



SEMINARIO DE HIDRÁULICA DE PUENTES

Facultad de Ingeniería, Departamento de Hidráulica

14 de Octubre – Clase 3A: Conceptos de Erosión y Socavación



Ing. Adolfo Guitelman
Ing. Agustín Rigou



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

INDICE

- INTRODUCCIÓN
- TIPOS DE EROSIÓN
- CONTROL DE EROSIÓN
- EROSIÓN EN PUENTES
 - Generalizada
 - Contracción
 - Localizada en Pilas
 - Localizada en Estribos
- SUELOS COHESIVOS
- PROPIEDADES DEL SUELO VS ERODIBILIDAD
- EVALUACIÓN DE PUENTES



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

CONCEPTOS BÁSICOS:

La erosión ocurre cuando las partículas de suelo son separadas por las acciones del agua y del viento.

El material erosionado queda suspendido en el agua y sedimentará cuando encuentre las condiciones adecuadas.

En general, el lecho de un río está formado por material no cohesivo de diferente tamaño: arenas, gravas, bolos, etc.

En condiciones ordinarias dicho material se encuentra en equilibrio pero, durante las crecidas, cuando el caudal sobrepasa el valor crítico de comienzo de arrastre, las partículas de fondo son transportadas por las aguas y el caudal sólido crece simultáneamente con el líquido.



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

EROSIÓN NATURAL ocurre gradual e insidiosamente, si no se toman las medidas adecuadas. Podemos no controlarla a tiempo.

EROSIÓN ANTRÓPICA Es la erosión acelerada por actividades perjudiciales para la tierra que resulta ser más dañina que la natural. Provocada por actividades como la agricultura, la minería, la tala de árboles, la construcción de caminos y el desarrollo urbano.

La **EROSIÓN A GRAN ESCALA** provoca:

- Reducción de la habilidad del suelo para soportar la vegetación.
- **Amenaza el hábitat de la vida silvestre: CUERPOS RECEPTORES**
- En particular la erosión que se desarrolla alrededor de las pilas de un puente, puede desestabilizar su fundación. de la fundación, se puede llegar a ver muy comprometida su estabilidad.
- Sedimentos que aceleran la obstrucción de los cursos de agua y vías navegables.
- **PÉRDIDA DEL SUELO FÉRTIL**

ES PREFERIBLE Y MÁS EFECTIVO CONTROLAR LA EROSIÓN QUE PAGAR POR SUS CONSECUENCIAS



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

TIPOS DE EROSIÓN:

RAINSPLASH :

Es la erosión originada por el impacto de la lluvia. Este es el agente erosivo más importante. Las gotas de lluvia que golpean una superficie terrestre descubierta rompen los agregados y remueven las partículas del suelo.

SHEET EROSION:

Es la erosión ocasionada por una extensión de agua. Ocurre a medida que una corriente de agua se mueve sobre la superficie del suelo quitando una capa de suelo delgada y uniforme. Es una forma común y muy significativa de erosión, aunque a menudo resulta imperceptible.





Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

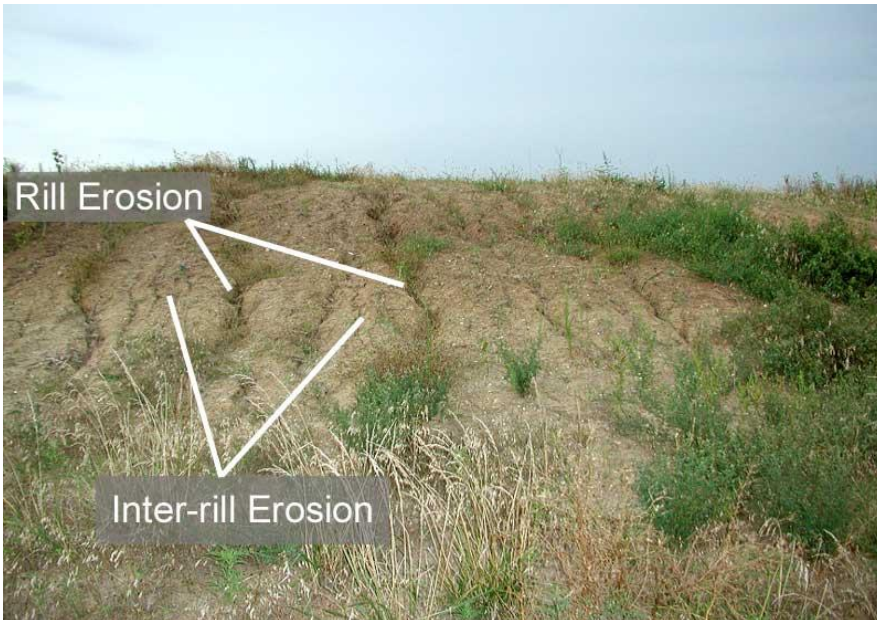
SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

TIPOS DE EROSIÓN:

RILL EROSION:

Es la que se produce en la caída escalonada de un terraplén. Un aluvión excesivo y una topografía escarpada o abrupta pueden producir una red de pequeños canales llamados riachuelos o arroyuelos. La investigación demuestra que la erosión causada por estos arroyuelos explica la mayor parte de los sedimentos que son arrastrados pendiente abajo. Pero los arroyuelos son efímeros y pueden eliminarse mediante un buen tratamiento de superficie.





Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

TIPOS DE EROSIÓN:

GULLY EROSION:

Es la erosión que se origina cuando el agua alcanza velocidades importantes, a partir de grandes pendientes, produciendo verdaderas galerías erosivas. En general, se da en laderas escarpadas.





Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

TIPOS DE EROSIÓN:

STREAMBANK EROSION:

Es la erosión producida en las márgenes de las corrientes de agua. Las márgenes de los ríos son particularmente vulnerables a la erosión, especialmente cuando la velocidad del agua que fluye es alta y la resistencia del material de la ribera es baja.





Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

TIPOS DE EROSIÓN:

SHORE LINE EROSION ó MASS WASTING:

Es la erosión en las costas marítimas que ocasiona desmoronamientos. Estos desmoronamientos transportan gran cantidad de sedimentos dentro de las corrientes de agua.

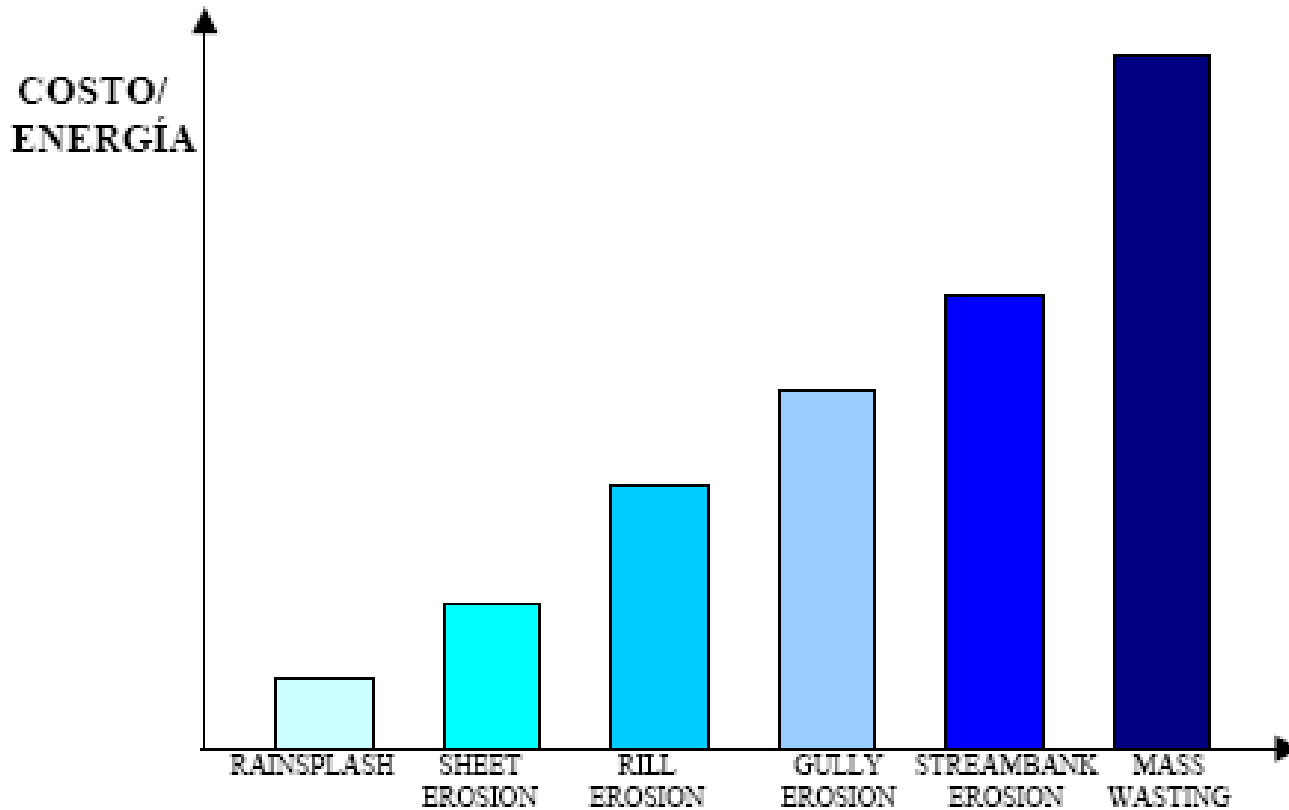




Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

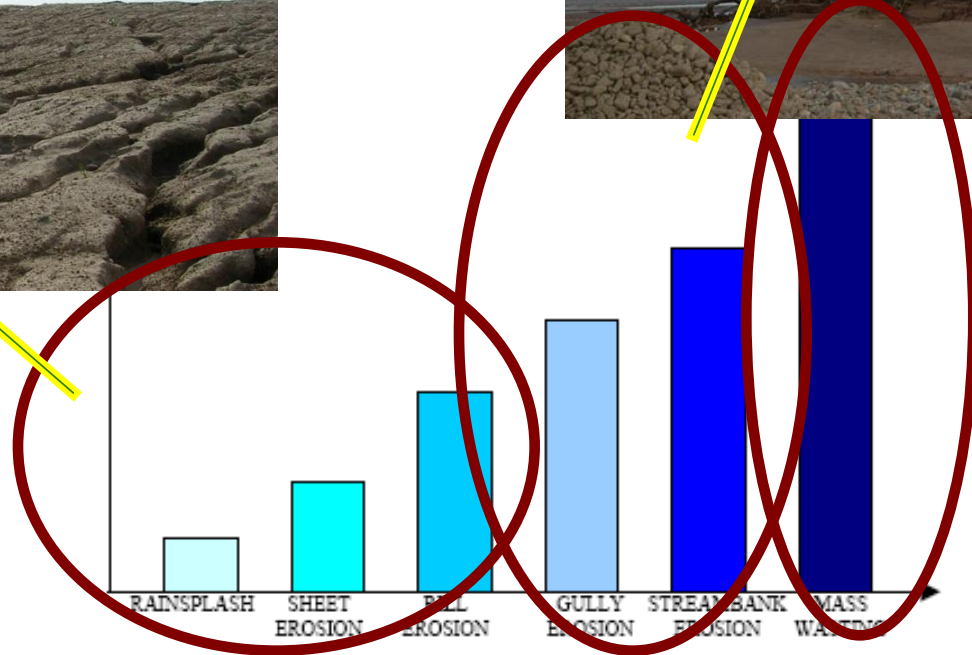




Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES





Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

CONTROL DE LA EROSIÓN:

Las mejores prácticas de control de la erosión implican mantener el suelo en su lugar. El método más simple y efectivo por costo es mantener una cubierta sobre la superficie del suelo.

VEGETACIÓN

La vegetación tiene cuatro funciones principales:

Interceptar y reducir la energía de impacto de la lluvia.

- b) Reducir la velocidad de escurrimiento.
- c) Filtrar el sedimento y aumentar la entrada de agua.
- d) Mantener el suelo en su lugar mediante las raíces.





Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

CONTROL DE LA EROSIÓN:

LIGANTES/ ADHERENTES DE SUELO

Uno de los ligantes más efectivos es aquel elaborado a base de coque ya que, cuando se mezcla con agua, se adhiere a las partículas para formar una membrana resistente al agua que estabiliza la superficie contra la erosión.

MEZCLAS HIDRÁULICAS

Se pueden hacer con papel reciclado, fibra de madera, desechos de algodón, u otro material biodegradable.

Es un modo económico de esparcir semillas y fertilizantes mezclados. Las mezclas también protegen la superficie del impacto de la lluvia, aumenta la retención de humedad y modera la temperatura del suelo.



En algunos casos es excelente como aplicación previa a otros métodos estructurales



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

CONTROL DE LA EROSIÓN: MANTAS

Mantas de yute natural. Consisten en una tela de tejido abierto que permite que la luz penetre y las plantas crezcan a través de ella. Se ajusta al terreno con grampas, clavijas o estacas de madera y dura hasta que la vegetación se establece por sí misma, antes de que se degrade. El tejido abierto permite que el sembrado hidráulico se realice antes o después de su instalación.

Fibra de coco. Es mucho más resistente que el yute y dura de 4 a 10 años antes de degradarse.

Viruta de madera encastrada en una membrana de plástico degradable.





Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

CONTROL DE LA EROSIÓN:

CONTENCIÓN GEOCOMPOSITIVA

Protección mediante la utilización de matrices semirrígidas tridimensionales hechas de una tela no tramada de poliéster. Las celdas pueden rellenarse con suelo, arena o agregados (de acuerdo a las aplicaciones).

Las secciones son flexibles para transportarlas y colocarlas pero, una vez rellenas las celdas tridimensionales, pueden purificar y reforzar el relleno para formar un compuesto estructural. Las celdas de la estructura conforman el contorno y evitan el movimiento lateral del relleno. Las paredes de las celdas permiten el drenaje normal para retener el material de relleno en su lugar, forzando el agua a fluir sobre el sistema protector para evitar la erosión.





Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

CONTROL DE LA EROSIÓN:

MÉTODOS ESTRUCTURALES DE CONTROL

Este tipo de métodos se utiliza cuando las fuerzas de erosión exceden las capacidades de la forestación para suministrar protección durante un largo período de tiempo.

Estos métodos comprenden:

RÍGIDOS

- 1. Revestimientos de Hormigón Simple y Premoldeado**
- 2. Tablestacas Plásticas**

FLEXIBLES

- 1. Utilización de Gaviones y colchonetas**
- 2. Geoceldas**



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES



BLOQUES DE
COMU



Protección con
Gaviones



Protección con
Colchonetas



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

CRITERIOS DE SELECCIÓN DE LAS PRÁCTICAS ADECUADAS DE CONTROL: **Best Management Practices – BMP's**

En el momento de la selección del método a utilizar para solucionar el problema de la erosión deberían considerarse las siguientes variables:

- ◆ **Aceptabilidad**
- ◆ **Costos**
- ◆ **Efectividad**
- ◆ **Estimulación de la forestación**
- ◆ **Mantenimiento y Operación**
- ◆ **Riesgo para el medio ambiente**

En este proceso tecnológico, necesariamente, debe intervenir el Ingeniero quién, en conocimiento de la escala de energía del problema, realizará una selección adecuada entre la gran cantidad de productos hoy disponibles en el mercado.



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

EROSIÓN EN PUENTES:

Todos los procesos fluviales que llevan involucrados la alteración de las condiciones naturales de un curso de agua, por la implantación de una obra, producen una serie de modificaciones en el escurrimiento. Dichas modificaciones involucran:

- Δh : Variación de los niveles del río.
- ΔU : Cambios en el perfil de velocidades del río.
- Generación de corrientes secundarias y torbellinos.



Cambia la capacidad de transporte de sedimentos de la corriente.



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

Los cambios que la presencia de un puente impone a la corriente son principalmente los siguientes:

Cambio de la velocidad del escurrimiento del agua en el cauce principal y en el de las avenidas.

