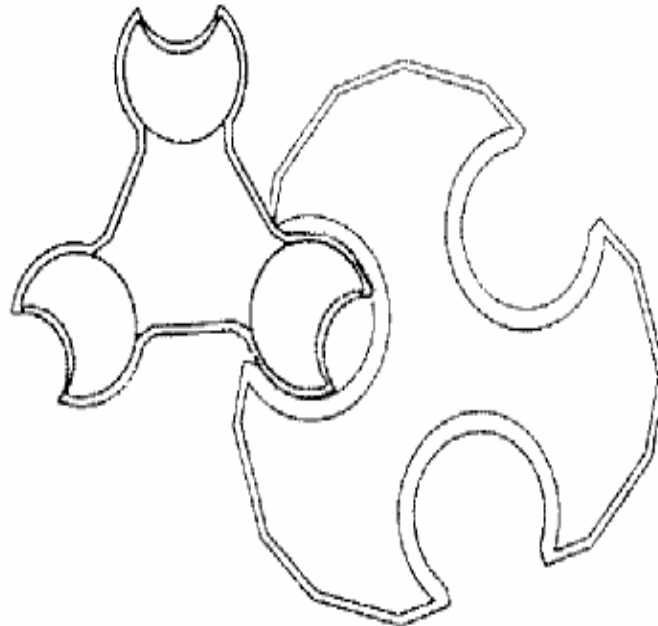
Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

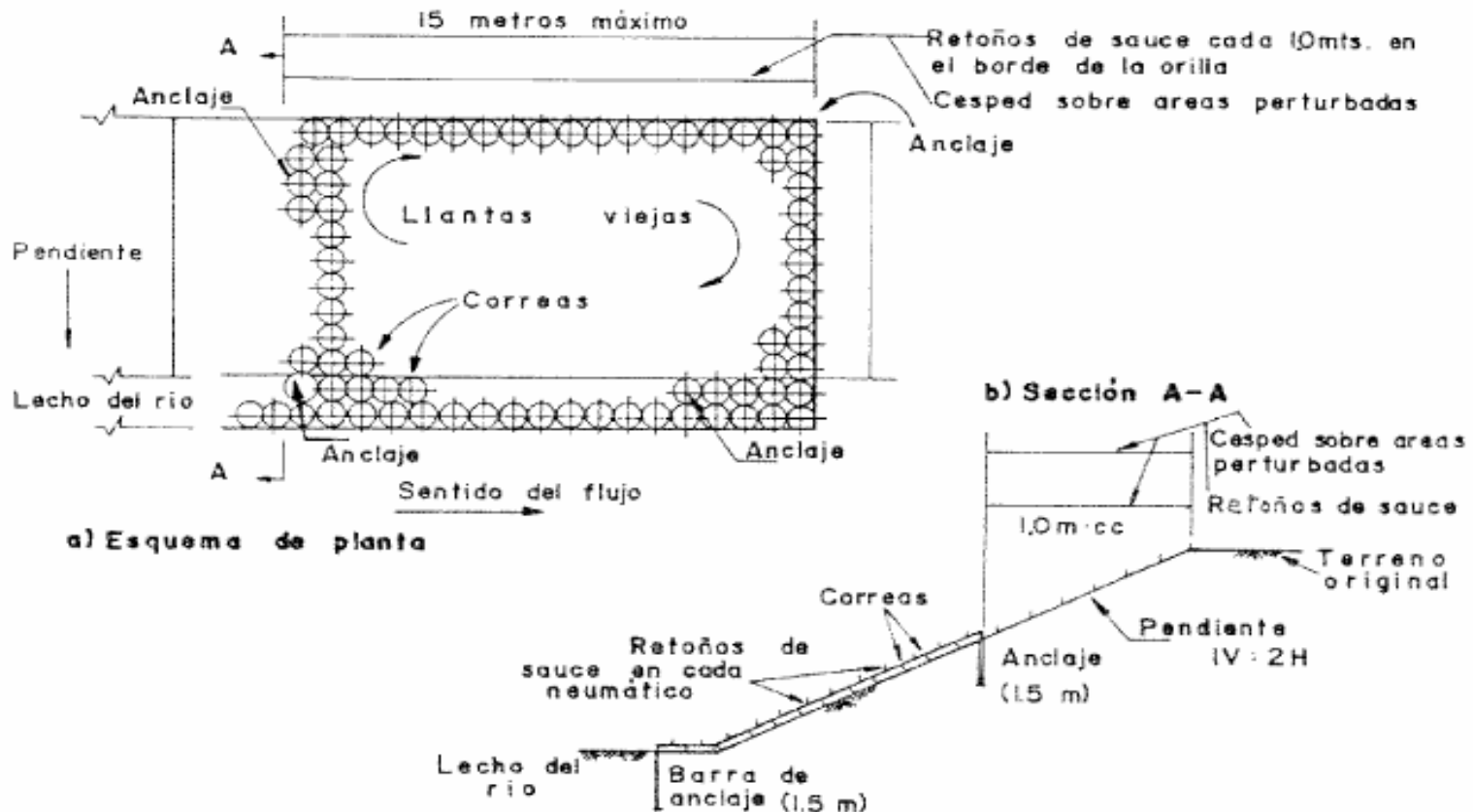
REVESTIMIENTO CON BLOQUES ARTICULADOS

Bloques de concreto en diferentes formas son colocados manualmente sobre una pendiente, unidos entre ellos y sujetos a la fundación, buscando un moderado grado de protección. La vegetación puede crecer libremente o se planta entre los bloques por encima del nivel del agua.



REVESTIMIENTO CON NEUMATICOS USADOS

Neumaticos usados de carros se usan como revestimiento al colocarlas una al lado de la otra como se ve en la Figura





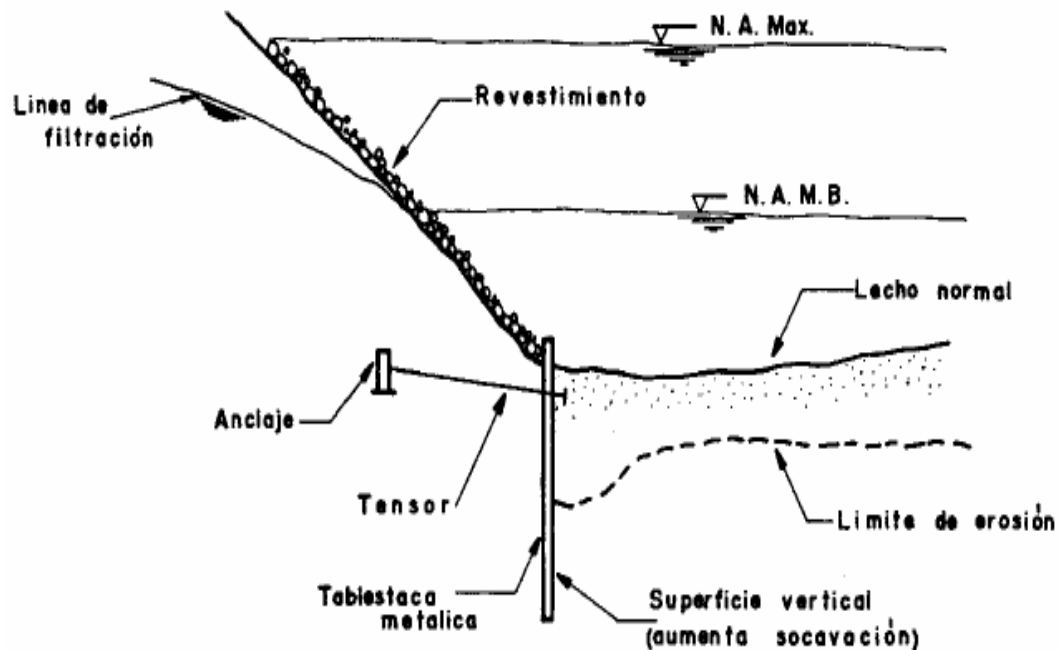
Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

TABLESTACAS METÁLICAS

Las tablestacas metálicas deben hincarse por debajo del nivel máximo previsto de erosión y colocarse a lo largo de la pata del revestimiento, tal como se aprecia en la Figura . Si la socavación es moderada, el tablestacado metálico se puede reemplazar por pilotes redondos colocados uno junto al otro. Su uso se presenta principalmente en arenas.





Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

ESTRUCTURAS TRANSVERSALES

Las estructuras transversales se proyectan dentro de la corriente formando un ángulo o perpendicularmente a la dirección dominante del flujo.

Espigones

Los espigones son estructuras apoyadas o empotradas en la orilla del río y que penetran en su cauce. Su función es desviar las líneas de corriente alejándolas de la orilla donde se construyen y evitar así que ésta sea erosionada. Además, los espigones reducen velocidades locales favoreciendo que entre ellos se depositen materiales que arrastra el río lo que permite el crecimiento de vegetación nativa. Pueden ser :

- **Tipo recto**

- Formando ángulo recto con la corriente.
- Dirigido hacia aguas arriba.
- Dirigido hacia aguas abajo.

- **Tipo martillo o en forma de T**

- **Tipo bayoneta**

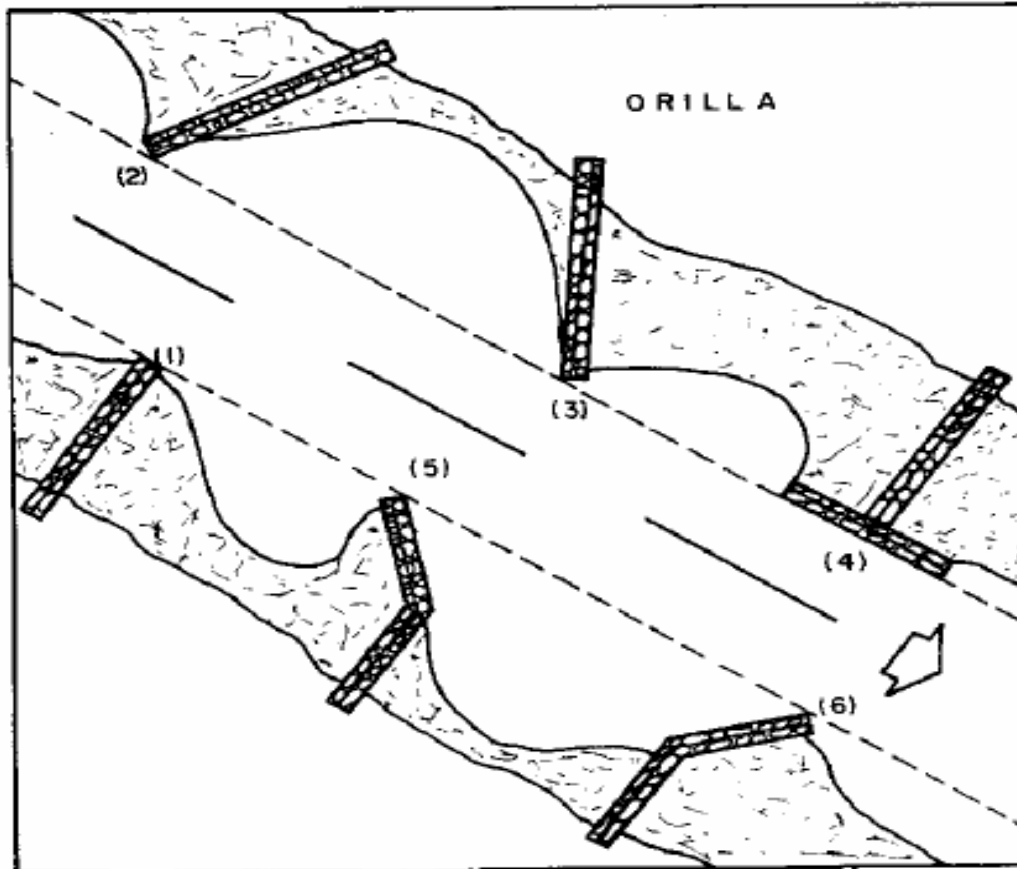
- Dirigido hacia aguas abajo.
- Dirigido hacia aguas arriba.



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES



1 RECTO

2 HACIA AGUAS ARRIBA

3 HACIA AGUAS ABAJO

4 TIPO DE MARTILLO O EN T

5 BAYONETA HACIA AGUAS ARRIBA

6 BAYONETA HACIA AGUAS ABAJO



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

Estructuralmente, los espigones se dividen en rígidos, semi-rígidos y flexibles.

- Los espigones rígidos consisten en piedra gruesa mezclada con mortero; se recomienda usarlos especialmente en cauces de montaña en aquellos tramos donde se encuentre una buena fundación en roca.
- Los espigones semi-rígidos consisten en bloques rígidos (especialmente de concreto) unidos mediante dispositivos que permiten el movimiento de los primeros cuando se produzcan socavaciones del fondo del cauce. Se trata de combinar las estructuras rígidas y flexibles cuando las condiciones sean favorables.
- Los espigones flexibles son los más usados. Consisten de unidades flexibles que se acomodan a las deformaciones del lecho durante los períodos de crecientes.

El gavión es el elemento más recomendado en estos casos para formar espolones, en especial por la flexibilidad que presenta el extremo del mismo al producirse la socavación del fondo.

Los espolones flexibles también se construyen en gravas, pero en este caso se deben tener en cuenta las velocidades de flujo para calcular el diámetro de los materiales a usar, de tal manera que dichos materiales no sean arrastrados por la corriente.

Una combinación de espolones en gaviones y piedra gruesa, permitirá construir espolones en cauces con aguas profundas.

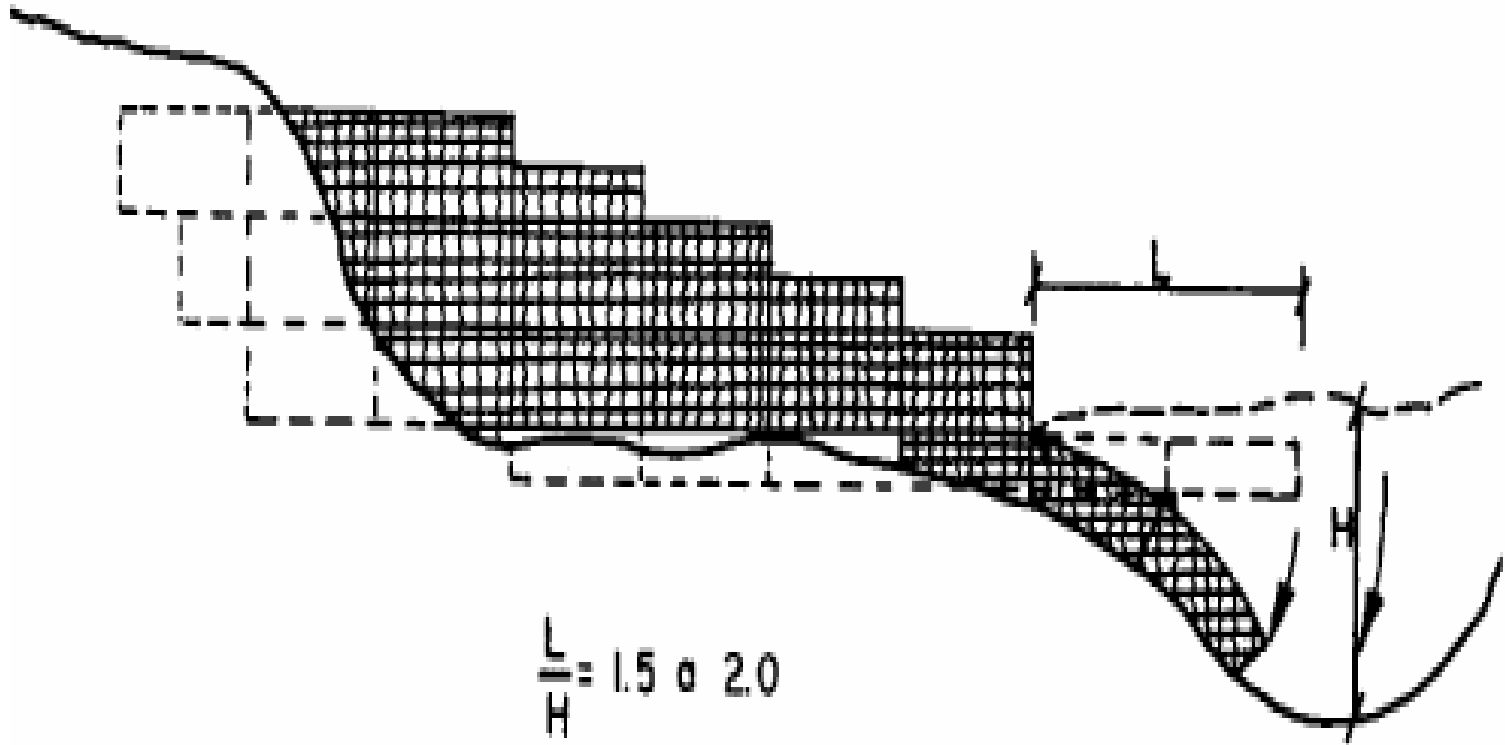
El espolón puede ser diseñado siguiendo una sección trapezoidal, y construido con núcleo de arena y grava.