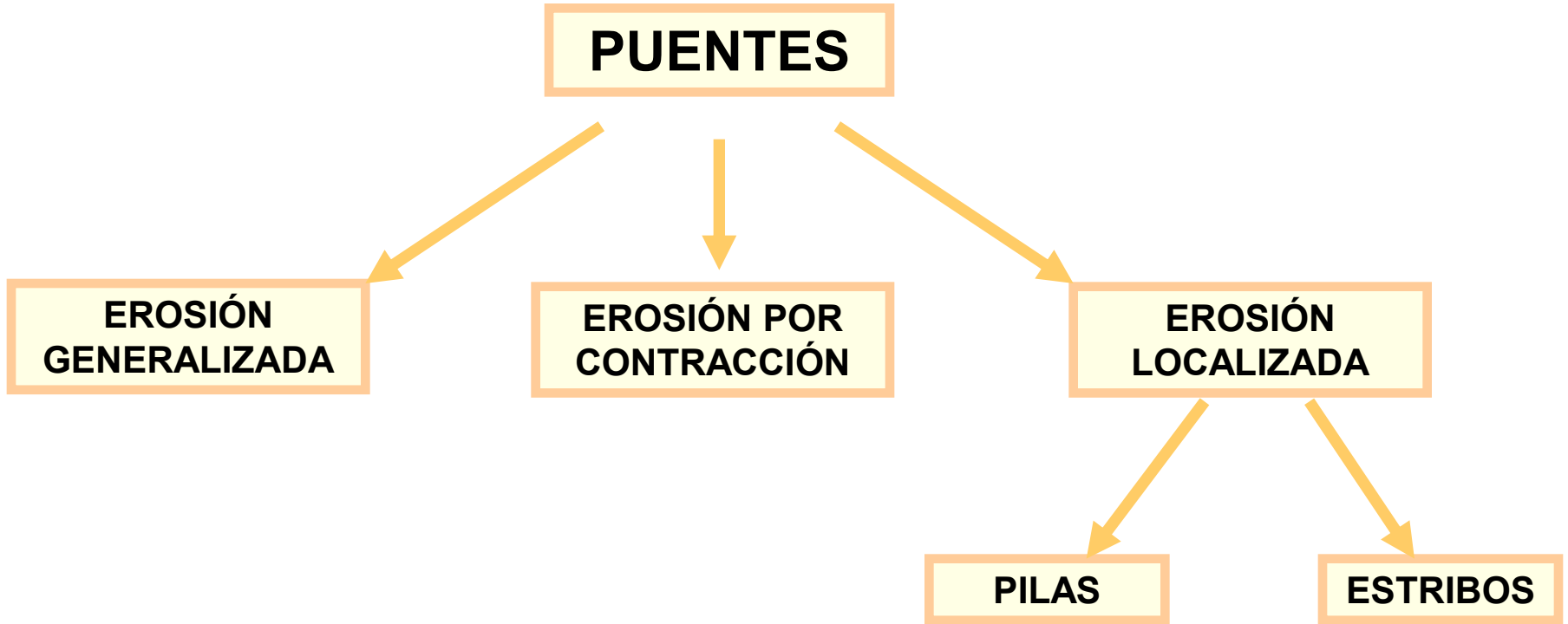
2. Cambio en la pendiente de la superficie libre del agua, hacia arriba y hacia abajo del puente. Cuando ocurre una avenida, aumenta la velocidad y, como consecuencia, la capacidad de transportar sedimentos. Esto origina un mayor arrastre del material del fondo en la sección del cruce y, cuando ello es posible, un ensanchamiento del cauce, hasta que este aumento en el área hidráulica asemeje otra vez la sección del cruce con cualquier otra del río y restablezca el equilibrio de la corriente. Como a veces la presencia de los terraplenes de acceso al puente, en ocasiones protegidos, no hace posible que la sección del cruce gane área hidráulica por ensanchamiento, se deduce que la presencia del puente es, de por sí, un incentivo a la socavación de fondo, por lo menos hasta que la corriente restablezca el equilibrio.



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

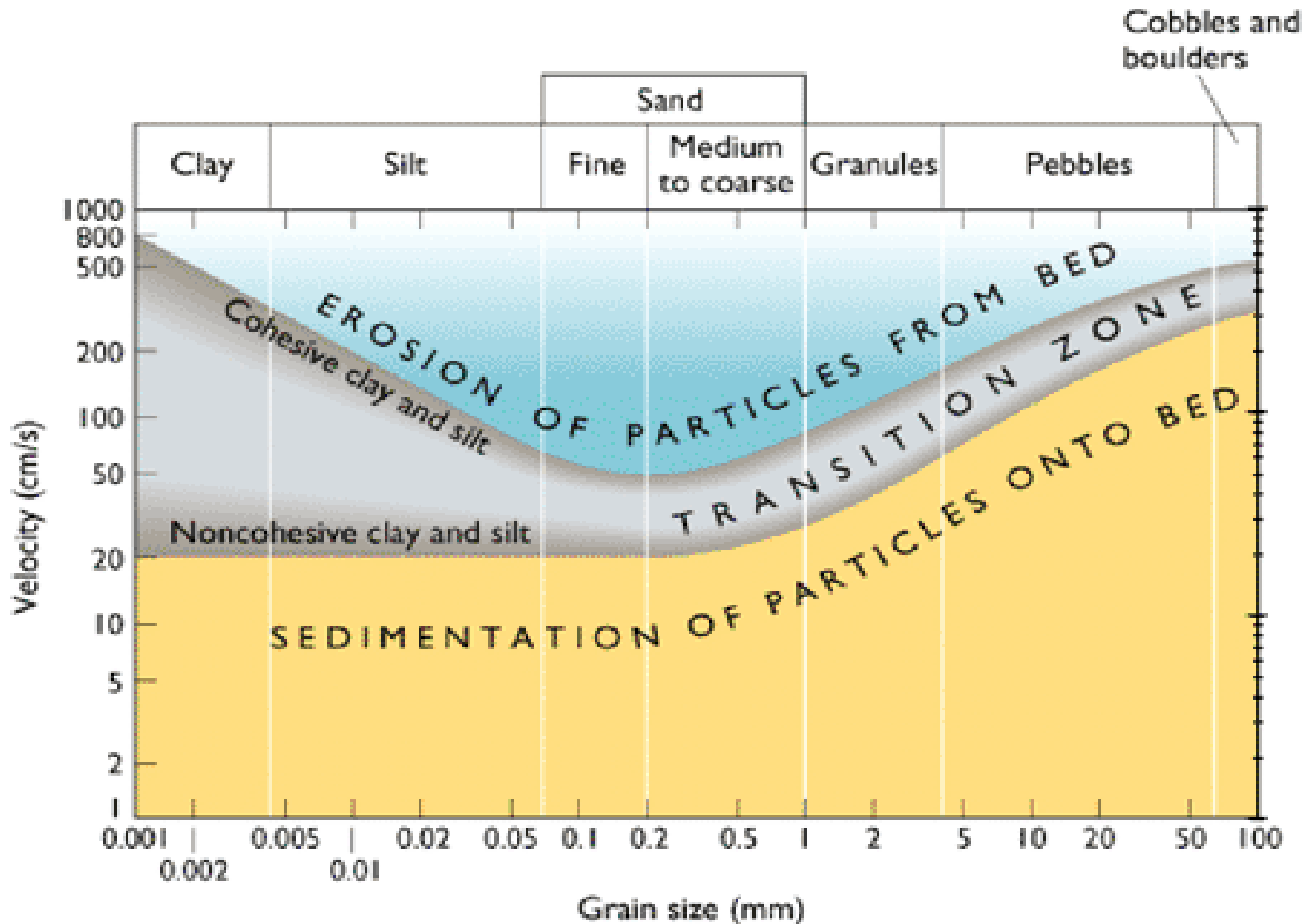




Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

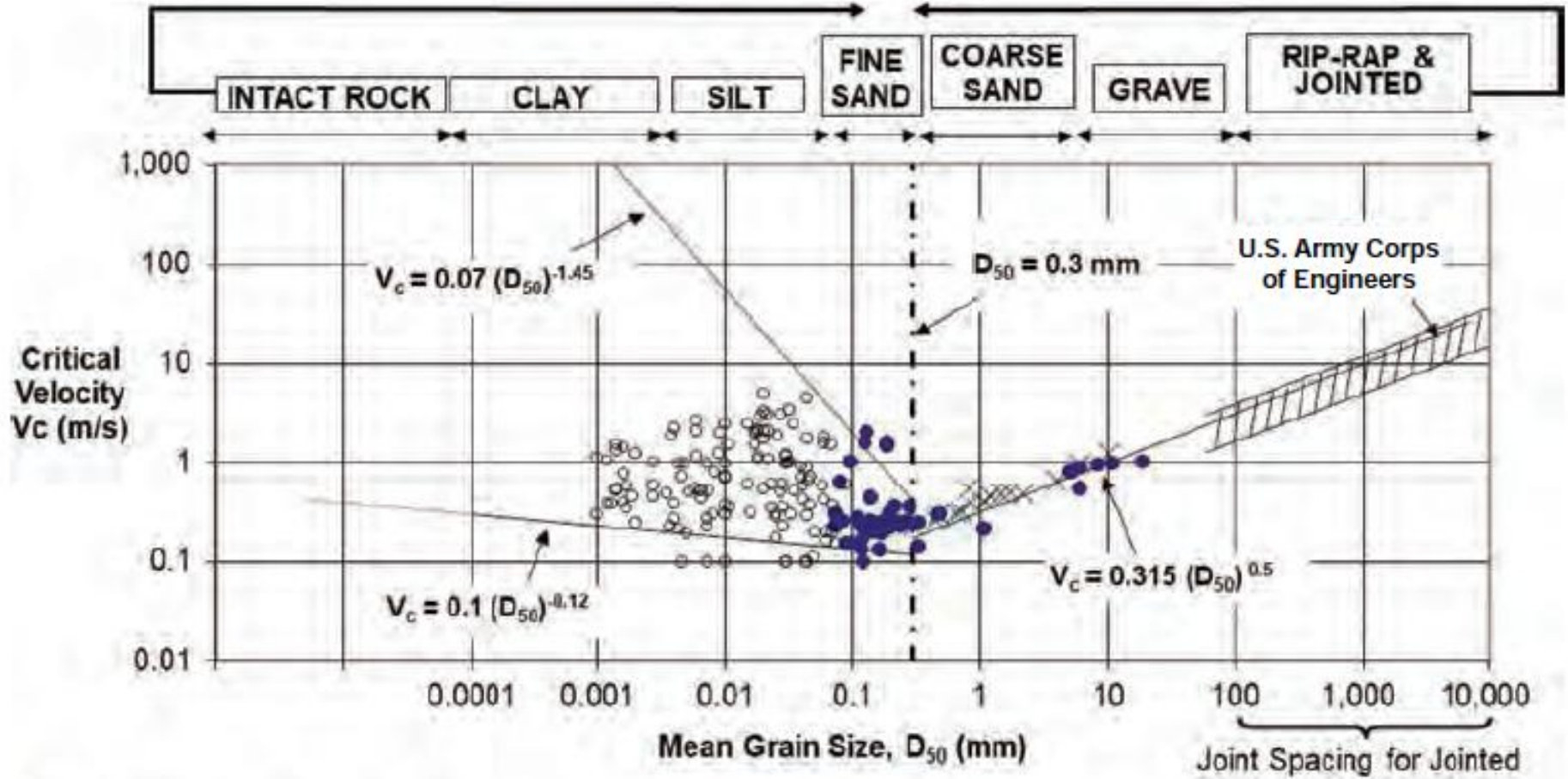




Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

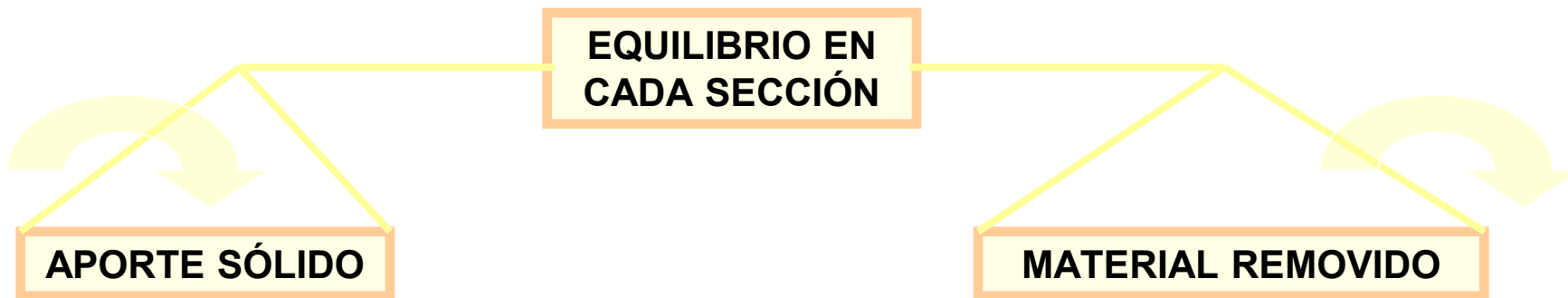
HIDRAULICA DE PUENTES





EROSIÓN GENERALIZADA:

Descenso del lecho del río que se produce al presentarse una creciente debido al aumento de la capacidad de arrastre de material sólido que en ese momento adquiere la corriente, en virtud de su mayor velocidad.

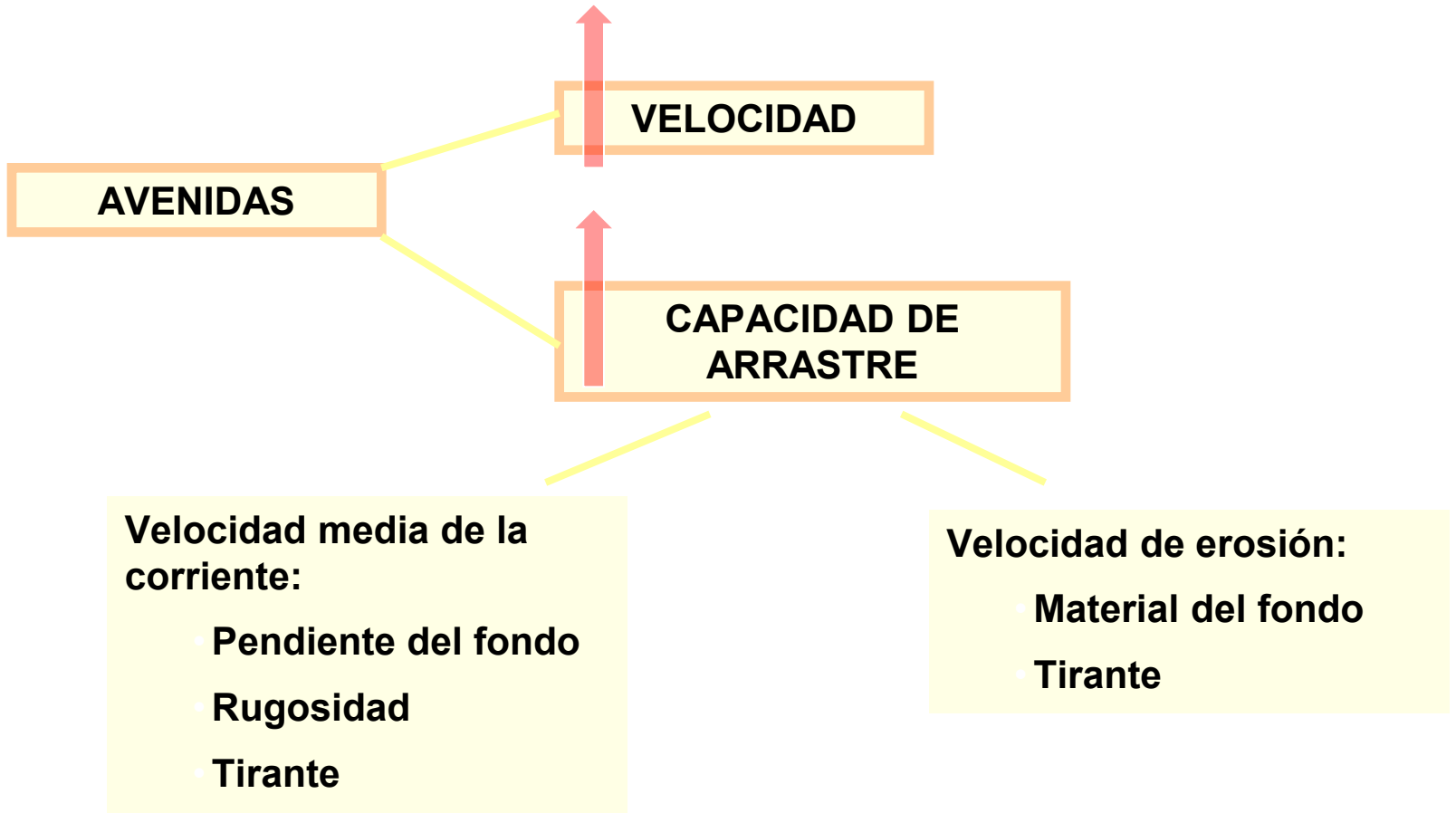




Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES



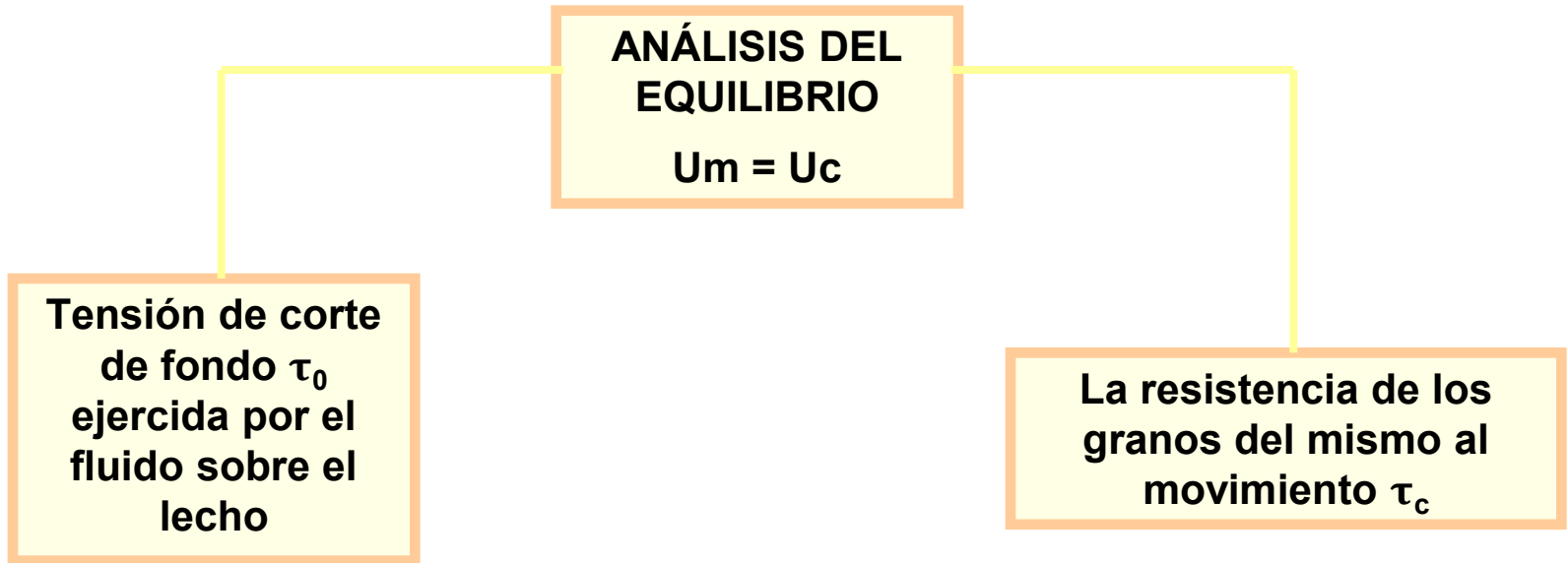


Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

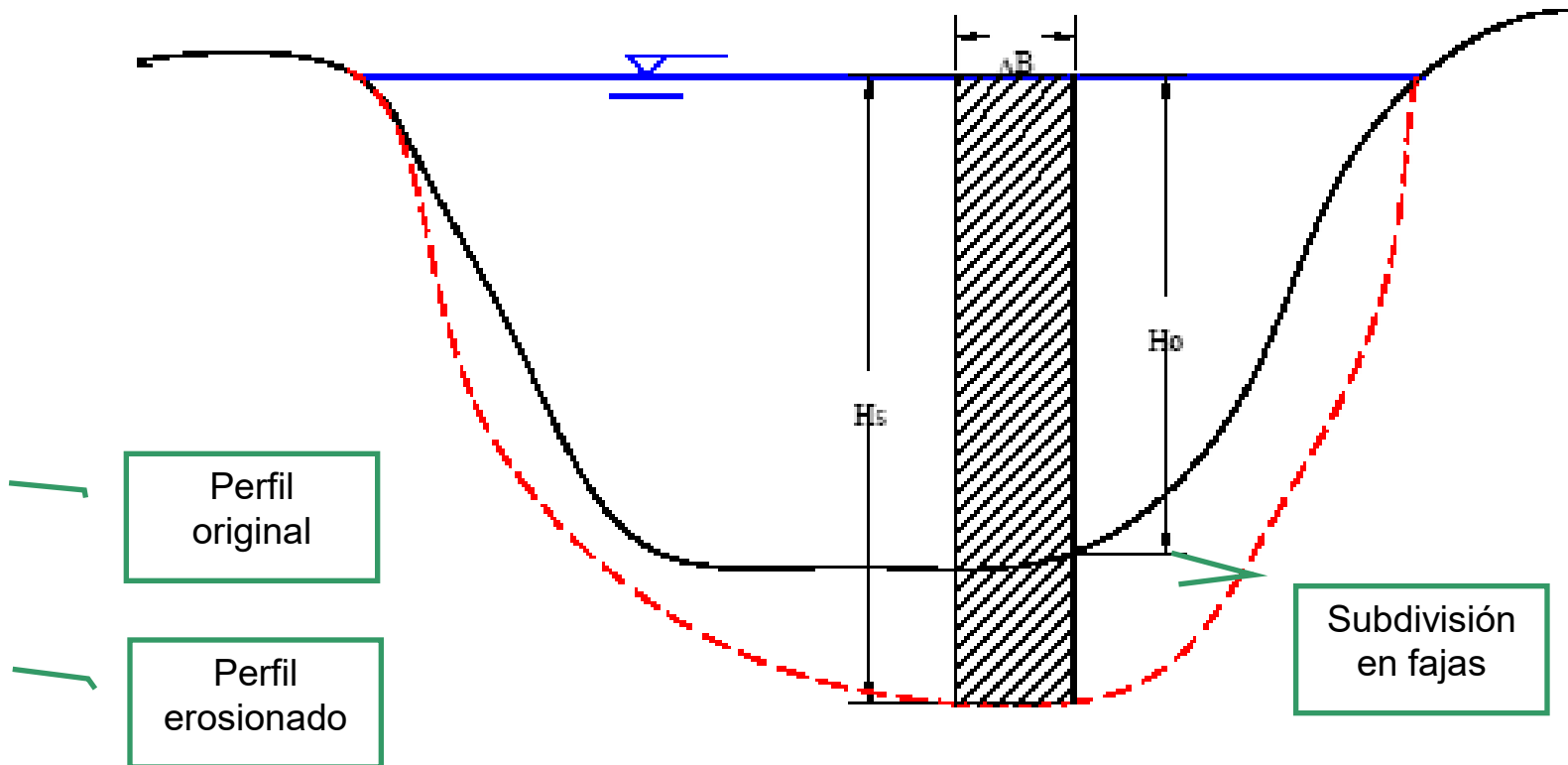
TEORÍA DE RÉGIMEN: Lischtván-Levediev



Donde:

- U_m es la velocidad media real del escurrimiento en una vertical dada.
- U_c es la velocidad media que necesita el escurrimiento para comenzar a erosionar un material de fondo determinado

VALIDEZ: $F < 1$. Es decir en régimen lento



HIPÓTESIS: el caudal específico "q" (caudal por unidad de ancho) permanece constante durante todo el proceso erosivo.



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

En el instante inicial del proceso erosivo ($t=0$) se tiene, para cada faja, que:

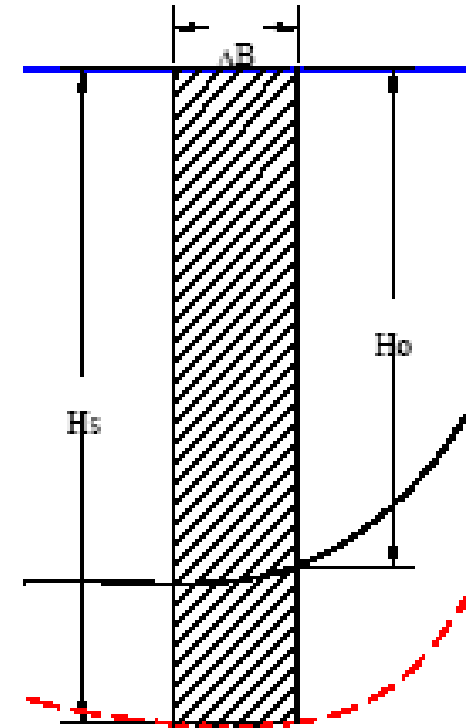
$$Q = U_0 \cdot \Delta A = \underbrace{\frac{1}{n} \sqrt{i} R^{2/3}}_{U_0 \text{ (CHEZY)}} \cdot \underbrace{H_0 \Delta B}_{\Delta A}$$

Donde :

- R: Radio Hidráulico. Adoptamos, en este caso, $R \cong H_0$.
- n: Coeficiente de Manning.
- i: Pendiente.
- H_0 : Profundidad media de la faja considerada para $t=0$.
- ΔB : Ancho de la faja.

En el instante final, cuando se detiene la erosión, se tiene:

$$Q' = U_f \cdot H_s \cdot \Delta B$$





Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

Ahora, como adoptamos la hipótesis de "q" constante, $Q = Q'$. Entonces,

$$U_f \cdot H_s \cdot \Delta B = \frac{1}{n} \sqrt{i} R^{2/3} \cdot H_0 \Delta B \Rightarrow U_f = \frac{1}{n} \sqrt{i} \frac{H_0^{5/3}}{H_s}$$

De esta última expresión puede apreciarse que, a medida que aumenta H_s , disminuye U_f (lo cual ocurrirá hasta que $U_f \cong U_c$).

Suelos cohesivos

$$U_c = 0,6 \gamma_d^{1,18} \beta H_s^x$$

Suelos granulares

$$U_c = 0,68 \cdot d_m^{0,28} \beta H_s^x$$

β : Coeficiente que depende de la frecuencia con que se presente la crecida de análisis.

x : Exponente variable que está en función del peso volumétrico γ_d del material seco, o del diámetro medio d_m



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

Despejando:

Suelos cohesivos

$$H_s^{x+1} = \frac{1}{n} \frac{\sqrt{i} H_0^{5/3}}{0,60 \gamma_d^{1,18} \beta}$$

Suelos granulares

$$H_s^{x+1} = \frac{1}{n} \frac{\sqrt{i} H_0^{5/3}}{0,68 d_m^{0,28} \beta}$$

Donde:

γ_d : Peso volumétrico del material seco que se encuentra a una profundidad h_s .

Unidades: [t/m³].

d_m : diámetro medio de las partículas

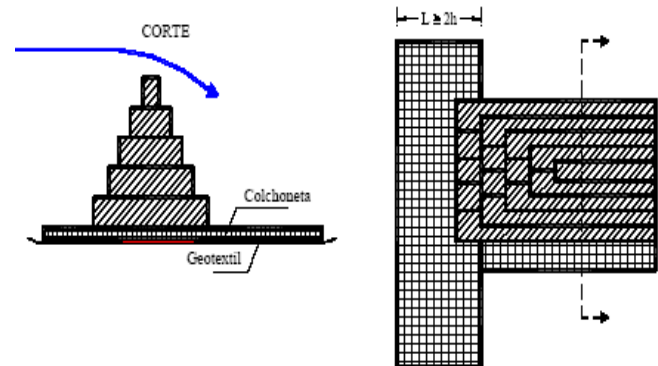
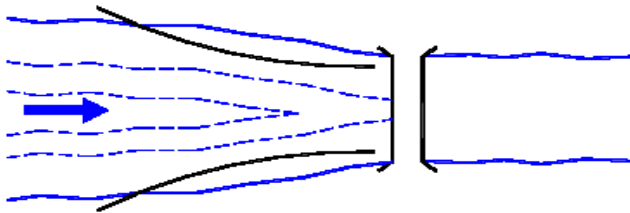
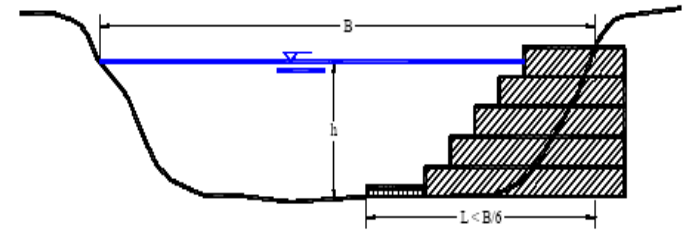
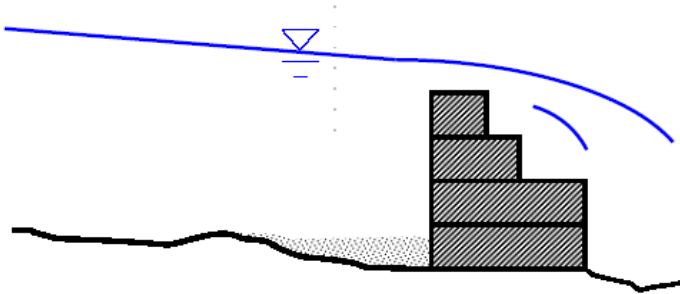
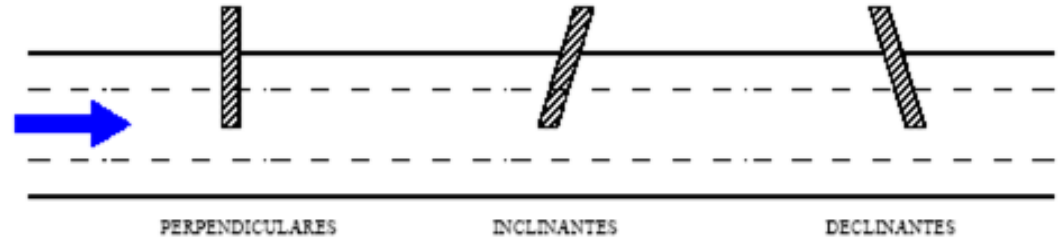
$$d_m = \frac{\sum d_i \cdot p_i}{100}$$

Donde:

- d_i = Diámetro medio de una fracción de suelo.
- p_i = Peso como porcentaje de esa misma fracción.

SOLUCIONES POSIBLES AL PROBLEMA

- Azud aguas abajo
- Espigones aguas arriba
- Gaviones
- Muros de Encauzamiento





Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

EROSIÓN POR CONTRACCIÓN:

Se entiende por Erosión por Contracción a la que se produce por el aumento en la capacidad de arrastre de sólidos que adquiere una corriente cuando su velocidad aumenta por efecto de una reducción más o menos brusca de área hidráulica en su cauce.

El efecto es muy importante en puentes, donde, por lo común y por razones de economía, suelen ocurrir las mencionadas reducciones.

VERIFICACIÓN DE PUENTE CONSTRUIDO:

Verificar que durante el paso de la crecida de diseño seleccionada se cumpla $U \leq 3,0$ m/s.

PROYECTO EXISTENTE:





Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

A efecto de contar con una idea, acerca de la luz de puente necesaria podemos adoptar.

La fórmula que propone Charlton:

$$b = 5,074 \cdot \sqrt{Q}$$

Donde:

b = Luz del puente en metros.

Q = Caudal de diseño en m³/s.

El criterio de mayorar las luces en caso de cauces meandrosos no ayuda mucho, pues, tal como sugiere Blench T., “ ... luces excesivas dan lugar a mayor número de pilas, pudiendo ser que cualquiera de ellas resulte severamente atacada, puesto que el río se moverá a lo largo del puente en su ciclo normal de serpenteo ... “.

Por otra parte luces menores que la necesaria, originarán inaceptables socavaciones.



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

HEC 18: Suelos No Cohesivos

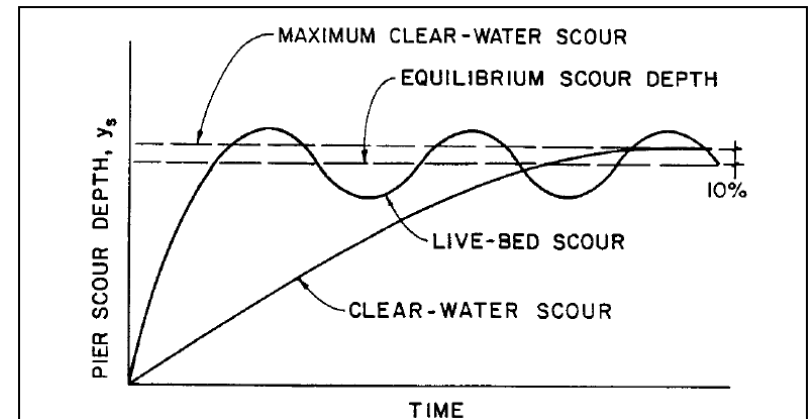
Lecho Móvil ↔ Aguas Claras

Aguas Claras ($V < V_c$): ocurre cuando el flujo aguas arriba de la sección de estudio no transporta material del fondo o el material transportado es en suspensión (generalmente para material grueso, ríos de baja pendiente durante caudales bajos o zonas protegidas)

Lecho Móvil (o vivo) ($V > V_c$): ocurre cuando hay transporte de material del fondo en la sección aguas arriba (generalmente material de menor tamaño y durante crecidas)

$$V_c = K_u y^{1/6} D^{1/3}$$

- Y: tirante promedio aguas arriba (m)
- D: diámetro de la partícula (m) (recomendado 1.25 D₅₀)
- K_u: 6.19 para sistema métrico internacional





Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

HEC 18: Suelos No Cohesivos – Lecho Móvil

$$\frac{y_2}{y_1} = \left(\frac{Q_2}{Q_1} \right)^{6/7} \left(\frac{W_1}{W_2} \right)^{k_1}$$

**basada en el método de Laursen (1960)*

Y2: tirante erosionado en el cauce principal (m)

Y1: tirante aguas arriba en el cauce principal (m)

Q1: caudal que transporta sedimentos aguas arriba (m³/s)

Q2: caudal total en la sección contraída (m³/s)

W1: ancho del cauce principal donde hay transporte de sedimentos (m)

W2: ancho de la sección contraída menos el ancho de la pilas (m)

K1: se determina de la Tabla

V*: velocidad de corte (= (gy₁ S₁)^{1/2}) (m/s)

g: aceleración de la gravedad

S1: pendiente de energía del cauce principal (m/m)