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES



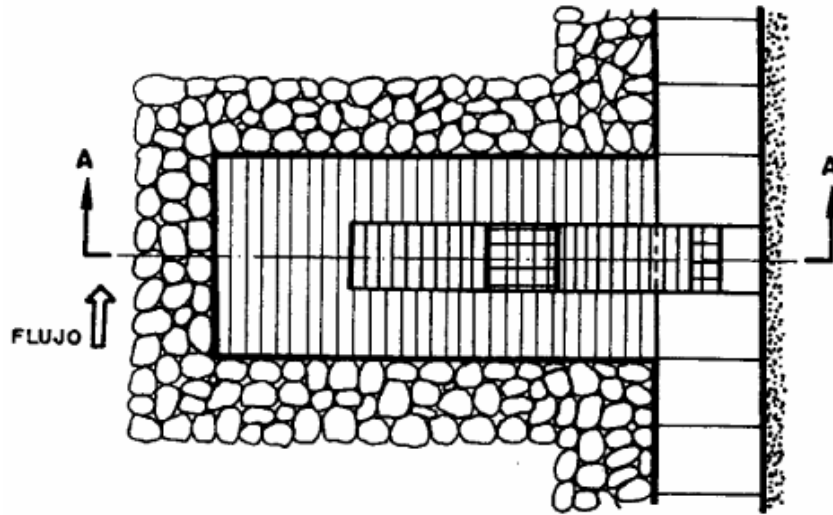
$$\frac{L}{H} = 1.5 \text{ o } 2.0$$



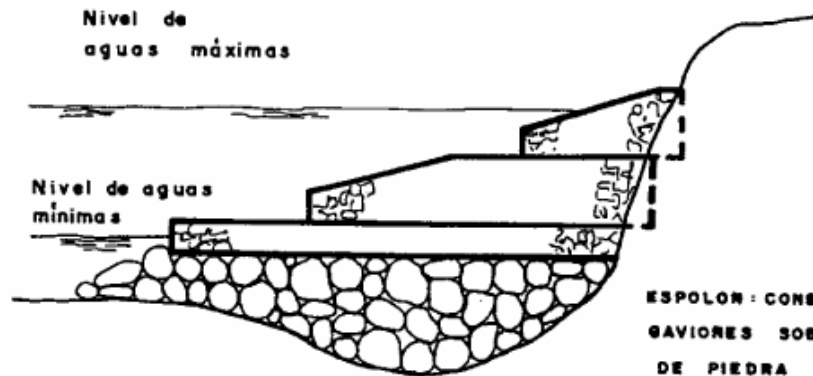
Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES



P L A N T A



C O R T E A - A



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

DISEÑO DE ESPIGONES

Los criterios más importantes a tener en cuenta al diseñar una protección con espigones son los siguientes según J. A. Maza (1975)

- ***Localización en planta.***
- ***Radios de las curvas, longitud de las tangentes, ancho estable del río.***
- ***Longitud de los espolones.***
- ***Separación de los espolones.***
- ***Pendiente de la corona.***
- ***Angulo de orientación respecto a la orilla.***
- ***Permeabilidad del espolón.***
- ***Material de construcción.***
- ***Socavación en la curva y local en el extremo del espigon.***

Debe recordarse que para este tipo de estructuras hidráulicas no se ha establecido un diseño infalible; siempre existe la posibilidad de que haya un efecto que intente destruir cualquier obra en un río, y por tanto, su proyección, diseño y cálculo deben ser muy cuidadosos y contarse con la participación de profesionales expertos.

Puede consultarse J. A. Maza (1975), J. A. Maza (1987) y J. I. Ordoñez (1988), para detalles sobre el diseño hidráulico de espigones .

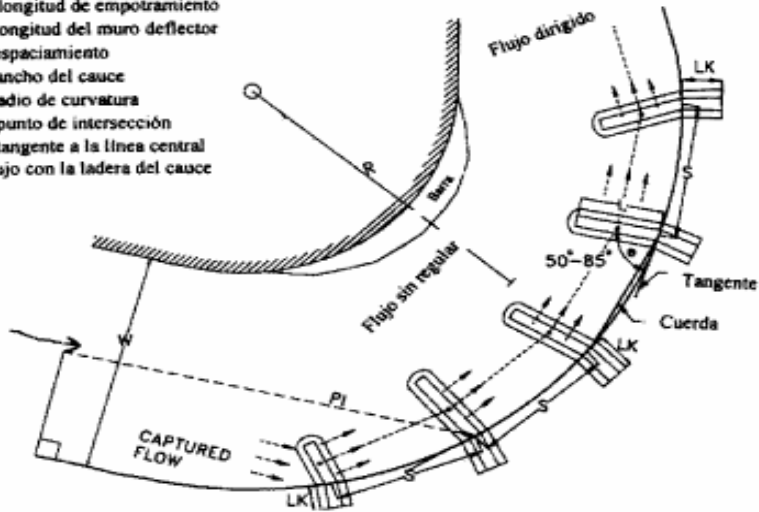


Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

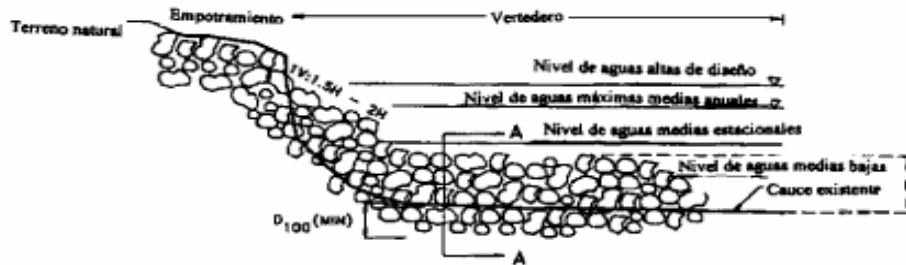
SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

L_k = longitud de empotramiento
 L = longitud del muro deflector
 S = espaciamiento
 W = ancho del cauce
 R = radio de curvatura
 P_i = punto de intersección de la tangente a la línea central del flujo con la ladera del cauce



a) Planta.



Sección transversal



Sección A-A

b) Sección transversal y Sección A-A.

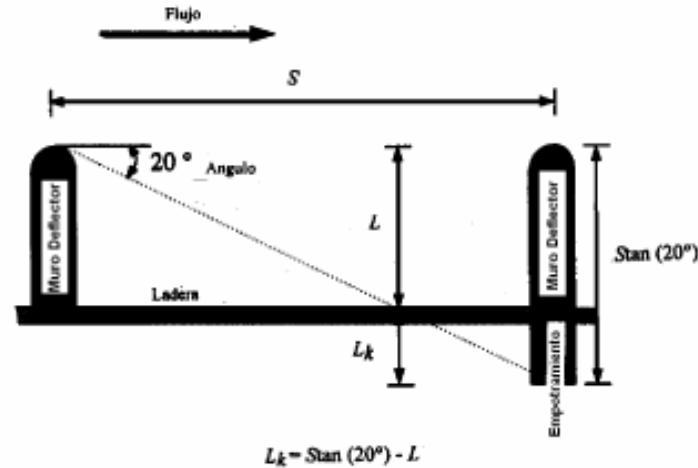




Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES



Muros deflectores muy largos alteran las líneas de corriente al punto que pueden impactar sobre la orilla opuesta pero deben ser lo suficientemente largos para que crucen el THALWEG en curvas. Una longitud ente 1.5 y 2.0 veces la distancia de la orilla al THALWEG ha mostrado ser satisfactoria en algunos proyectos.

Localización: la figura de la 24 , ilustra la localización de los muros deflectores donde se ve que el primero debe instalarse a una distancia S aguas arriba del punto en donde la tangente del flujo de aproximación intercepta la orilla del cauce.



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

• Espaciamiento S

$$S = 1.5L \left(\frac{R}{W} \right)^{0.8} \left(\frac{L}{W} \right)^{0.3} \dots\dots\dots$$

Donde W es el ancho del curso de agua y R el radio de la curva

$$S = (4 \text{ a } 5) L \dots\dots\dots$$

$$S \text{ maximo} = R \left(1 - \left(1 - \frac{L}{R} \right)^2 \right)^{0.5}$$

Longitud del empotramiento (LK)

La longitud del empotramiento del muro deflector en la ladera es típicamente la mitad de su longitud si son cortos o la quinta parte si son largos.

Ancho del muro

El ancho del muro (TW) varia entre 1 m y 4 m pero no debe ser menor que (2 a 3) D100.

Pendientes laterales

El material se coloca al ángulo de reposo (1.5H:1.0V) o mas bajo.

• Número de muros

Usualmente se construyen mínimo tres muros.



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

PROTECCIÓN LOCAL DEL PUENTE

La protección de un puente contra socavación consiste en tomar todas aquellas medidas con el fin de hacerlo menos vulnerable a daños durante crecientes. Es especialmente importante proteger el cauce, las pilas y estribos de un puente en la parte externa y aguas abajo de las curvaturas, ya que en este caso, la erosión lateral tiende a migrar en este sentido arriesgando la estabilidad de la estructura.

Dos casos se pueden distinguir: **protección de puentes en construcción** y **protección de puentes ya construídos**.

Protección de puentes en construcción

Las mejores medidas de protección desde la fase de diseño para puentes nuevos son

- Localización adecuada del puente para evitar modelos adversos del flujo.
- Diseño de luces amplias que no obstruyan el paso del agua.
- Cambio de forma, geometría, orientación y número de pilas, de manera que produzcan las mínimas profundidades de socavación.
- Ubicación de pilas y estribos alineados con la corriente para evitar obstrucciones al flujo.
- Diseño de fundaciones seguras y suficientemente profundas para que no requieran protecciones adicionales.
- Los estribos se pueden cimentar por encima de la profundidad de socavación estimada si van a estar protegidos por enrocado bien diseñado o por otra medida de control.



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

Puentes existentes

Las siguientes medidas son las mas usadas para protección de puentes existentes

- Monitoreo de las profundidades de socavación y cierre del puente, si resultan excesivas.
- Instalación de enrocado alrededor de pilas y/o estribos.
- Construcción de diques de encauzamiento.
- Construcción de mejoras al cauce.
- Mejoramiento de las condiciones estructurales de la cimentación.
- Construcción de presas bajas o estructuras de caída aguas abajo para estabilizar el cauce.
- Construcción de puentes de alivio o aumentar la luz de puentes existentes.

Las dos formas mas comunes para proteger localmente un puente ya construido contra socavación desde el punto de vista hidráulico son:

a) Mejorar las condiciones del material existente para resistir socavación. Esto generalmente se logra con el uso de enrocados colocados en la base de la pila o del estribo.

b) Reducir el poder erosivo de la corriente al pie del estribo o de la pila.

En el caso de estribos, los diques encauzadores que se proyectan tanto hacia aguas arriba como hacia aguas abajo de la estructura, se han comportado bien en aplicaciones prácticas. Para el caso de pilas, se ha intentado reducir el efecto del flujo causante de la socavación mediante arreglos inhibidores del vórtice de herradura como son pantallas protectoras, formas hidrodinámicas de la pila, extensiones de la cimentación de la pila hacia aguas arriba, collares que rodean la pila y escotaduras hechas en la pila. Estos últimos tipos de protección todavía requieren de más investigación experimental y verificación en el campo, (Guevara A., M. E. 1998).



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

Protección contra socavación por contracción

Se usa protección a lo ancho del cauce del río en una distancia grande hacia aguas arriba y aguas abajo del puente si la socavación existente o esperada por contracción es considerable y cuando el cauce está cambiando de curso y cavando canales en el lecho, lo cual es generalmente el caso de ríos formados por arena y grava. En estos casos es muy difícil hacer una protección contra socavación que sea duradera siendo el enrocado uno de los materiales mas usados.

• Método de Maza y García

La siguiente expresión es propuesta por J. A. Maza y M. García (Maza, J. A., 1989) para determinar el tamaño del enrocado para protección del cauce.

$$D = \left(\frac{V}{4.71(G_s - 1)^{0.5} h^{0.15}} \right)^{2.86}$$

D = diámetro de la roca. Conviene que sea D_{84} [m]

V = velocidad media de la corriente [m/s]

h = profundidad del flujo [m]

G_s = densidad relativa de la roca de protección.

Usualmente $G_s = 2.65$



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

El enrocado se coloca en el fondo de la sección transversal del puente a proteger en un espesor de al menos dos capas de roca. El ancho mínimo a proteger es igual al largo de las pilas. La ecuación anterior ha sido deducida para condiciones críticas de movimiento y por lo tanto se recomienda para efectos de diseño que el tamaño de la roca se incremente en un 20%.

$$D_{84\text{diseño}} = 1.2D$$

Protección contra la socavación local al pie de pilas

Si los huecos por socavación existentes o previstos son locales y la capacidad de carga de las pilas es suficiente, se pueden proteger las áreas alrededor de las pilas usando alguno de los métodos que se estudian a continuación.

Enrocado

La forma más simple de proteger una pila o estribo es por medio de enrocado. El enrocado a usarse es de tamaño mayor que el que se requiere para proteger cauces con flujo sin obstrucciones. El enrocado debe tener un mínimo de tres capas de roca en contacto con la estructura. Menos capas pueden inducir a que la arena entre la roca sea removida por los vórtices y la turbulencia. Para no reducir el área hidráulica de la corriente, es conveniente desplantar el enrocado hasta la elevación que alcanza la socavación a largo plazo y por contracción. Como ésto no siempre es posible, conviene al menos, rellenar con enrocado el hueco dejado por la socavación.



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

Método de Maza Alvarez

La siguiente expresión puede ser usada para encontrar el tamaño del enrocado (Maza J. A., 1989).

$$D_m = \frac{135V}{\gamma_s^{1.03} \left(h^{1/(2+h)} - 0.15V \right)}$$

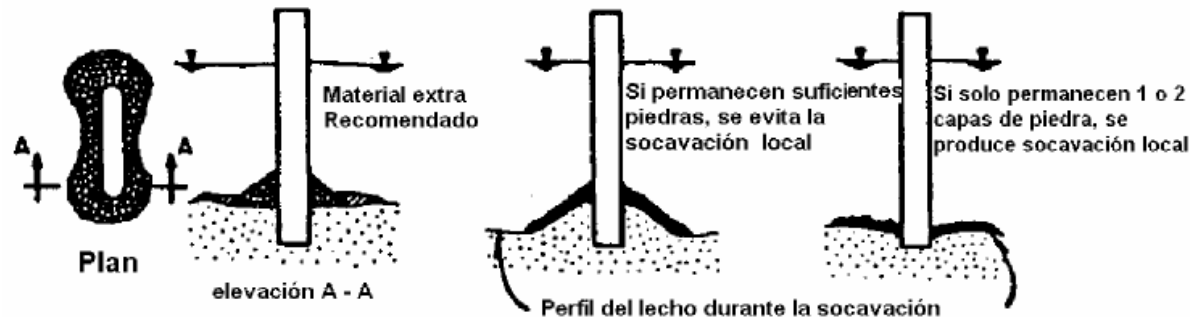
D_m = diámetro medio de la roca [m]

V = velocidad media del flujo ($V < 4.5$ m/s) [m/s]

h = profundidad del flujo [m]

γ_s = peso específico del material de protección [Kgr/m³]

La roca debe rodear las pilas excepto cuando se tenga la certeza de que van a estar alineadas con la corriente durante toda la vida útil de la obra, caso en el cual, el enrocado puede colocarse solamente en el extremo aguas arriba de cada pila