T: velocidad de sedimentación de la partícula



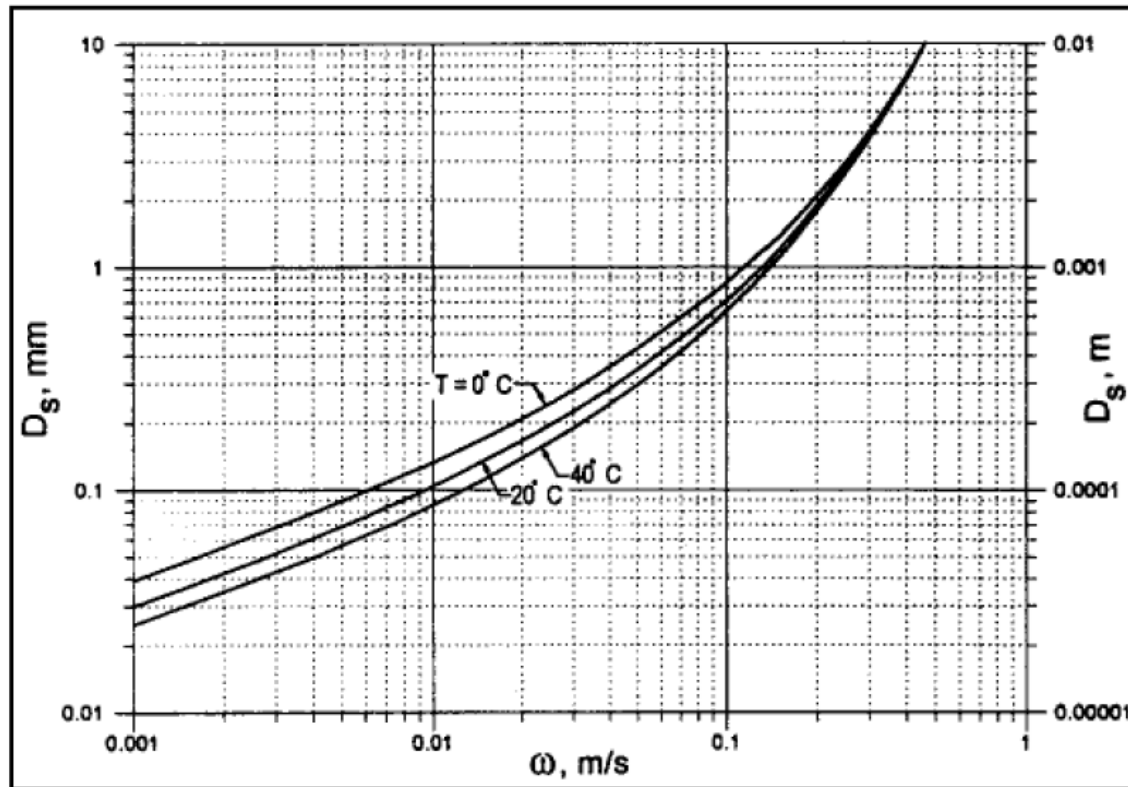
Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

HEC 18: Suelos No Cohesivos – Lecho Móvil

V_*T	k_1	Mode of Bed Material Transport
<0.50	0.59	Mostly contact bed material discharge
0.50 to 2.0	0.64	Some suspended bed material discharge
>2.0	0.69	Mostly suspended bed material discharge



HEC 18: Suelos No Cohesivos – Lecho Móvil

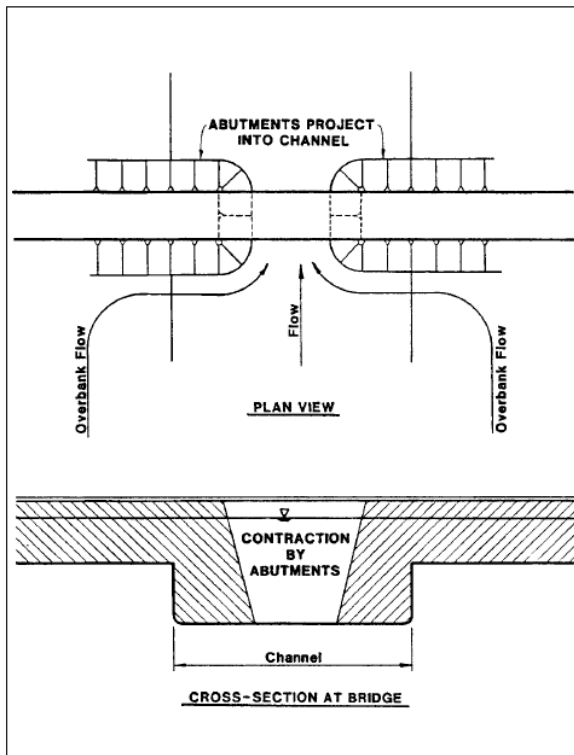


Figure 6.1. Case 1a: Abutments project into channel.

$$Q_2 = Q_{\text{total}}$$

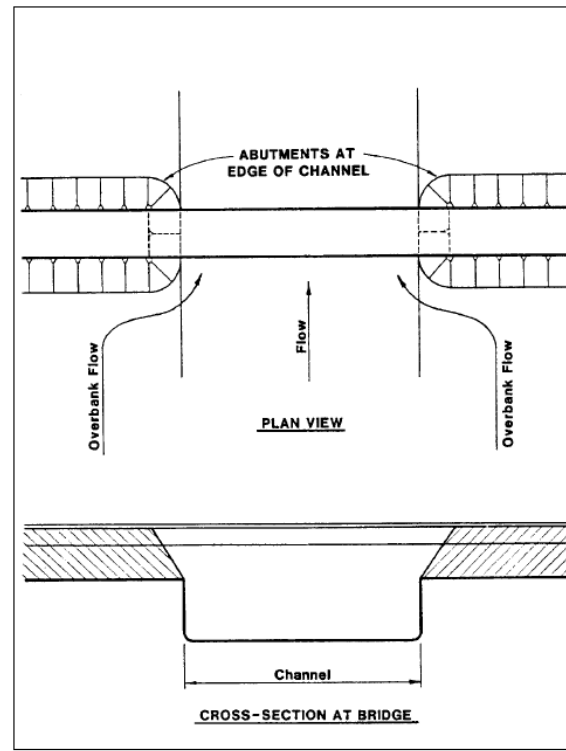


Figure 6.2. Case 1b: Abutments at edge of channel.

$$Q_2 = Q_{\text{total}}$$

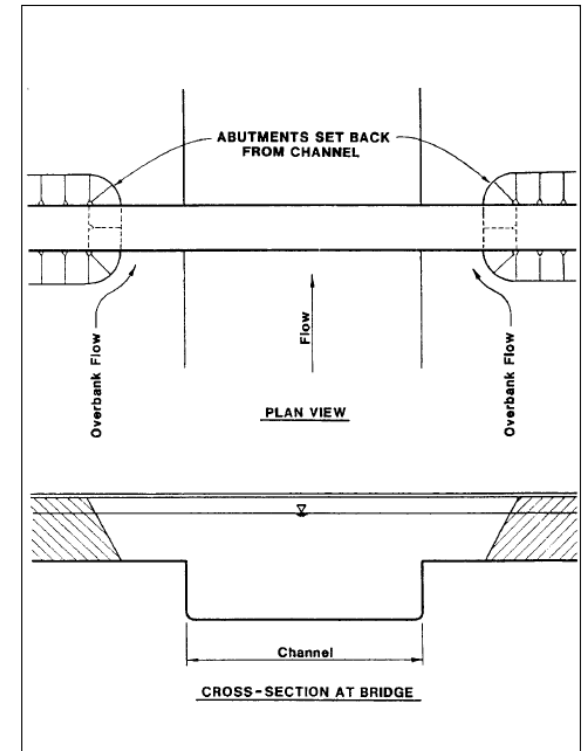


Figure 6.3. Case 1c: Abutments set back from channel.

$$Q_2 \neq Q_{\text{total}}$$



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

HEC 18: Suelos No Cohesivos – Agua Clara

$$y_2 = \left[\frac{K_u Q^2}{D_m^{2/3} W^2} \right]^{3/7} \quad \begin{array}{l} *Laursen (1963) \\ D_{50} > 0.2mm \end{array}$$

- **y_2** = Profundidad media de equilibrio en la sección contraída luego de la socavación por contracción, en pies (ft) o metros (m).
- **Q** = Caudal que pasa a través del puente o por el área de planicie de inundación retraída en el puente, asociado al ancho **W** , en pies cúbicos por segundo (ft³/s) o metros cúbicos por segundo (m³/s).
- **D_m** = Diámetro de la partícula más pequeña no transportable del material del lecho ($1.25 \times D_{50}$) en la sección contraída, en pies (ft) o metros (m).
- **W** = Ancho inferior de la sección contraída, descontando el ancho de los pilares, en pies (ft) o metros (m).
- **y_o** = Profundidad media existente en la sección contraída, en pies (ft) o metros (m).
- **K_u** = 0.025 en unidades del Sistema Internacional (SI).



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

EROSIÓN LOCALIZADA EN PILAS DE PUENTES

La erosión local es el descenso abrupto en el lecho fluvial alrededor de una pila, debido a la remoción del material de fondo, ocasionado por un escurrimiento de acción localizada, inducido por la presencia de la misma pila.

Importancia en el diseño de cimentaciones poco profundas

Aún suponiendo una pila cilíndrica de forma circular perfectamente vertical fundada en un lecho de granulometría uniforme no cohesivo, decepcionante por su sencillez, el tema continúa desafiando hoy la obtención de una solución racional.

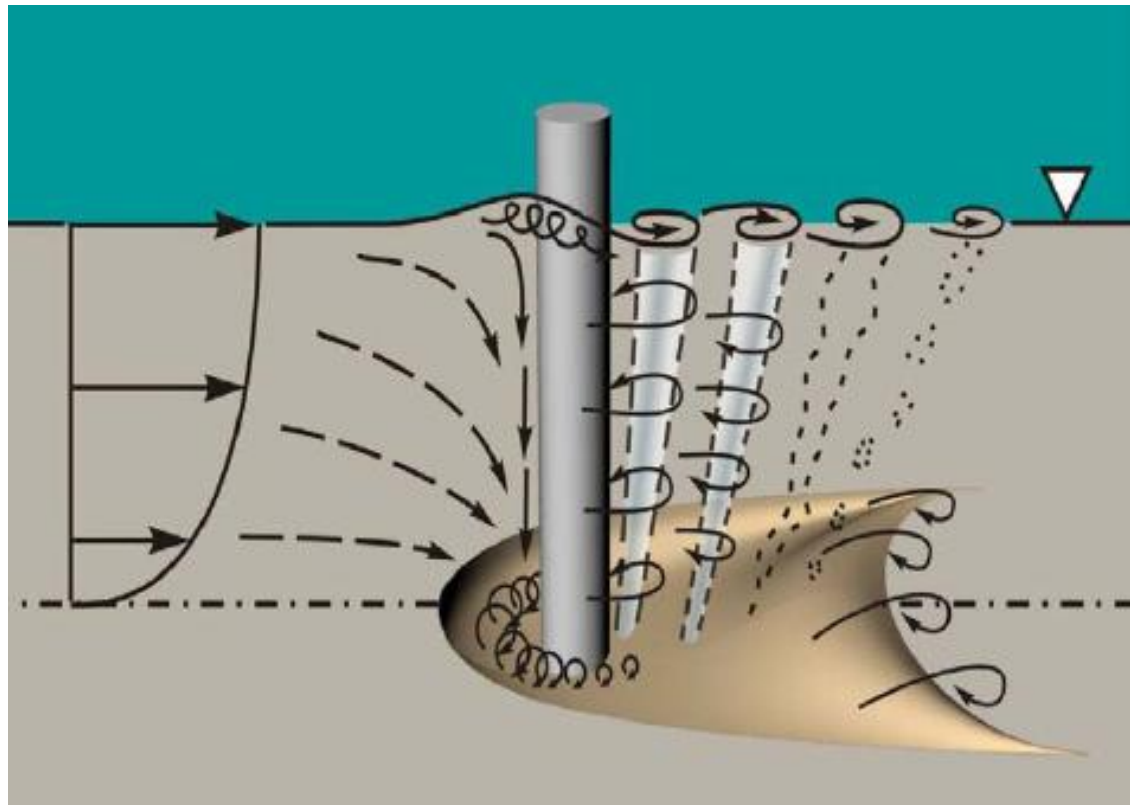
En todo lo que sigue nos referiremos a pilas cilíndricas (de cualquier forma), material granular no cohesivo de diámetro uniforme, lecho plano sin formas de fondo y corriente unidireccional sin influencia de olas ni mareas.

DESCRIPCIÓN DEL ESCURRIMIENTO:

El rasgo dominante del escurrimiento cerca de una pila es la presencia de una estructura de remolinos que se desarrolla alrededor de la misma. Estos vórtices son el mecanismo básico de la erosión local.

Dependiendo del tipo de pila y las condiciones de la corriente fluvial no perturbada, los tres sistemas básicos son:

1. **Vórtice en herradura**
2. **Vórtice de Estela**
3. **Vórtices de Extremo**





Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES





Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE EROSIÓN

El elemento dominante del proceso de erosión local alrededor de pilas de nariz roma es el vórtice en herradura. Si el fondo es erosionable, la socavación máxima se producirá en correspondencia con la máxima intensidad del vórtice, que tiene lugar en la generatriz que incluye el punto de estancamiento de la corriente. Es decir que la máxima erosión estará en general situada delante del pie de la pila, aguas arriba de ésta.

El vórtice en herradura es inicialmente pequeño en sección transversal y comparativamente débil. Con la formación del foso de erosión, el vórtice rápidamente crece en tamaño e intensidad así como la componente hacia el lecho se presenta, incrementando el escurrimiento descendente.

Ese flujo hacia abajo actúa como una vena líquida vertical erosionando el lecho granular. A medida que aumenta el foso de erosión la circulación asociada con el vórtice en herradura aumenta debido a su sección transversal en expansión pero con una velocidad de variación decreciente, con la variación del incremento controlado por la cantidad de fluido suministrado al vórtice mediante el flujo descendente aguas arriba del cilindro.

La magnitud del escurrimiento vertical decrece a medida que el foso aumenta. Por lo tanto, la velocidad de erosión decrece.

La condición de equilibrio se logra cuando la profundidad de erosión aguas arriba del cilindro es suficiente para que la magnitud del flujo descendente vertical, delante del cilindro, no pueda echar fuera granos del lecho.



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

ANÁLISIS DIMENSIONAL DEL PROCESO:

Variables:

Características del Fluido: su masa específica ρ y su viscosidad cinemática ν .

Características del Material del Lecho: su masa específica ρ_s , la curva granulométrica (que define el tamaño), la forma de los granos y el grado de cohesión del material.

Características del Esguerrimiento a dos fases: el tirante del flujo de aproximación h_0 , la velocidad media en esa zona U , la rugosidad del borde sólido k en esa zona y la gravedad reducida propia de los esguerrimientos a dos fases $g \cdot (\rho_s/\rho - 1)$, la velocidad de corte U^* .

$$U^* = \sqrt{g \cdot h_0 \cdot i}$$

Características de la Pila: éstas son: la forma, las dimensiones, la condición de superficie y el sistema de protección de la pila. Para una pila cilíndrica, circular y perfectamente lisa, su diámetro b resulta suficiente.



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

Entonces, con las simplificaciones expuestas, la profundidad máxima final de erosión será:

$$h_s = f_1 (\rho, \nu, \rho_s, d, h_0, g.(s-1), U^*, b)$$

Debe aclararse que la altura h_s corresponde a la altura erosionada medida desde la cota del nivel del lecho sin perturbar.

Ahora, mediante la aplicación del Teorema de BUCKINGHAM, las nueve variables anteriores pueden reducirse a seis parámetros representativos que las contienen. Se eligen los siguientes grupos:

$$\frac{h_s}{b} = f \left(\frac{U^* d}{\nu}, \frac{U^{*2}}{g.(s-1).d}, s, \frac{h_0}{b}, \frac{d}{b} \right)$$

No. De Reynolds (R^*)

Parámetro de movilidad del grano (Y)



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

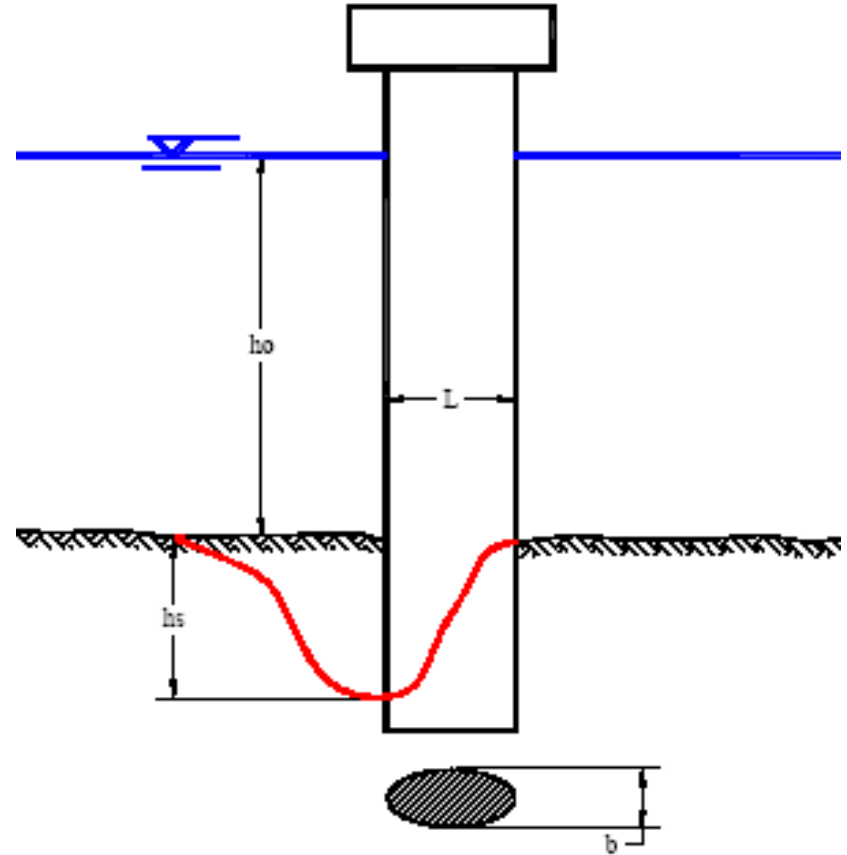
HIDRAULICA DE PUENTES

Dicha selección está fundamentada en las siguientes razones:

a) Las experiencias han demostrado que es posible relacionar la profundidad de erosión con el diámetro de la pila (h_s/b). Esto puede explicarse físicamente por el hecho de que la erosión es debida al sistema de vórtice en herradura, cuya intensidad es función del diámetro de la pila.

b) El número de Reynolds y el denominado "Parámetro de Movilidad del Grano" son parámetros básicos en los estudios de transporte de sedimentos.

c) Las relaciones geométricas h_0/b y d/b ligam el diámetro de la pila con las dimensiones lineales del flujo y el sedimento.





Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

Sin embargo, aún se pueden hacer algunas simplificaciones si consideramos que:

Para las condiciones de iniciación de arrastre (correspondiente a $h_s = h_{sMAX}$) existe una relación empírica (tal como la de Shields) entre los parámetros R^* e Y , es decir:

$$Y = f(R^*)$$

Las masas específicas de sedimentos y líquido se consideran constantes, lo que para condiciones naturales es aproximadamente correcto, con $s \approx 1,65$.

Teniendo en cuenta estas simplificaciones se puede reducir la expresión anterior a la siguiente:

$$\frac{h_s}{b} = F \left(\frac{U}{U_c}; \frac{h_0}{b}; \frac{d}{b} \right)$$

$$\frac{h_s}{b} = F \left(\frac{U}{U_c}; \frac{h_0}{b}; \frac{d}{b}; \text{forma}; \alpha \right)$$

Donde U/U_c es la relación entre la velocidad media del escurrimiento no perturbado y la crítica para la que se inicia el arrastre en todo el lecho.



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

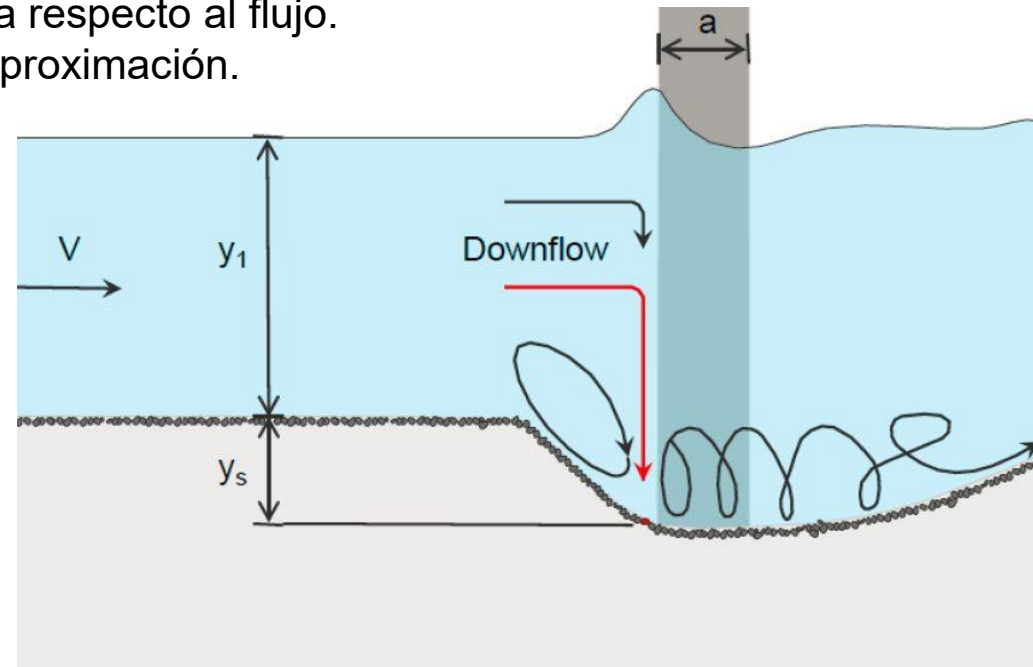
SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

Variables

Los factores que afectan la magnitud de la **profundidad de socavación local** en pilas y estribos son:

1. Velocidad del flujo de aproximación.
2. Profundidad del flujo.
3. Ancho de la pila.
4. Caudal interceptado por el estribo (flujo efectivo).
5. Tamaño y gradación del material del lecho (D50, granulometría, Cohesión).
6. Longitud de la pila si está desviada respecto al flujo.
7. Ángulo de incidencia del flujo de aproximación.
8. Forma de la pila o del estribo.
9. Configuración del lecho.





Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

CRITERIO DE CÁLCULO

Se recomienda el criterio expuesto en un muy completo artículo publicado por BREUSERS, NICOLLET y SHEN en 1977.

$$\frac{h_s}{b} = \Phi_1 \left(\frac{U}{U_c} \right) \left[2 \operatorname{tgh} \left(\frac{h_o}{b} \right) \right] \Phi_2 K_\alpha$$

Donde:

1- Φ_1 es una función de la relación U/U_c y vale:

$$\Phi_1 (U/U_c) = 0 \text{ ; si } U/U_c \leq 0,5$$

$$\Phi_1 (U/U_c) = 2 \cdot U/U_c - 1 \text{ ; si } 0,5 \leq U/U_c \leq 1$$

$$\Phi_1 (U/U_c) = 1 \text{ ; si } U/U_c \geq 1$$

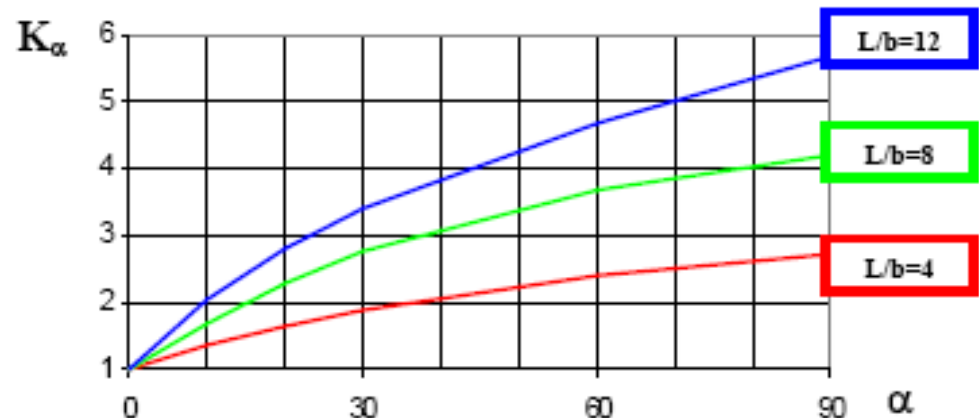
2- Φ_2 es un coeficiente que depende de:

$$\Phi_2 = 1,00 \text{ para pilas rectangulares}$$

$$\Phi_2 = 1,30 \text{ para pilas circulares}$$

$$\Phi_2 = 0,75 \text{ para pilas elípticas}$$

3- K_α se obtiene directamente del gráfico en función del ángulo de ataque α y la relación L/b (siempre $L/b \geq 4$)





Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

HEC 18: Suelos No Cohesivos

Estimación de la socavación máxima en pilas, sobre suelos granulares basada en el método de Richardson y Davis (2001), y se aplica tanto para agua clara como para lecho vivo (live bed).

$$\frac{y_s}{y_1} = 2.0 K_1 K_2 K_3 \left(\frac{a}{y_1} \right)^{0.65} Fr_1^{0.43}$$

Y_s = tirante erosionado (m)

Y_1 = tirante aguas arriba de la pila (m)

K_1 = Factor de Corrección por forma de la pila

K_2 = Factos de corrección por ángulo del flujo

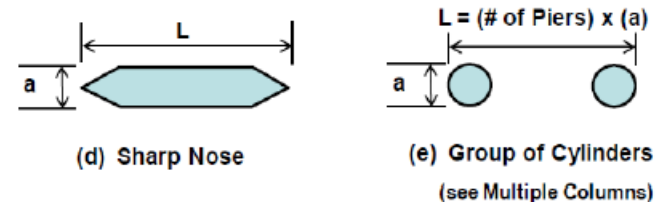
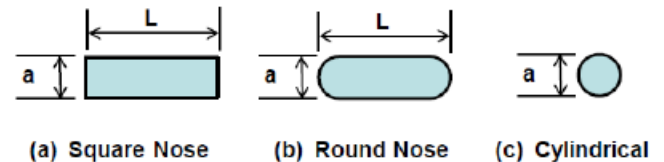
K_3 = Factor de corrección por lecho del río

a = ancho pila (m)

L = largo de pila (m)

Fr = número de Froude

V_1 = velocidad del flujo aguas arriba de la pila (m/s)





Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

NCHRP: Sheppard y Melville (Suelos No Cohesivos)

Reference	Equation	Notes	No.
Inglis (1949)	$\frac{y_1 + y_2}{a} = 1.70 \left[\frac{q^{0.25}}{a} \right]^{0.33}$	q = average discharge intensity upstream from the bridge (ft^3/s) a = pier width	1
Ahmad (1953)	$y_1 + y_2 = 0.45 K_s q^{0.25}$	q_1 = local discharge intensity in contracted channel (ft^3/s)	2
Laursen (1958)	$\frac{a}{y_1} = 5.5 \frac{y_1}{y_2} \left[\left(\frac{y_1}{11.5 y_2} + 1 \right)^{0.57} - 1 \right]$	Applies to live-bed scour	3
Chitale (1962)	$\frac{y_2}{y_1} = 6.65 Fr - 0.51 - 5.49 Fr^2$	Fr = Froude Number of the approach flow $= V_1 \sqrt{g y_1} / \rho^{0.5}$	4
Laursen (1963)	$\frac{a}{y_1} = 5.5 \frac{y_1}{y_2} \left[\left(\frac{y_1}{11.5 y_2} + 1 \right)^{0.54} \left(\frac{r_1}{r_c} \right)^{0.25} - 1 \right]$	Applies to clear-water scour r_1 = grain roughness component of bed shear r_c = critical shear stress at threshold of motion	5
Larras (1963)	$y_1 = 0.43 K_s K_p a^{0.33}$	a is in ft	6
Breusers (1965)	$y_1 = 1.4 a$	Derived from data for tidal flows	7
Blench (1969)	$\frac{y_1 + y_2}{y_1} = 1.8 \left(\frac{a}{y_1} \right)^{0.25}$	y_1 = regime depth $= 1.48 (q^2 / F_0)^{0.25}$ where $F_0 = 1.9 (D)^{0.5}$ D is in mm and q in m^3/s	8
Shen et al. (1969)	$y_1 = 0.000223 \left(\frac{V_1 a}{\nu} \right)^{0.433}$ $y_2 = 0.000223 \left(\frac{V_2 a}{\nu} \right)^{0.433}$	ν = kinematic viscosity	9
Coleman (1971)	$\frac{V_1}{\sqrt{2 g y_1}} = 0.6 \left(\frac{V_1}{a} \right)^{0.5}$		10
Hancu (1971)	$\frac{y_2}{a} = 2.42 \left(\frac{2 V_1}{V_c} - 1 \right) \left(\frac{V_2}{g a} \right)^{0.53}$	$(2 V_1 / V_c - 1) = 1$ for live-bed scour	11
Neill (1973)	$y_1 = K_p a$	$K_p = 1.5$ for round-nosed and circular piers; $K_p = 2.0$ for rectangular piers	12
Breusers et al. (1977)	$\frac{y_1}{a} = f \left(\frac{V_1}{V_c} \right) \left[2.0 \tanh \left(\frac{y_1}{a} \right) \right] K_1 K_2$	$f(V_1/V_c) = 0$ for $V_1/V_c \leq 0.5$ $= (2 V_1 / V_c - 1)$ for $0.5 < V_1 / V_c < 1$ $= 1$ for $V_1 / V_c > 1$	13
Jain (1981)	$\frac{y_2}{a} = 1.84 \left(\frac{y_1}{a} \right)^{0.33} Fr^{0.25}$	Applies to maximum clear-water scour	14
Froehlich (1988)	$\frac{y_2}{a} = 0.32 K_s Fr^{0.5} \left(\frac{a_0}{a} \right)^{0.62} \left(\frac{y_1}{a} \right)^{0.46} \left(\frac{a}{D_{50}} \right)^{0.58} + 1$	a_0 = projected width of pier	15
May and Willoughby (1990)	$y_1 = 2.4 f_1 \left(\frac{y_1}{y_m} \right) \left(\frac{y_2}{y_m} \right)$	For circular cylinder: $f_1 = 1.0$ $\frac{y_2}{y_m} = 1 - 3.66 \left(1 - \frac{y_1}{y_m} \right)^{0.52} < \frac{y_1}{y_m} < 1.0$ -1.0 $\frac{y_1}{y_m} > 1.0$ $\frac{y_2}{y_m} = 0.55 \left(\frac{y_1}{a} \right)^{0.25}$ $\frac{y_1}{a} \leq 2.7$ -1.0 $\frac{y_1}{a} > 1.0$	16

Reference	Equation	Notes	No.
Breusers and Raudkivi (1991)	$\frac{y_2}{a} = 2.3 K_y K_s K_d K_p K_q$	For an aligned pier, $y_2 = 2.3 K_y K_d K_p K_q b$	17
Gao et al. (1993)	$y_1 = 0.46 K_s a^{0.68} y_1^{0.13} D^{-0.07} \left[\frac{V_1 - V_c'}{V_c - V_c'} \right]^{\eta}$ $V_c = \left(\frac{y_1}{D} \right)^{0.14} \left[17.6 \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right) D + 6.05 \times 10^7 \left(\frac{10 + y_1}{D^{0.72}} \right) \right]^{0.53}$ $V_c' = 0.645 \left(\frac{D}{a} \right)^{0.053} V_c$ where $y_1, a, y_1, D, V_1, V_c, V_c'$ are in S.I. units.	V_c' = incipient velocity for local scour at a pier K_c = shape and alignment factor $\eta = 1$ for clear-water scour < 1 for live-bed scour i.e., $\eta = \left(\frac{V_c}{V_c'} \right)^{0.35 + 2.23 \log_{10} D}$	18
Ansari and Qadar (1994)	$y_1 = 0.024 a_0^{0.33}$ $a_0 > 7.2$ ft $y_2 = 2.238 a_0^{0.4}$ $a_0 > 7.2$ ft		19
Wilson (1995)	$\frac{y_1}{a} = 0.9 \left(\frac{y_1}{a} \right)^{0.4}$	a^* = effective width of pier	20
Melville (1997)	$y_1 = K_{y1} K_1 K_D K_2 K_3 K_4$ $K_{y1} = 2.4 a$ for $a / y_1 < 0.7$ $K_{y1} = 2 (y_1 a)^{0.5}$ for $0.7 < a / y_1 < 5$ $K_{y1} = 4.5 y_1$ for $a / y_1 > 5$ $K_1 = \frac{V_1 - (V_{p1} - V_c)}{V_c}$ for $\frac{V_1 - (V_{p1} - V_c)}{V_c} < 1.0$ $K_1 = 1$ for $\frac{V_1 - (V_{p1} - V_c)}{V_c} \geq 1.0$ $K_D = 0.57 \log_{10} \left(2.24 \frac{a}{D_{50}} \right)$ for $\frac{a}{D_{50}} \leq 25$ $K_D = 1$ for $\frac{a}{D_{50}} > 25$		21
Richardson and Davis (2001)	$\frac{y_2}{a} = 2 K_1 K_2 K_3 K_4 K_w \left(\frac{y_1}{a} \right)^{0.25} Fr^{0.43}$	K_3 = factor for mode of sediment transport K_4 = factor for armoring by bed material K_w = factor for very wide piers after Johnson and Torrico (1994) $y_{s(max)} = 2.4 b$ for $Fr \leq 0.8$ $y_{s(max)} = 3 b$ for $Fr > 0.8$	22