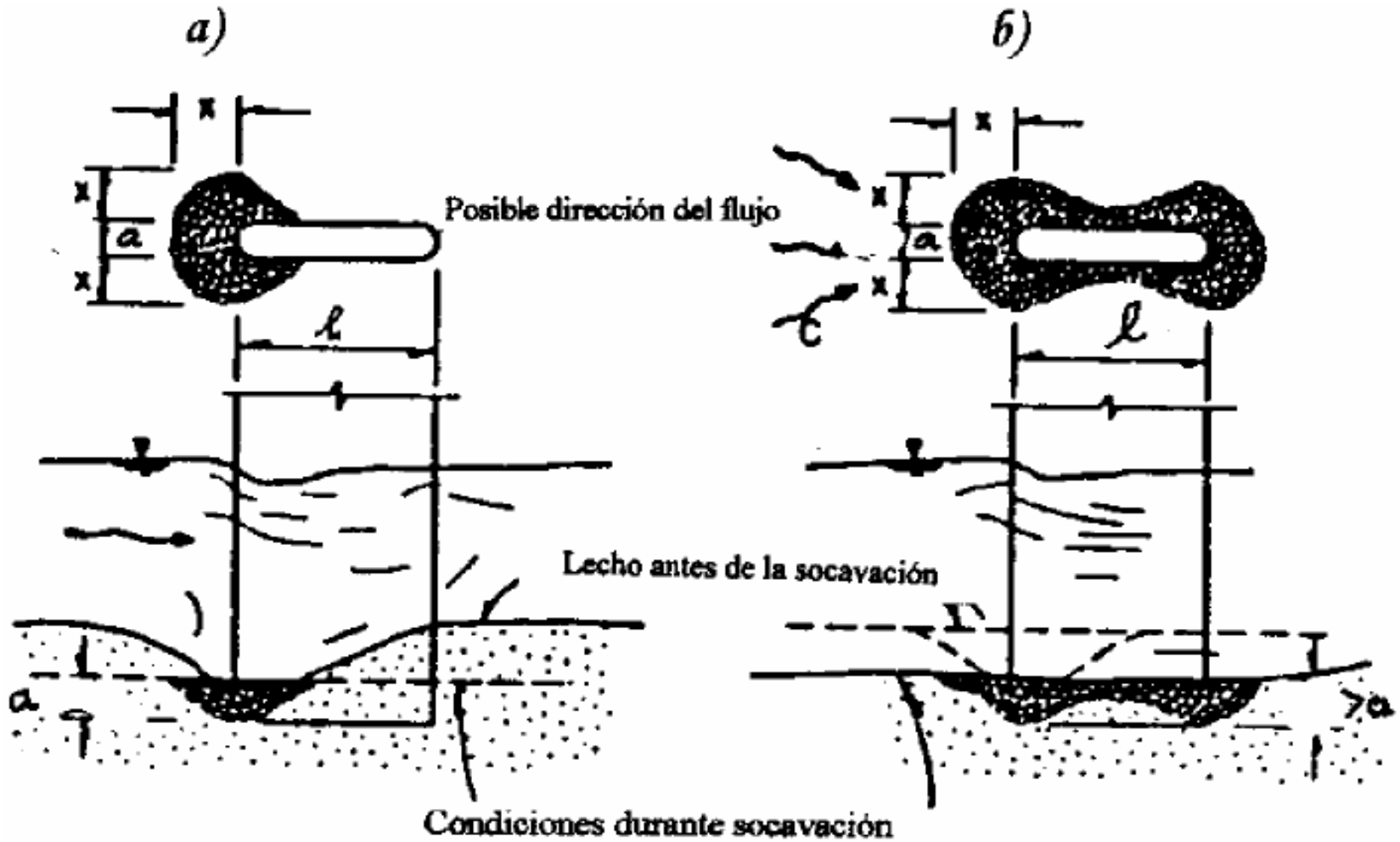




Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES





Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

Método propuesto en HEC-18 (1993)

Según HEC-18 (1993), el enrocado no es una medida permanente para proteger pilas contra socavación y no debe ser empleado para puentes en construcción, ya que las nuevas estructuras deben proyectarse para ser estables. La siguiente ecuación se usa para encontrar el tamaño de la roca de protección:

$$D_{50} = \frac{0.692(KV)^2}{2g(G_s - 1)}$$

D_{50} = diámetro medio de la roca [m]

K = coeficiente de forma de la pila

$K = 1.5$ para pila con nariz redonda

$K = 1.7$ para pila con nariz rectangular

V = velocidad del flujo sobre la pila [m/s]

g = aceleración de la gravedad [m/s²]

G_s = densidad relativa de la roca, usualmente 2.65.

Para determinar la velocidad sobre la pila cuando no se tengan valores puntuales, la velocidad media del cauce ($V_m = Q/A$) se multiplica por un coeficiente que va desde 0.9 para pilas cerca a las banquetas en un cauce recto hasta 1.7 para pilas próximas a la curvatura externa del río.



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

Pilas auxiliares

H. N. C. Breusers, G. Nicollet y H. W. Shen, (1977), reportan que Chabert y Engeldinger (1956) investigaron el efecto de instalar una serie de pilas pequeñas aguas arriba de la pila principal con el propósito de desviar la corriente incidente y disminuir el poder erosivo de los vórtices de herradura. No existe un método general para definir los parámetros involucrados como son: número y diámetro de las pilas, espaciamiento entre ellas, ángulo de colocación y distancia a la pila. Experimentos hechos en el Saint Anthony Falls Laboratory (Minnesota, EUA) reportan que no tienen un comportamiento favorable y que por lo tanto su uso no se recomienda.

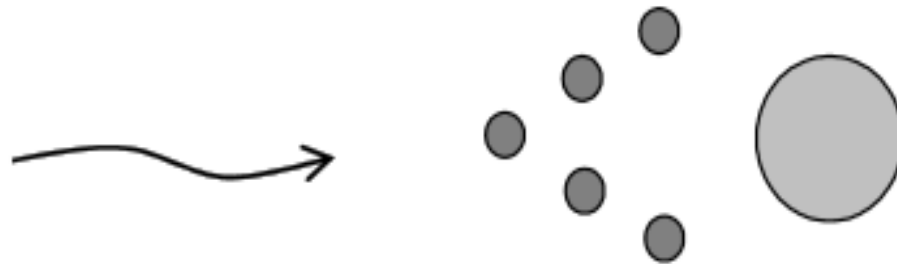


Figura N° 7.34a. Pilas auxiliares.

Breusers, H. N. C., Nicollet, G. y Shen, H. W. (1977).



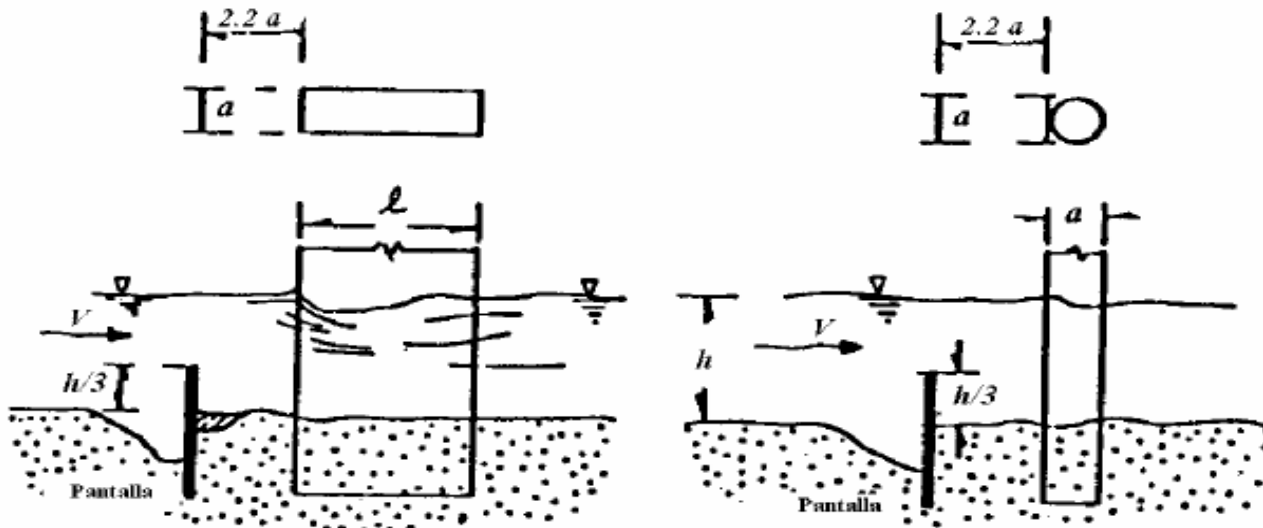
Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

Pantallas aguas arriba

Este tipo de protección fue propuesto por Levi-Luna (Maza J. A., 1987). Consiste en colocar una pantalla vertical aguas arriba de la pila del mismo ancho que ésta tal como se indica en la Figura N° 7.35. La pantalla puede ser hecha de tablestacas o pilotes en concreto o metal y su objetivo es el de impedir la formación de vórtices al pie de la pila. Los autores no han probado el funcionamiento de las pantallas cuando existe ángulo de ataque del flujo sobre las pilas. Se considera que la reducción de la socavación en la pila cuando está alineada con el flujo es del 70%. Las pantallas se usan como medida preventiva o correctiva.





Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

Extensiones de la cimentación

La cimentación de la pila tiende a brindar protección contra los factores causantes de la socavación. El grado de la protección depende de la longitud de la extensión hacia aguas arriba y de su posición con relación al lecho del cauce.

Algunas investigaciones han mostrado el efecto reductor de la socavación si la cimentación se sitúa a nivel del lecho del cauce y si su longitud se extiende al menos dos veces el ancho de la pila hacia aguas arriba, (Parola A. C., Mahavadi S. K., Brown B. M., y Khoury A. El., 1996).

Sin embargo, es muy riesgoso confiarse en este efecto reductor ya que el cauce puede sufrir un descenso general dejando expuesta la cimentación lo cual implica un efecto contraproducente sobre la socavación local en la pila.



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

Protección contra la socavación local al pie de estribos

7.1.3.3.1 Enrocado

• Método propuesto en HEC-18 (1993)

Dos casos se consideran al diseñar el enrocado para proteger los estribos:

$$\bullet F_r \leq 0.8$$

$$D_{50} = \frac{Kh}{G_s - 1} \left(\frac{V^2}{gh} \right)$$

$$F_r = \frac{V}{\sqrt{gh}}$$



D_{50} = diámetro medio de la roca [m]

K = coeficiente de forma del estribo que tiene en cuenta la aceleración del flujo en la proximidad del enrocado

$K = 0.89$ para estribos con pared inclinada hacia el cauce

$K = 1.02$ para estribos con pared vertical

h = profundidad media del flujo en la sección contraída del puente [m]

V = velocidad media del flujo en la sección contraída del puente [m/s]

g = aceleración de la gravedad [m/s²]

G_s = densidad relativa de la roca, usualmente 2.65.

Fr = número de Froude



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

$$\cdot F_r > 0.8$$

$$D_{50} = \frac{Kh}{G_s - 1} \left(\frac{V^2}{gh} \right)^{0.14}$$

$K = 0.61$ para estribo con pared inclinada

$K = 0.69$ para estribo con pared vertical



Para determinar la velocidad media se debe calcular el radio de la obstrucción del flujo (*ROF*) así:
ROF = distancia desde el borde del cauce principal hasta el pie del estribo dividida por la profundidad media del flujo.

Se presentan tres casos:

- Si **ROF** es menor que 5 para ambos estribos, la velocidad media ($V_m = Q/A$) se calcula en función del área hidráulica total en la sección contraída del puente.
- Si **ROF** es mayor que 5, la velocidad media se calcula para cada zona con flujo sobre la banca.
- Si **ROF** es menor que 5 para un estribo y mayor que 5 para el otro, la velocidad media para la primera situación debe basarse en el área del flujo limitada por el estribo y una pared imaginaria localizada en la banca opuesta.

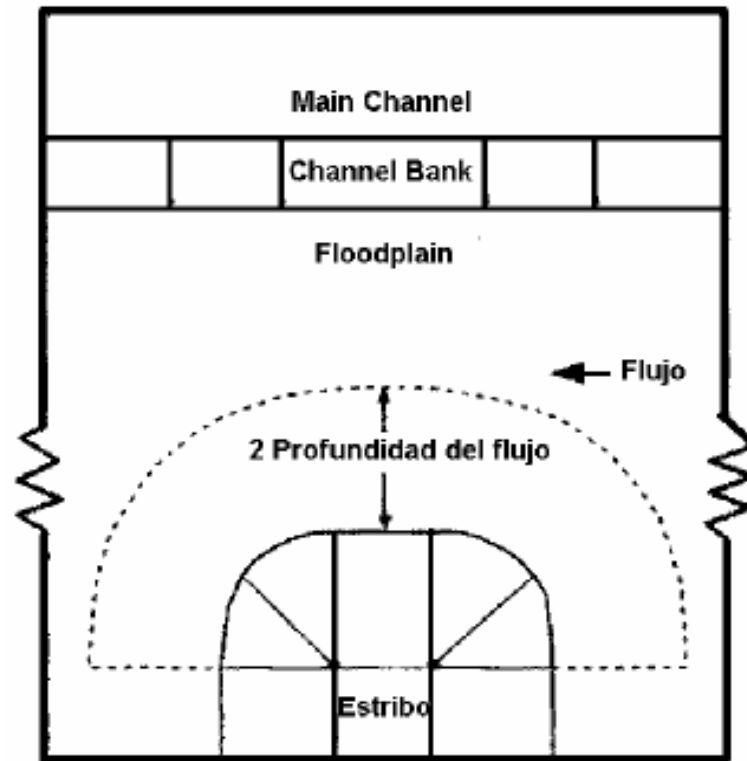


Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

La Figura , ilustra la extensión del enrocado alrededor del estribo. El espesor del enrocado no debe ser inferior al tamaño dado por $1.5D50$ o $D100$. Este espesor debe ser incrementado en un 50% cuando el enrocado es colocado bajo agua para considerar la incertidumbre generada por las condiciones de colocación.



Enrocado de protección al pie de estribos.
HEC-18, 1993.



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

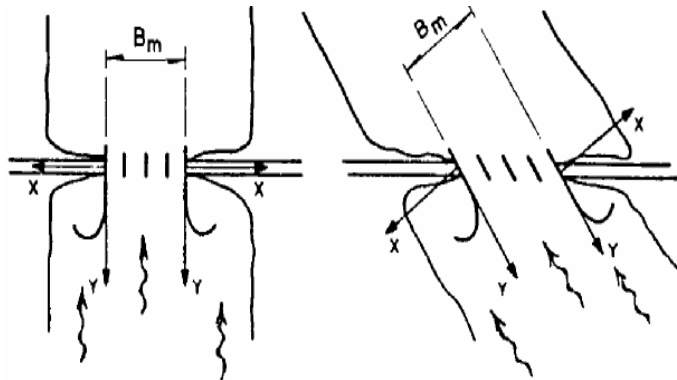
HIDRAULICA DE PUENTES

Diques de encauzamiento

Los diques de encauzamiento son estructuras que se construyen a partir de los estribos de un puente y se prolongan hacia aguas arriba.

• Objetivos de los diques de encauzamiento

- Obligar a que la dirección del flujo en la sección del cruce sea aproximadamente constante para todos los gastos de la época de lluvias. Cuando hay pilas dentro del cauce, la dirección adecuada del dique debe ser paralela al eje longitudinal de las mismas, con lo que se garantiza que la erosión local al pie de las pilas sea mínima y se produzca únicamente en la cara aguas arriba.
- Evitar la socavación local al pie del estribo.
- Proteger el terraplén de la vía terrestre, al menos en la zona cercana al puente.



Alineamiento de los diques de encauzamiento
Maza, J. A., 1989.



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

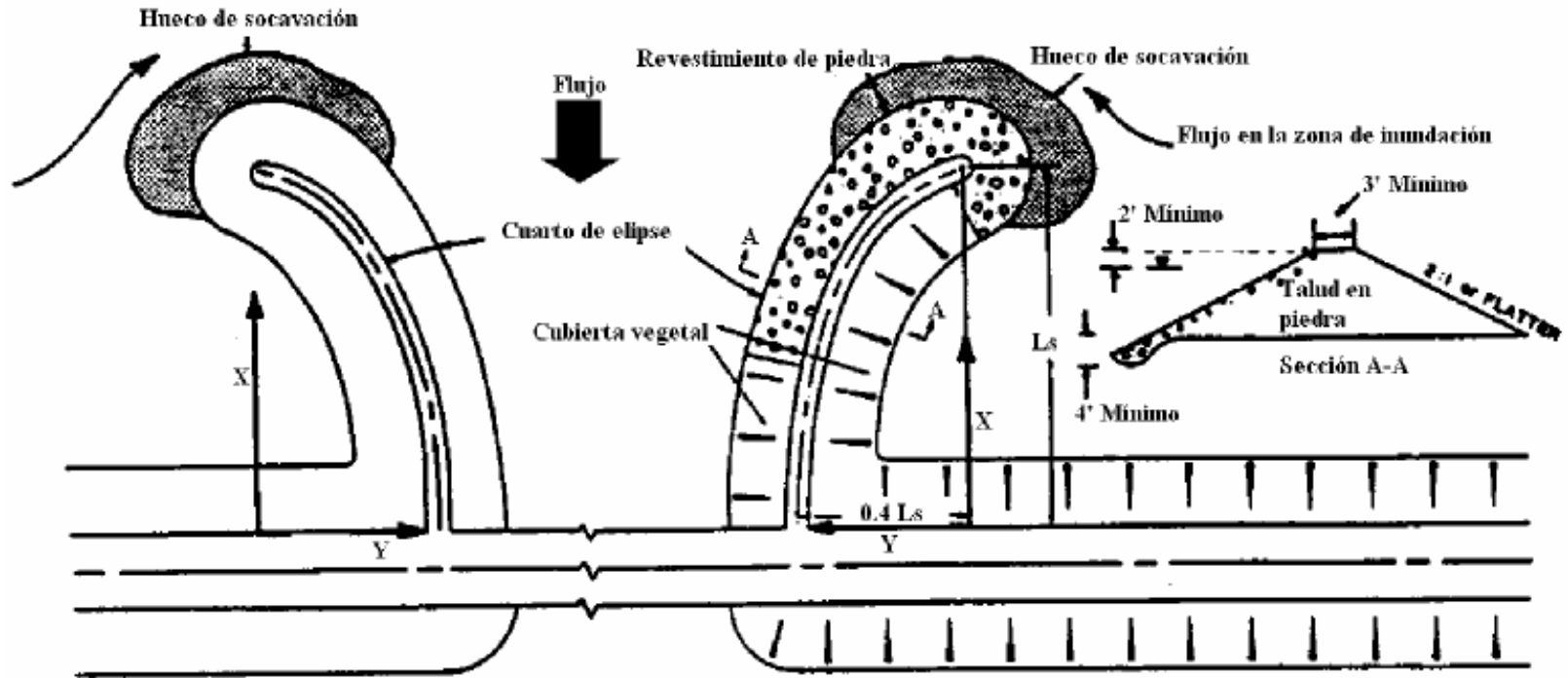
HIDRAULICA DE PUENTES

Consideraciones de diseño

- La cara del dique debe empatar con el estribo de forma que el flujo no sea perturbado en la unión.
- Para puentes nuevos, la pared de los estribos puede inclinarse con el mismo talud del dique.
- Para mejoramiento de puentes existentes, puede ser necesaria la adecuación de la pared del estribo o construcción de aletas.
- La presencia del dique de encauzamiento hace que la erosión se presente aguas arriba del dique y no en las proximidades del estribo como ocurriría si el flujo sobre las bancas es obligado a retornar al cauce principal.
- Los diques se pueden construir sobre un solo estribo o sobre ambos dependiendo de la cantidad de flujo que es dirigido hacia el puente por cada terraplén de acceso.
- Si los lados del puente están confinados por bancas muy altas no se justifica la construcción de diques de encauzamiento.

• **Orientación**

Los diques deben ser paralelos a los estribos, y la distancia entre ellos debe ser igual a la distancia entre las paredes de los estribos. Los mejores resultados se obtienen usando diques con forma en planta de un cuarto de elipse, con el radio entre el eje mayor y el eje menor de 2.5 a 1.0. Esto permite la contracción gradual del flujo.



Esquema típico y orientación de los diques de encauzamiento. HEC-20, 1991.



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

La orientación en planta se obtiene usando la siguiente ecuación, (HEC-18, 1993).

$$\frac{X^2}{L_s^2} + \frac{Y^2}{(0.4L_s)^2} = 1$$

L_s = longitud del dique encauzador
 X, Y = ejes coordenados

La Ecuación indicada , es la de una elipse con origen en la punta aguas arriba del dique.

Longitud

La longitud se determina por medio de un gráfico desarrollado a partir de datos experimentales obtenidos por la Universidad Estatal de Colorado (CSU) y datos de campo recogidos por la U. S. Geological Survey (Figura N° 7.40).

El gráfico debe usarse para longitudes de diques entre 50 pies (15 m) y 250 pies (75 m).

Si el gráfico indica longitudes mayores, el diseño debe ser fijado en 250 pies (75 m).

Se recomienda que la mínima longitud de dique a usarse sea de 50 pies (15 m).

La Administración Federal de Carreteras de los Estados Unidos (FHWA) ha visto que diques con longitudes de 150 pies (45 m) se han comportado favorablemente en la mayoría de los casos.



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

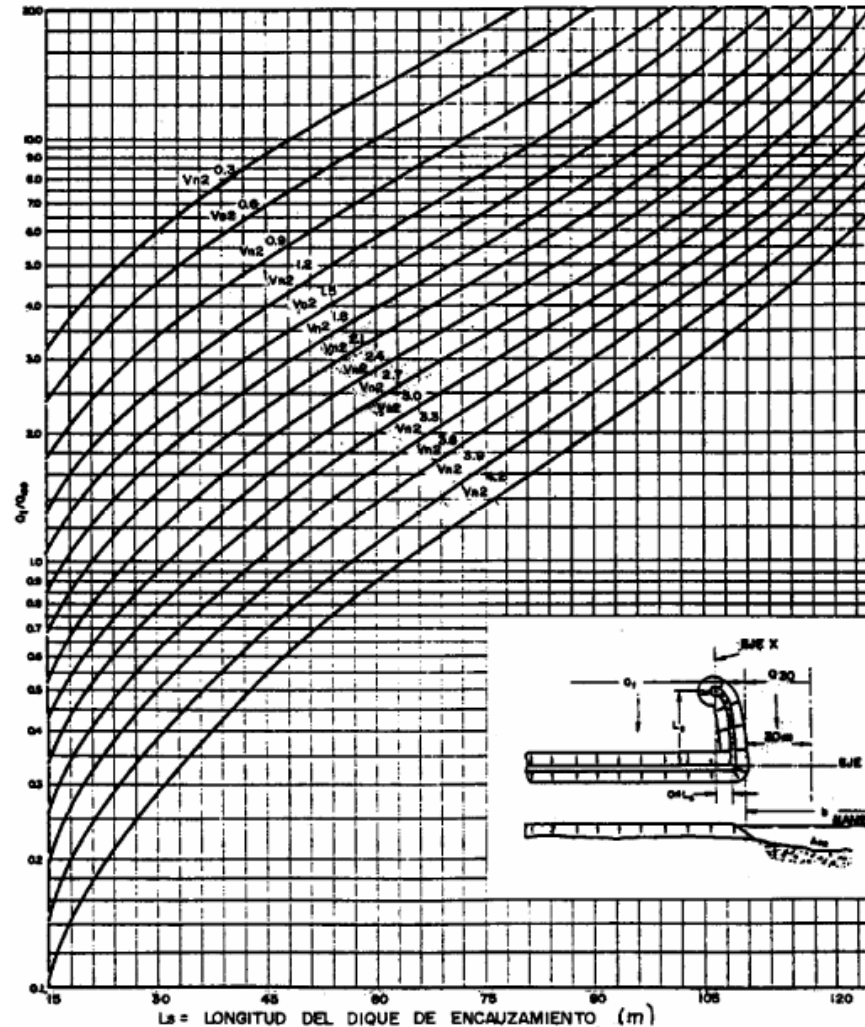


Gráfico para determinar la longitud de diques de encauzamiento.
HEC-20, 1991.



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

El uso de la figura anterior para propósitos de diseño, requiere de los siguientes parámetros:

Q = caudal total de la corriente [m³/s]

Q_f = caudal sobre la banca en cualquiera de los lados [m³/s]

Q_{30} = caudal de la corriente en 100 pies (30 m) anexos al estribo [m³/s]

b = longitud de la abertura del puente [m]

A_{n2} = área hidráulica en la sección del puente [m²]

V_{n2} = velocidad media a través de la abertura del puente [m/s]

Q_f/Q_{30} = radio del caudal del dique

L_s = longitud del dique encauzador [m]

Altura

La altura de los diques debe ser tal que no sean sobrepasados para el caudal de diseño. Un borde libre de 2 pies (60 cm) se considera en el diseño.