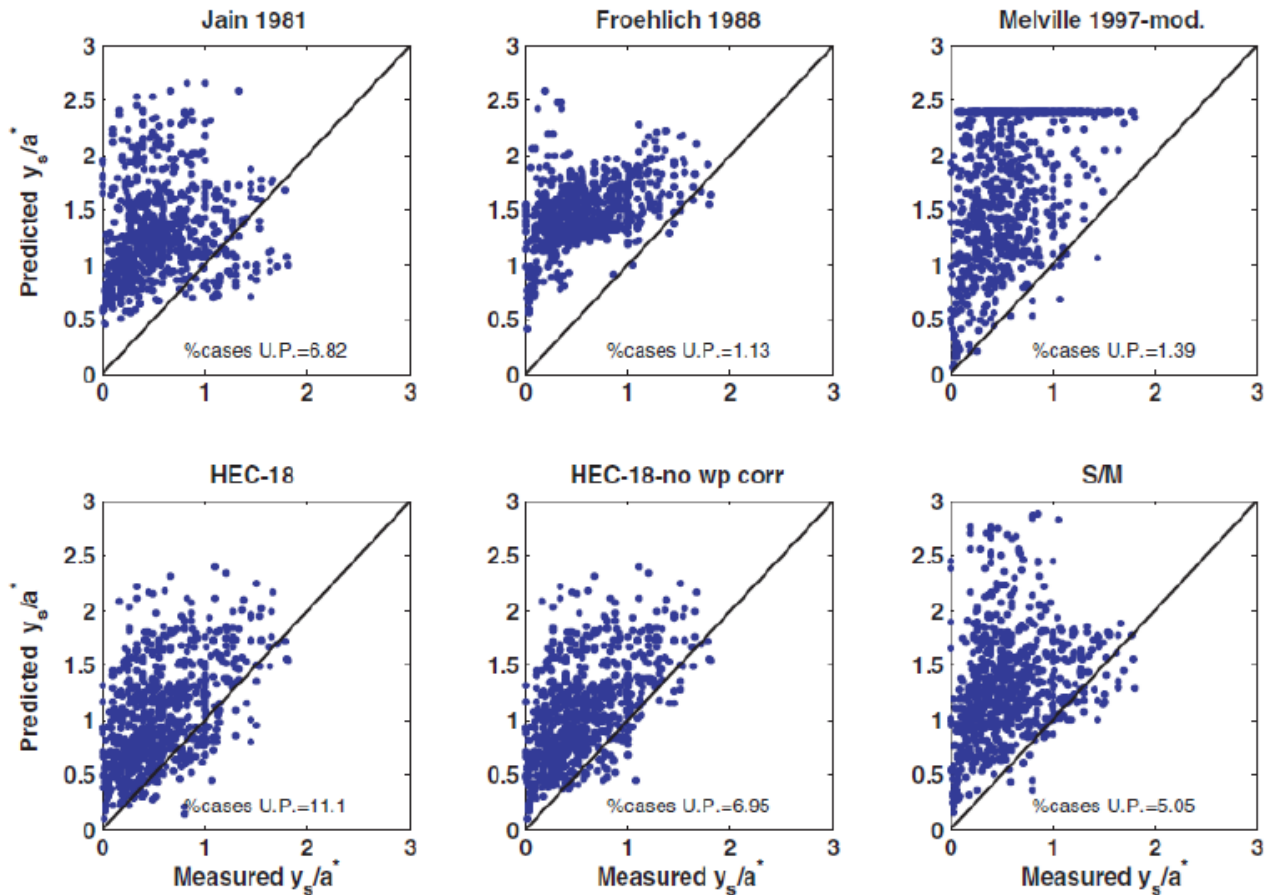


Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

NCHRP: Sheppard y Melville (Suelos No Cohesivos)



U.P. = underpredicted



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

NCHRP: Sheppard y Melville (Suelos No Cohesivos)

$$\frac{y_s}{a^*} = 2.5f_1f_2f_3 \quad \text{for } 0.4 \leq \frac{V_1}{V_c} < 1.0$$

$$\frac{y_s}{a^*} = f_1 \left[2.2 \left(\frac{\frac{V_1}{V_c} - 1}{\frac{V_{lp}}{V_c} - 1} \right) + 2.5f_3 \left(\frac{\frac{V_{lp}}{V_c} - \frac{V_1}{V_c}}{\frac{V_{lp}}{V_c} - 1} \right) \right] \quad \text{for } 1.0 \leq \frac{V_1}{V_c} \leq \frac{V_{lp}}{V_c}$$

$$\frac{y_s}{a^*} = 2.2f_1 \quad \text{for } \frac{V_1}{V_c} > \frac{V_{lp}}{V_c}$$

$$f_1 = \tanh \left[\left(\frac{y_1}{a^*} \right)^{0.4} \right]$$

$$f_2 = \left\{ 1 - 1.2 \left[\ln \left(\frac{V_1}{V_c} \right) \right]^2 \right\}$$

$$V_{lp} = 5V_c \text{ or } 0.6\sqrt{gy_1} \quad (\text{whichever is greater})$$

$$V_c = 5.75u_c^* \log \left(5.53 \frac{y_1}{D_{50}} \right)$$

$$f_3 = \left[\frac{\left(\frac{a^*}{D_{50}} \right)^{1.13}}{10.6 + 0.4 \left(\frac{a^*}{D_{50}} \right)^{1.33}} \right]$$

$$u_c^* = K_u (0.0377 + 0.041D_{50}^{1.4}) \quad \text{for } 0.1 \text{ mm} < D_{50} < 1 \text{ mm}$$

$$u_c^* = K_u (0.1D_{50}^{0.5} - 0.0213/D_{50}) \quad \text{for } 1 \text{ mm} < D_{50} < 100 \text{ mm}$$

a^* : ancho efectivo de pila (ancho proyectado = a x factor de forma ($k=1$ para circular))

Y_1 : tirante inicial (m)

D_{50} : tamaño de tamiz que pasa más del 50% de las partículas (m)

V_1 : velocidad del flujo (m/s)

V_c : Velocidad crítica (m/s)

K_u : 0.3048 para unidades S.I.

D_{50} : para cálculo de u_c D_{50} en (mm), para cálculo de V_c D_{50} en (m).



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

PROTECCIÓN DE LAS PILAS CONTRA LA EROSIÓN

Luego de haber seleccionado la forma de la pila pueden considerarse ciertas condiciones adicionales para impedir o disminuir los efectos erosivos a su alrededor.

Formas de controlar el proceso de erosión:

Impedir o modificar el cambio de dirección en la región de aguas arriba de la pila, tratando de reducir los vórtices.

- Zapatas de Fundación o Cabezales
- Voladizo desarrollado
- Pilas / Pantallas auxiliares

Tratar que el fondo del cauce resista la acción erosiva.

- Rip-Rap / Enrocado
- Gaviones
- Colchonetas de Gavion



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

EROSIÓN LOCALIZADA EN ESTRIBOS:

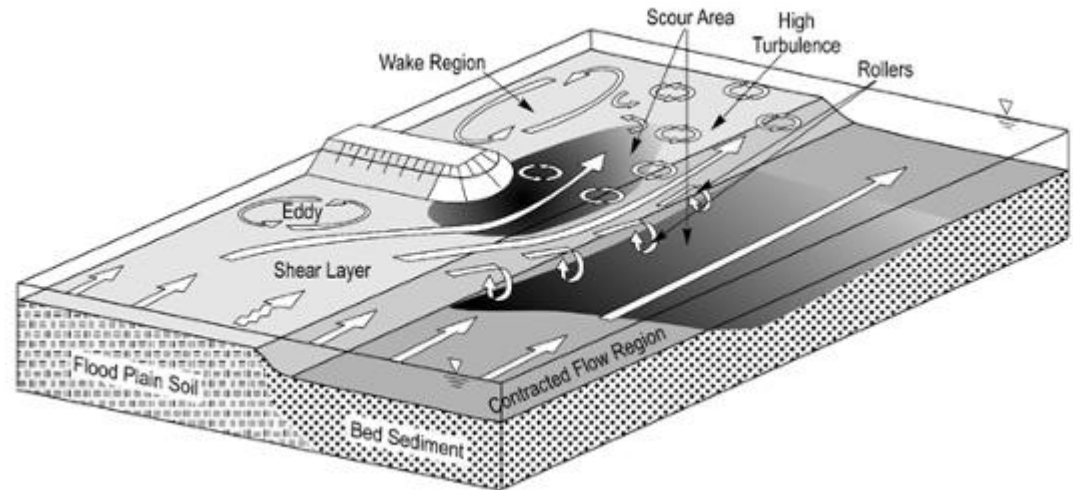
Tal como en el caso de las pilas del puente, el lecho fluvial sufre en las proximidades de los estribos una erosión local atribuible a los vórtices que se generan debido a los cambios de dirección de las líneas de corriente en la contracción. Desde un punto de vista teórico, éste es un complejo problema tridimensional en fondo móvil.

MÉTODOS DE CÁLCULO

Para proceder a analizar el problema, se sigue la misma metodología que la empleada en el caso de pilas

Formulaciones típicas:

- Artamonov
- Laursen
- Froehlich
- Hire
- NCHRP

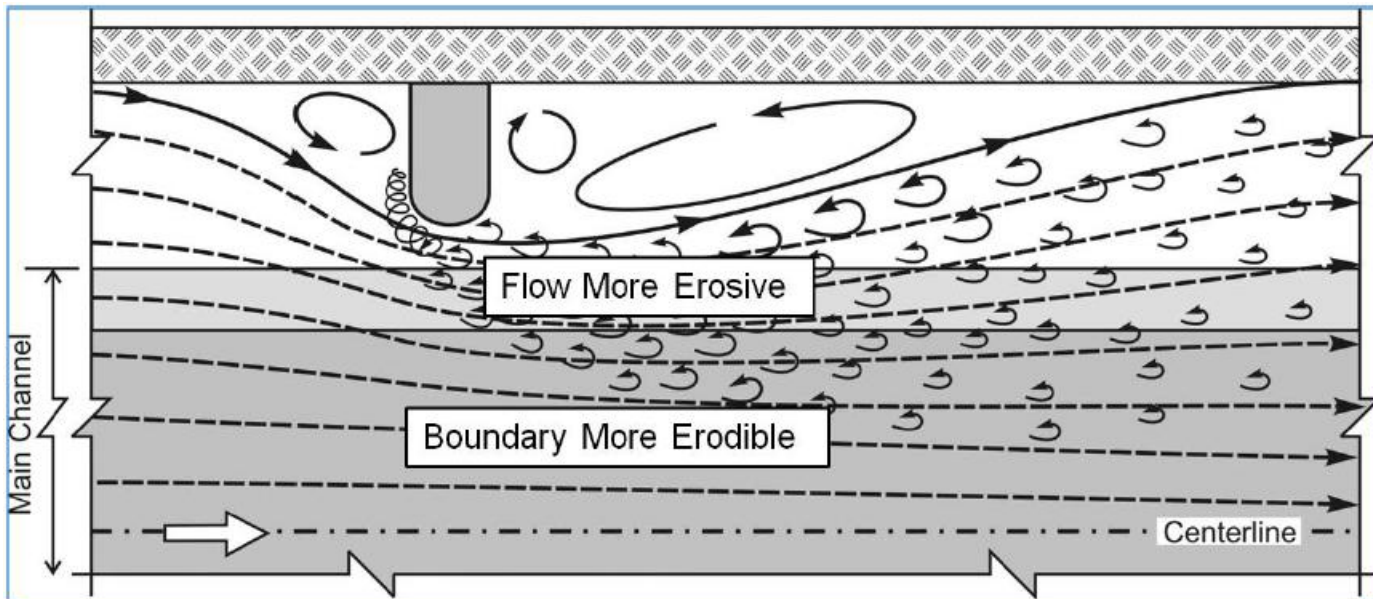
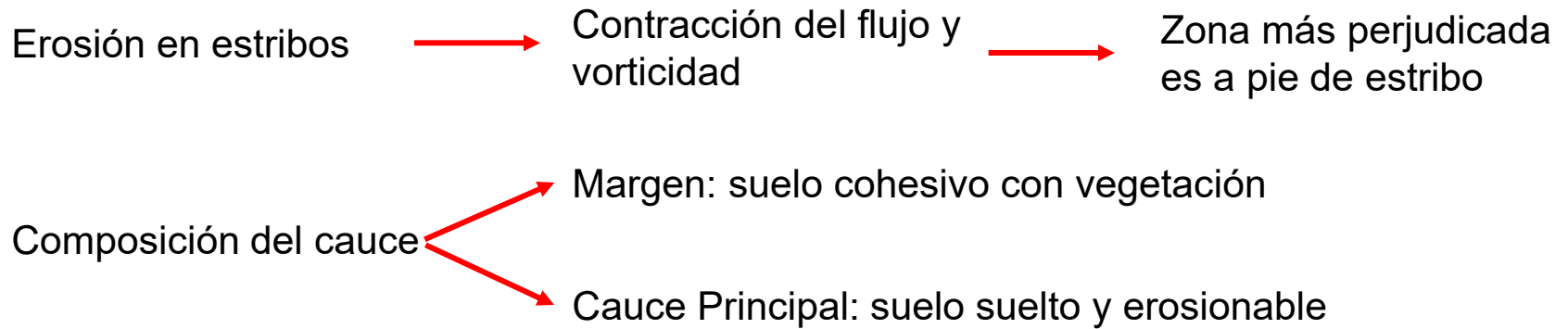




Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES





Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

Método de Laursen:

El autor considera en su análisis dos casos:

- a) Que el estribo se encuentre en el cauce de inundación.
- b) Que el estribo interfiera el cauce principal.

Para el caso a) Laursen señala que, para el caso de interferir el cauce de inundación:

$$\frac{h_s}{h_0} = f\left(\frac{Q_{ia}}{Q_a h_0}\right)$$

Donde:

- a = ancho de la socavación (con un valor de $2.75 h_s$ según el autor)
- Q_a = gasto que corresponde a la franja de ancho "a".
- Q_i = gasto interceptado por el estribo en el cauce de inundación.

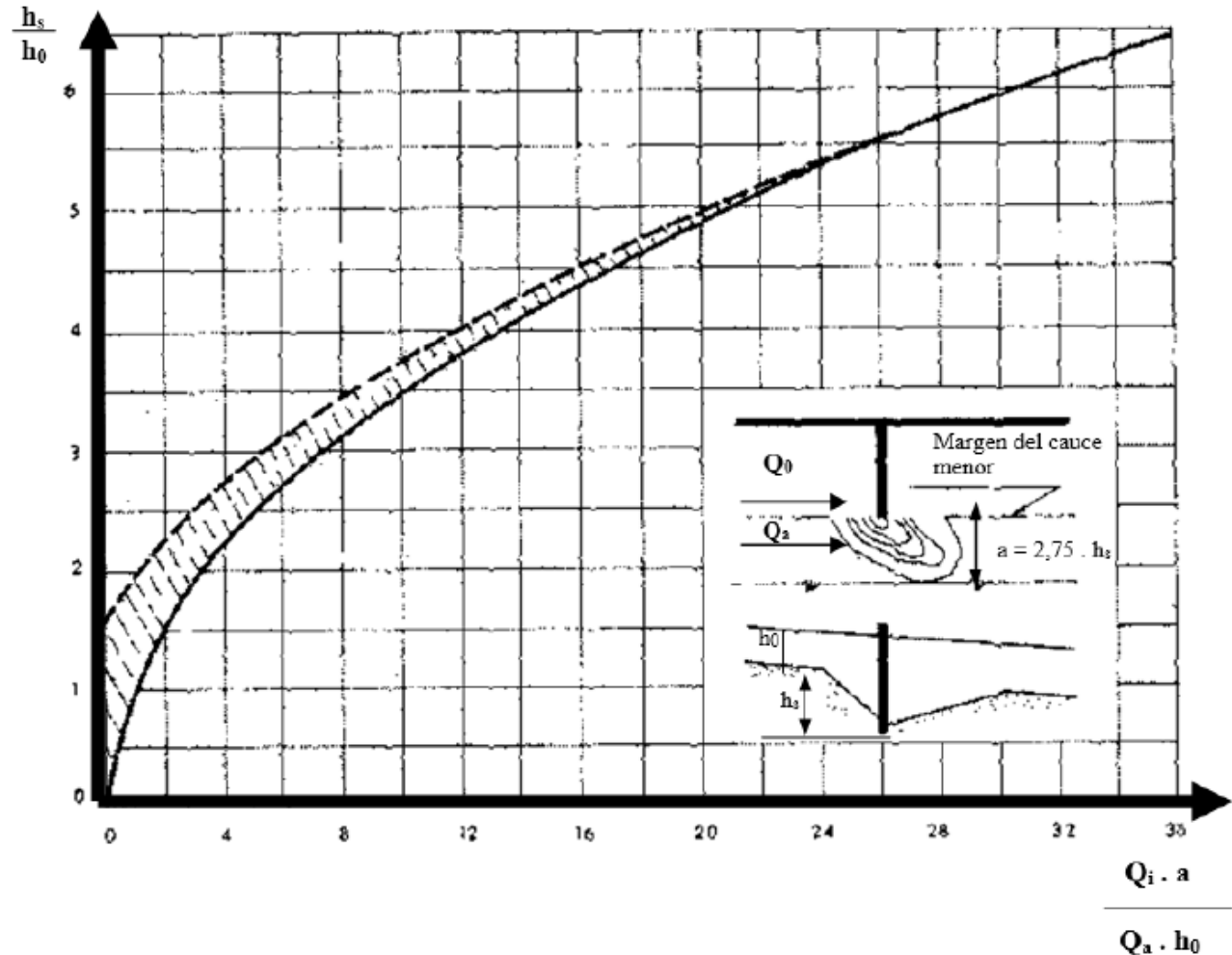


Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

Si el gasto es pequeño y no se espera escurrimiento transversal, puede utilizarse la curva inferior, en trazo continuo. Si, en cambio, aparece flujo transversal difícilmente cuantificable, la socavación será mayor y deberá utilizarse la curva de trazo discontinuo que proporciona un valor más conservador.





Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

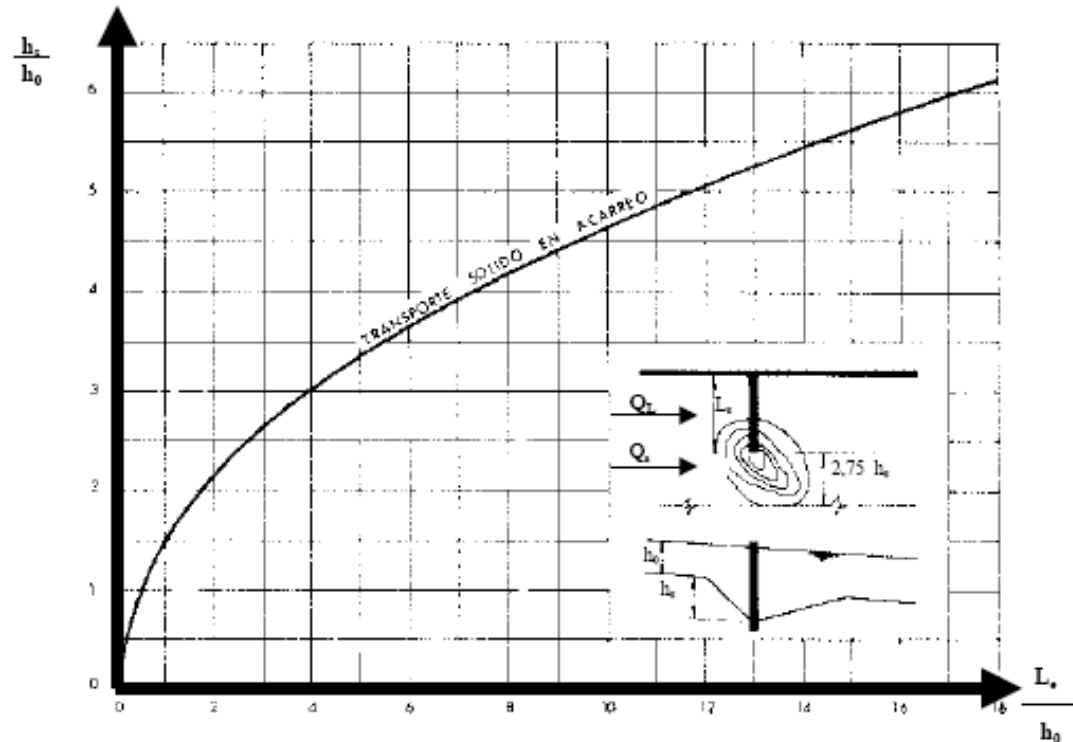
En el caso b), es decir cuando el estribo interfiere el cauce principal

$$\frac{h_s}{h_0} = f' \left(\frac{L_e}{L_0} \right)$$

Donde L_e es la longitud efectiva del estribo (es decir que corresponde al ancho efectivo de obstrucción) y está dada según:

$$L_e = a \frac{Q_1}{Q_a}$$

Siendo Q_1 el gasto que corresponde a la parte obstruida.





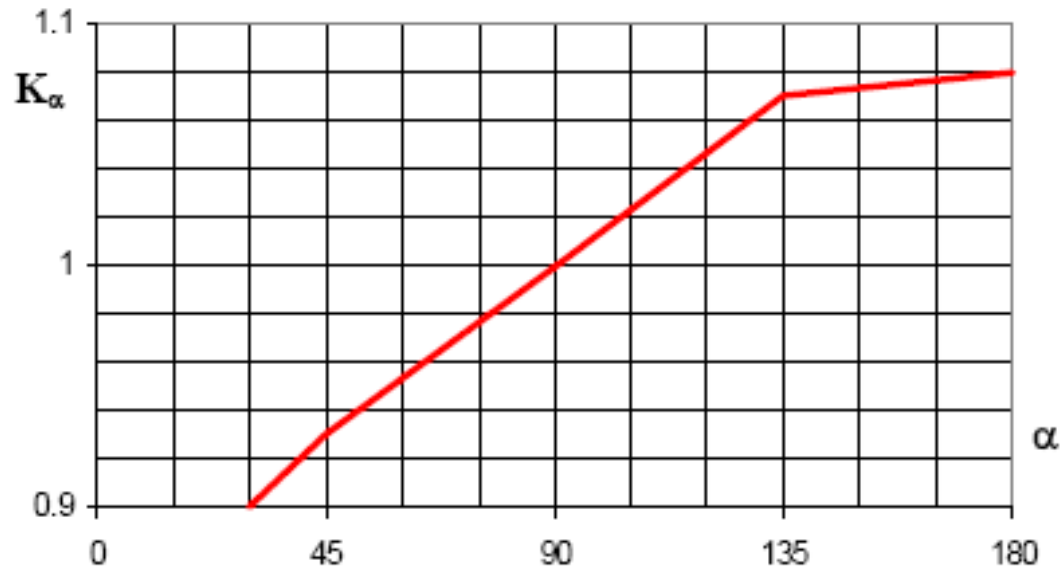
Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

El efecto del ángulo de incidencia (α) de la corriente respecto de los estribos, se tiene en cuenta multiplicando el valor de h_s calculado según el caso por K_α , valor que se puede obtener de la siguiente tabla:

α	45	90	135	180
K_α	0,93	1,00	1,07	1,08





Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

Fórmula de Artamonov:

Este criterio de cálculo permite determinar la profundidad máxima de erosión al pie de estribos y espigones de encauzamiento teniendo en cuenta la relación de contracción $Q1/Q$ ($Q1$ es el caudal interceptado por el estribo), los distintos taludes de los estribos y el ángulo de incidencia de la corriente.

Es decir:

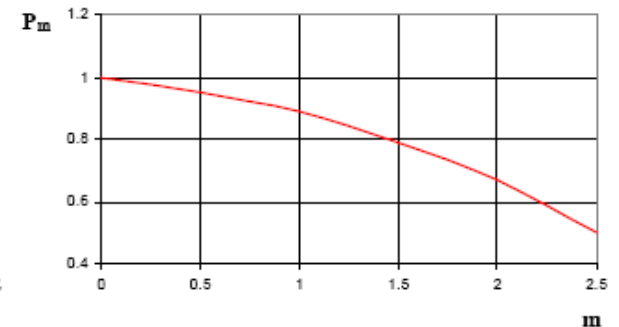
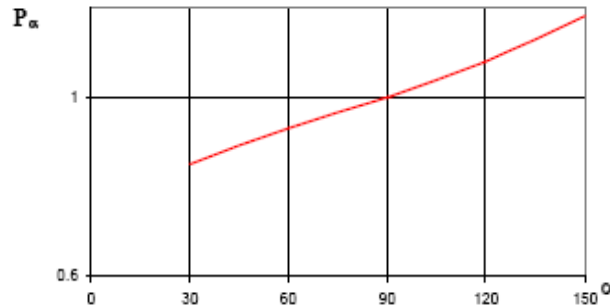
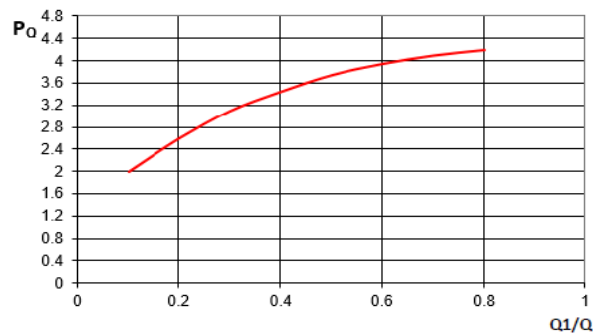
$$\frac{(h_s + h_0)}{h_0} = P_q \cdot P_m \cdot P_\alpha$$

Donde:

P_q = coeficiente que depende de $Q1/Q$

P_m = depende del talud del estribo

P_α = depende el ángulo de incidencia





Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

HEC 18: Froehlich

$$\frac{y_s}{y_a} = 2.27 K_1 K_2 \left(\frac{L'}{y_a} \right)^{0.43} Fr^{0.61} + 1$$

Donde:

K1: coeficiente de la forma del estribo (Tabla 10)

K2: coeficiente por ángulo de ataque $K_2 = (\theta/90)^{0.13}$ ($\theta < 90^\circ$ apunta aguas abajo, $\theta > 90^\circ$ apunta aguas arriba)

L': longitud del flujo interrumpida por el estribo (Figura 42)

Ae: sección en la aproximación obstruida por el estribo

Fr: número de Froude $(V_e / (g y_a)^{1/2})$

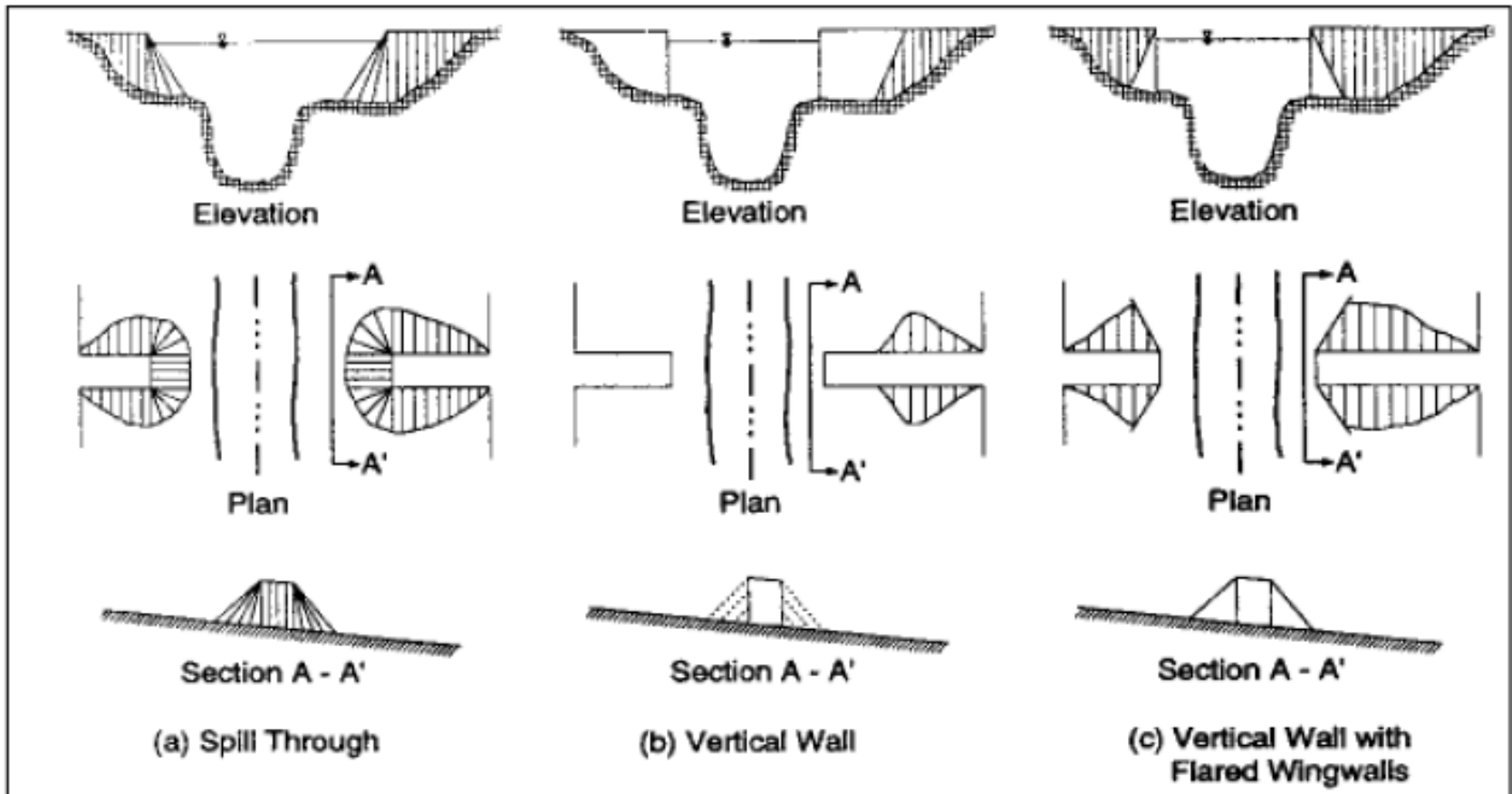
Qe: caudal obstruido por el estribo

V_e : Q_e / A_e

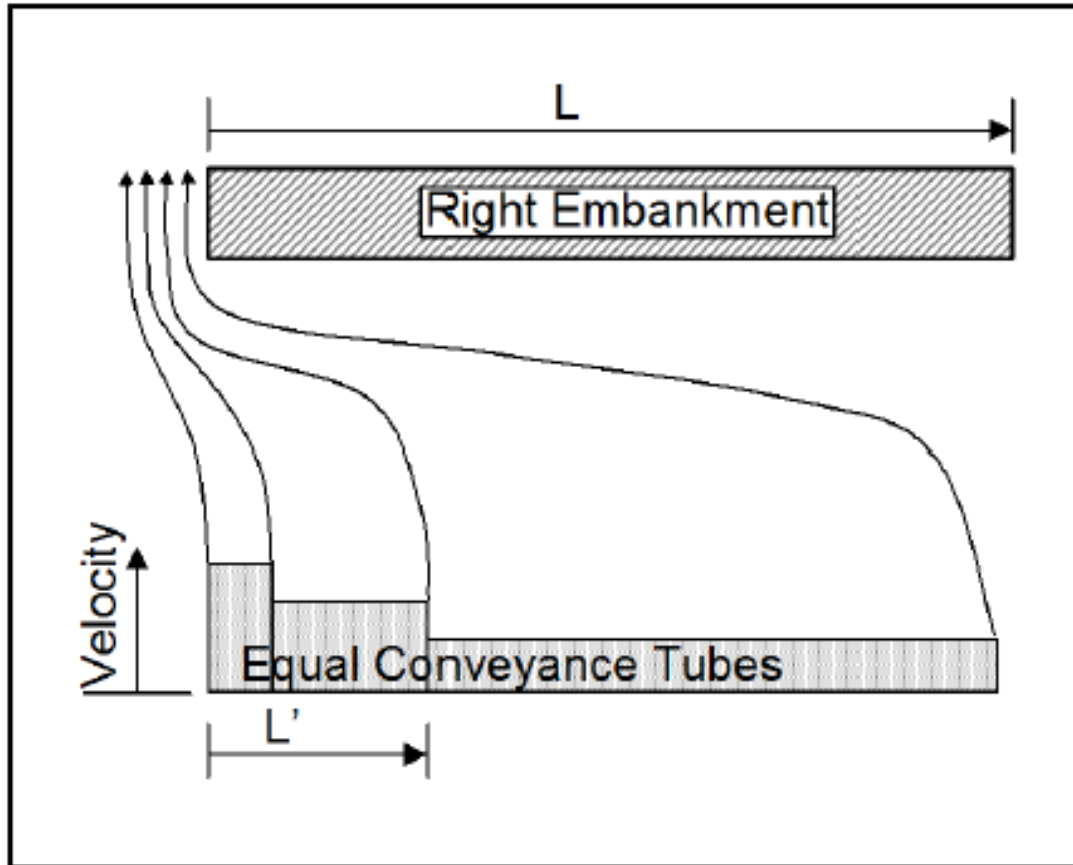
Ya: tirante promedio (A_e / L)

L: longitud del estribo normal al flujo

HEC 18: Froehlich



HEC 18: Froehlich





Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

HEC 18: HIRE

$$\frac{y_s}{y_1} = 4 Fr^{0.33} \frac{K_1}{0.55} K_2$$

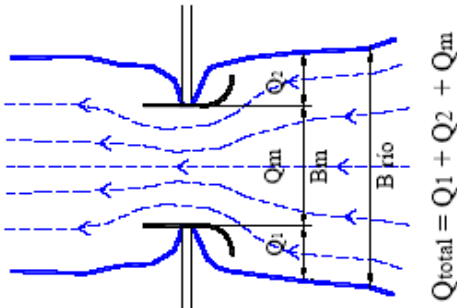
- **Y_s** = Profundidad de socavación, en pies (ft) o metros (m).
- **Y₁** = Profundidad del flujo en el estribo, ya sea sobre la planicie de inundación o en el cauce principal, en pies (ft) o metros (m).
- **Fr** = Número de Froude, calculado a partir de la velocidad y la profundidad del flujo adyacente y aguas arriba del estribo.
- **K₁** = Coeficiente de forma del estribo.
- **K₂** = Coeficiente correspondiente al ángulo de inclinación o sesgo del estribo.

PROTECCION AL PIE DE ESTRIBOS

Formas de controlar el proceso de erosión:

Impedir o modificar el cambio de dirección en la región de aguas arriba de la pila, tratando de reducir los vórtices.

Diques encauzadores



Tratar que el fondo del cauce resista la acción erosiva.