Forma y tamaño

El ancho mínimo del dique es de 3 pies (1 m), y en general, está entre 10 pies y 12 pies (3.0 m y 3.5 m). La punta aguas arriba debe ser redondeada. El talud de los lados debe ser 2H:1V o menor.

Extensión aguas abajo

Puede resultar conveniente la extensión del dique aguas abajo para evitar la erosión producida por una súbita expansión del flujo al salir del puente. Esta parte del dique es más corta y usualmente es de 50 pies (15 m). El dique aguas abajo también debe empatar con el estribo, empezar paralelo a él, e irse proyectando gradualmente hacia las bancas del río. Debe reunir las mismas condiciones de diseño de los diques aguas arriba en cuanto a altura, ancho, y protecciones.



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

Protección

Los diques encauzadores se forman construyendo un terraplén de suelo o arena el cual debe ser protegido preferiblemente con enrocado o al menos con pasto. El enrocado debe colocarse protegiendo la cara en contacto con el agua y es posible que se requiera de filtros. Si el costo del enrocado es muy alto, puede usarse pasto, pero esto implica que después de cada creciente fuerte el dique deba ser reparado o construido de nuevo.

Diques encauzadores en cruces no simétricos

Algunas evidencias muestran que no se justifica el uso de diques de mayor longitud cuando el puente presenta un ángulo con respecto a la corriente. Longitudes dadas por la figura de la HEC 20, se consideran suficientes.





Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

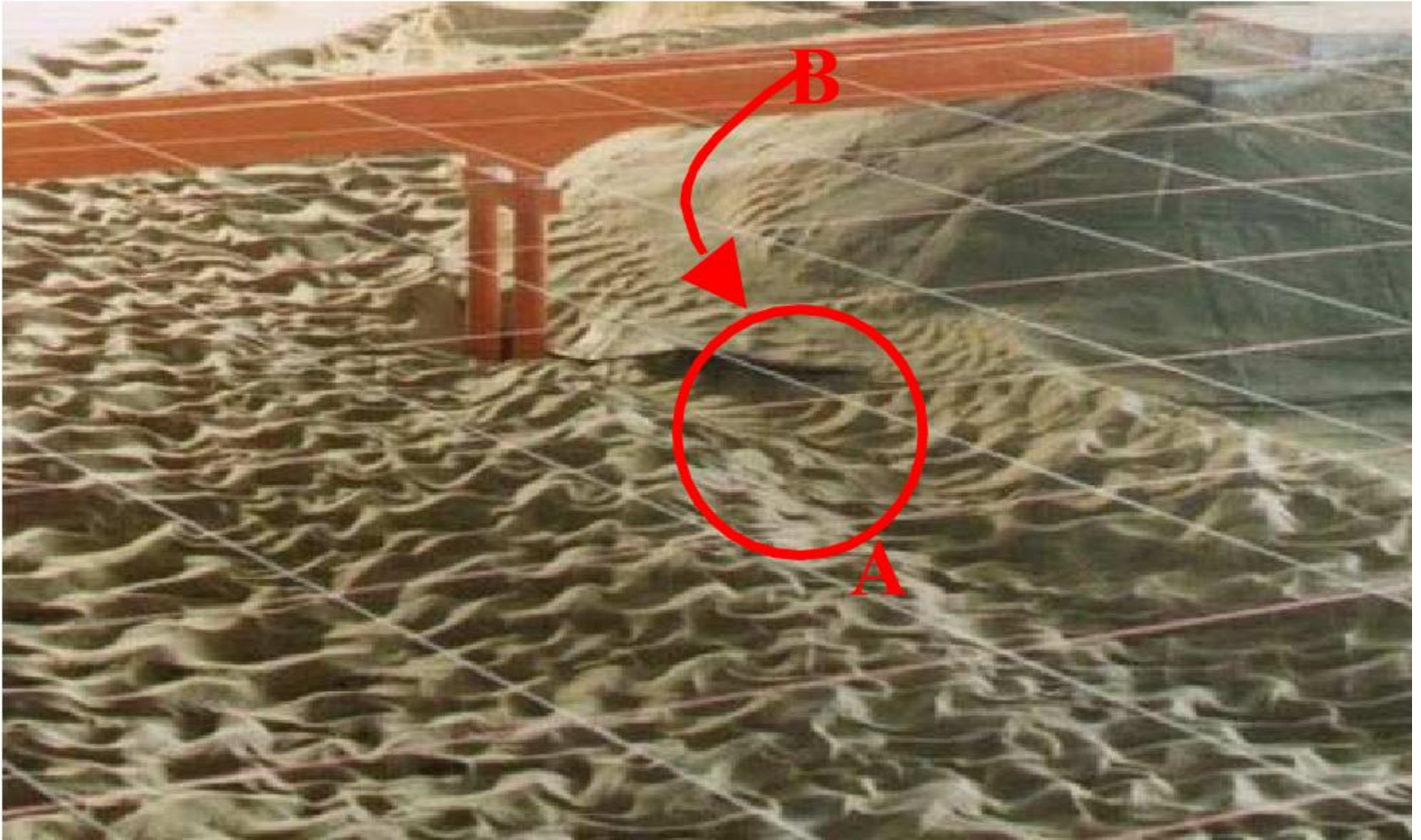




Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES





Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES





Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES





Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

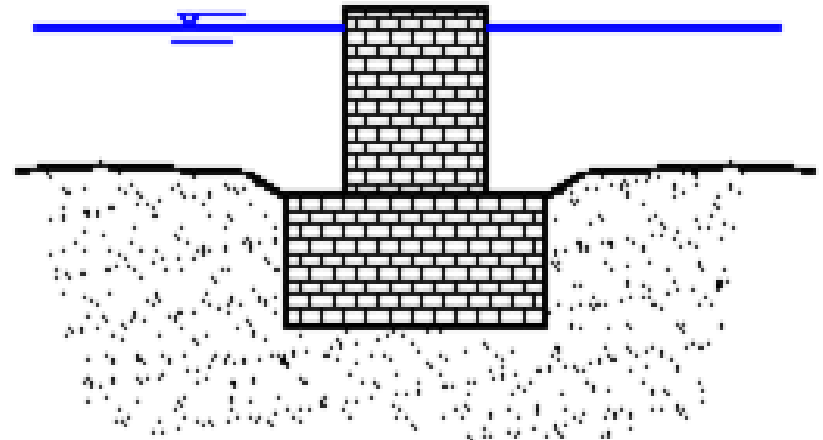
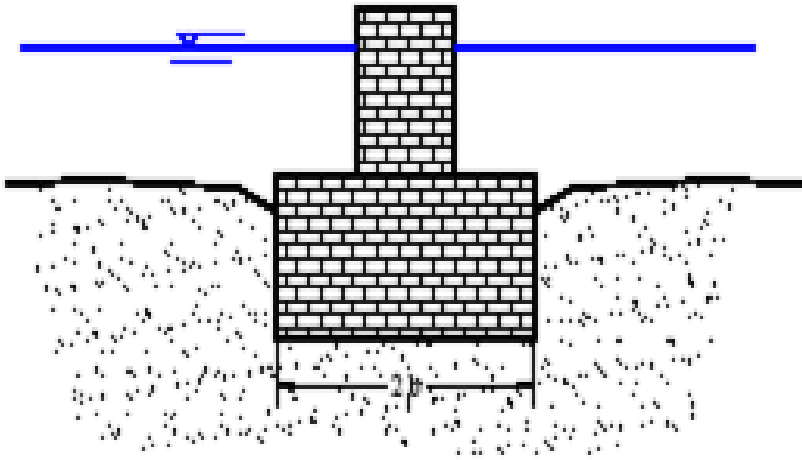




Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES





Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES





Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES





Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES





Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES





Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES





Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES





Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES





Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES





Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES





Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES





Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES





Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica SEMINARIO 2025 HIDRAULICA DE PUENTES





Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES



28/03/2007



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES





Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES





Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES





Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES





Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES





Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES





Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES





Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES





Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES





Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES





Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