Enrocado

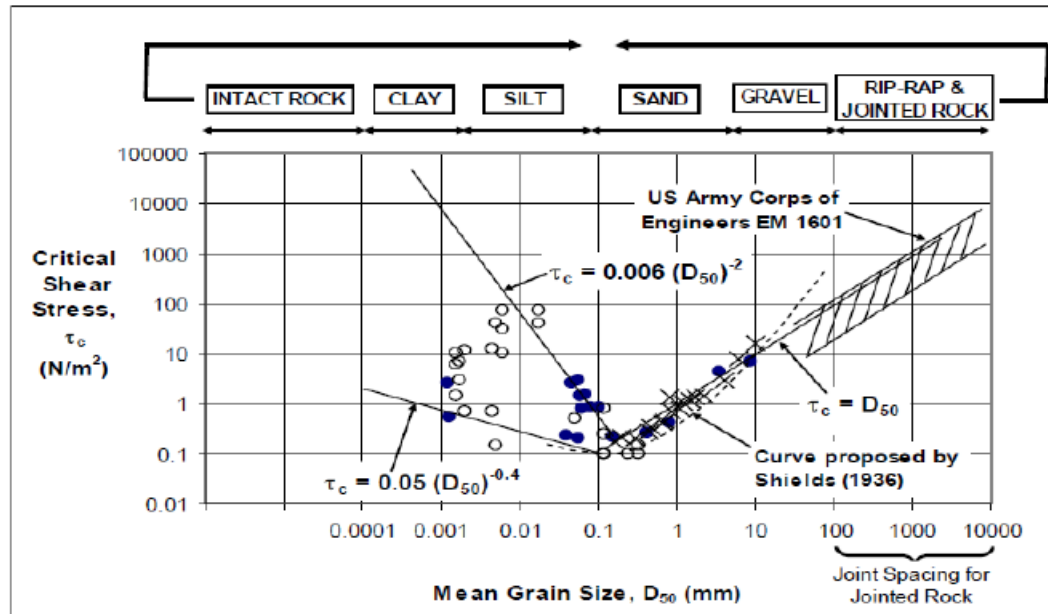
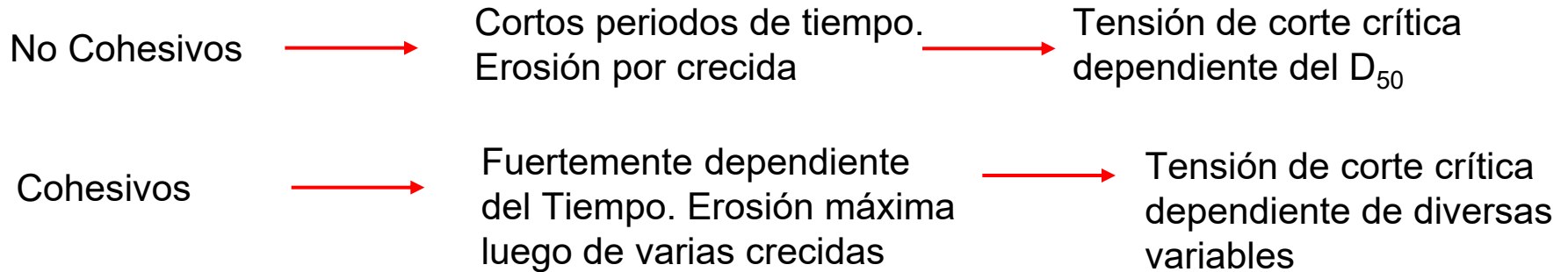


Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

Erosión en suelos Cohesivos





Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

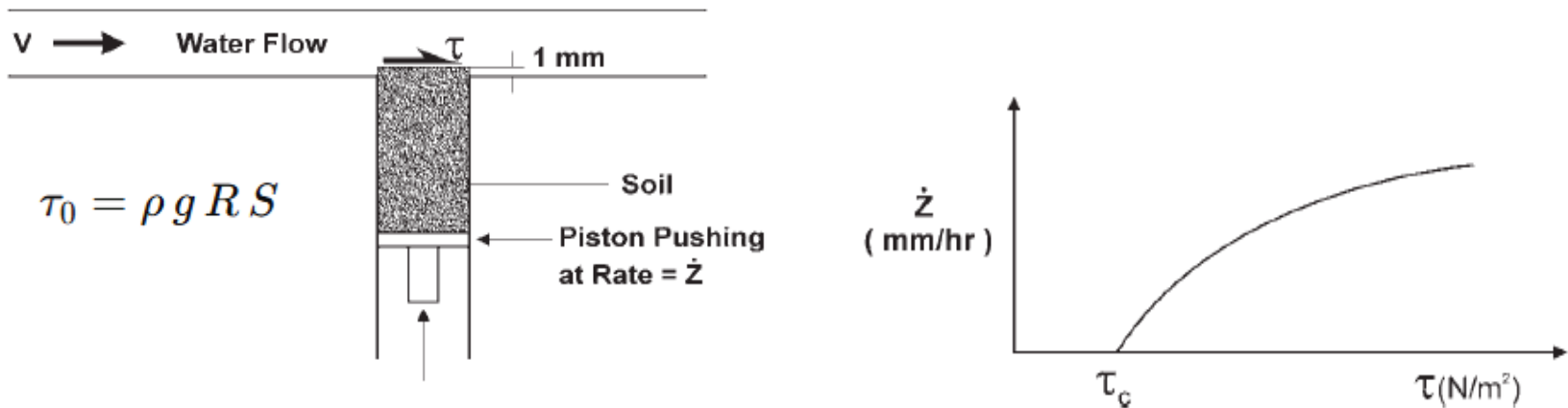
SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

Erosión en suelos Cohesivos

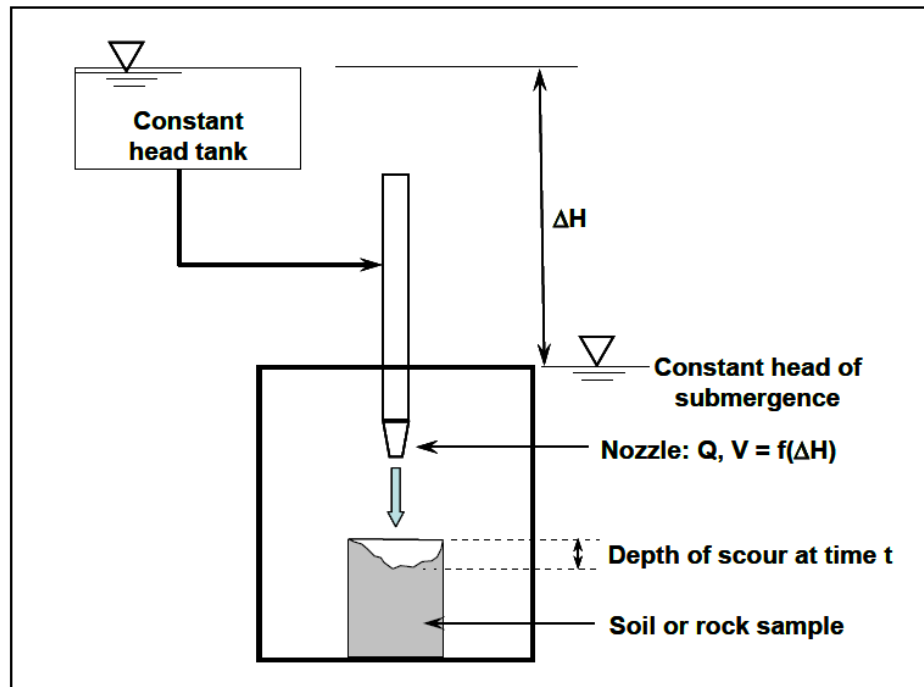
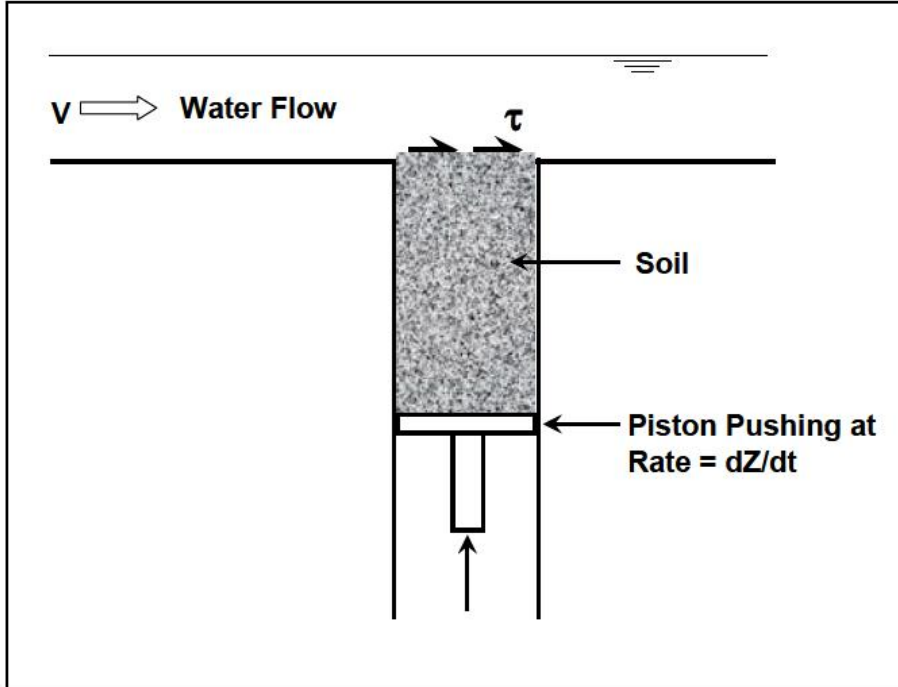
Si bien la mayoría de las fórmulas para estimación de la erosión para suelos cohesivos se basan en la tensión crítica de corte (asociada a la velocidad crítica), hoy en día no existen relaciones confiables entre los parámetros del suelo y la tensión para la cual comienza el fenómeno de erosión.

NCHRP desarrolla un método para medir la tasa de erosión en función de la tensión de corte (ejercida por el flujo en el cilindro de suelo). A su vez propone fórmulas para la determinación de la erosión por contracción y en pilas con la tasa obtenida, en función del tiempo.



Erosión en suelos Cohesivos

- Sediment erosion at depth flume (SEDflume)
- Jet erosion test (JET)
- Erosion function apparatus (EFA)
- Adjustable shear stress erosion and transport flume (ASSET)
- Hole erosion test (HET)
- Sediment erosion rate flume (SERF)





Erosión en suelos Cohesivos

Contracción



$$y_{s,u} = 0.94y_1 \left(\frac{1.83V_2}{\sqrt{gy_1}} - \frac{K_u \sqrt{\frac{\tau_c}{\rho}}}{gny_1^{1/3}} \right)$$

Pilas



$$y_{s,u} = 2.2K_1K_2a^{0.65} \left(\frac{2.6V_1 - V_c}{\sqrt{g}} \right)^{0.7}$$

$$V_c = \frac{K_u}{n} \left(\sqrt{\frac{\tau_c}{\rho g}} \right) y_1^{1/6}$$



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

NCHRP 915 – Relación entre la erodabilidad y las propiedades del suelo

•Tamaño medio de partícula (D50):

- Si $D_{50} > 0.3 \text{ mm}$ → mayor resistencia a la erosión.
- Si $D_{50} < 0.3 \text{ mm}$ → menor resistencia.
- Suelos finos, menor D50, mayor resistencia

•Coeficientes de curvatura y uniformidad (Cc, Cu):

En suelos finos, su disminución aumenta la resistencia.

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$$

•Porcentaje de arcilla:

Incrementos de arcilla aumentan la resistencia en todos los tipos de suelo.

•Índice de plasticidad (PI):

Generalmente mejora la resistencia, especialmente en suelos con $D_{50} < 0.3 \text{ mm}$, aunque hay excepciones.

•Límite plástico (PL):

Incrementos de PL aumentan la resistencia en suelos finos.



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

NCHRP 915 – Relación entre la erodabilidad y las propiedades del suelo

•Peso unitario húmedo (γ) y resistencia no drenada (S_u):

Directamente proporcionales a la resistencia en suelos finos ($D_{50} < 0.3 \text{ mm}$).

•Contenido de agua (WC):

Aumenta la resistencia en suelos finos, pero la reduce en suelos gruesos según los ensayos EFA. Su correlación con la erosión es débil.

En general, las relaciones entre propiedades geotécnicas y erodabilidad son **complejas y no lineales**.

When this Parameter Increases	Erodibility
Soil water content	*
Soil unit weight	decreases
Soil plasticity index	decreases
Soil undrained shear strength	increases
Soil void ratio	increases
Soil swell	increases
Soil mean grain size	*
Soil percent passing sieve #200	decreases
Soil clay minerals	*
Soil dispersion ratio	increases
Soil cation exchange capacity	*
Soil sodium absorption ratio	increases
Soil pH	*
Soil temperature	increases
Water temperature	increases
Water chemical composition	*
*unknown	

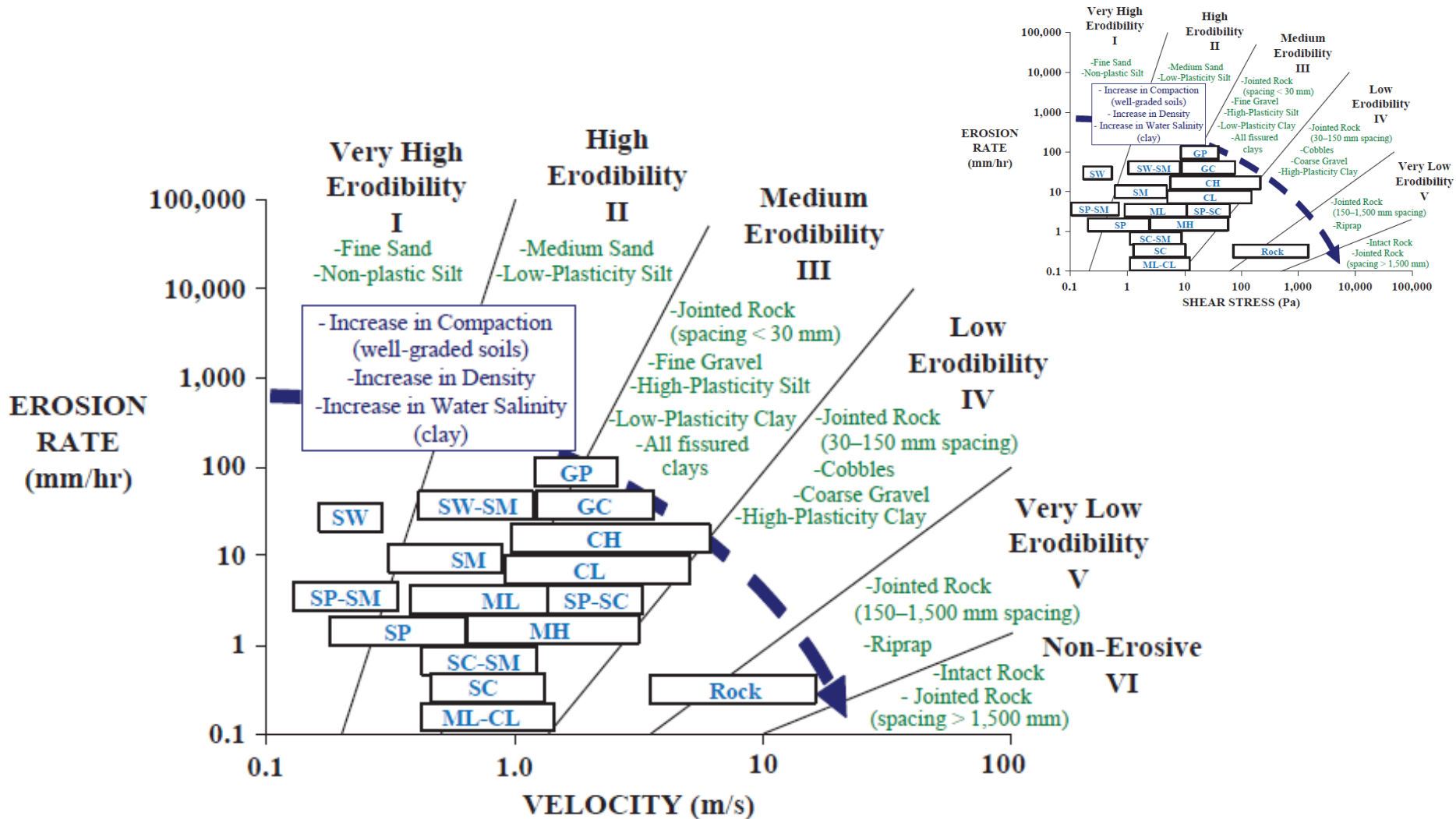


Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

NCHRP 915 – Relación entre la erodabilidad y las propiedades del suelo



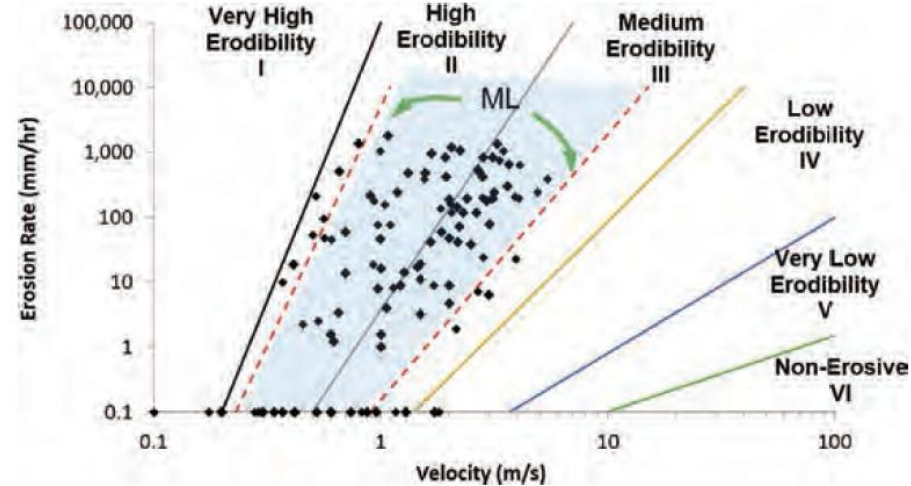
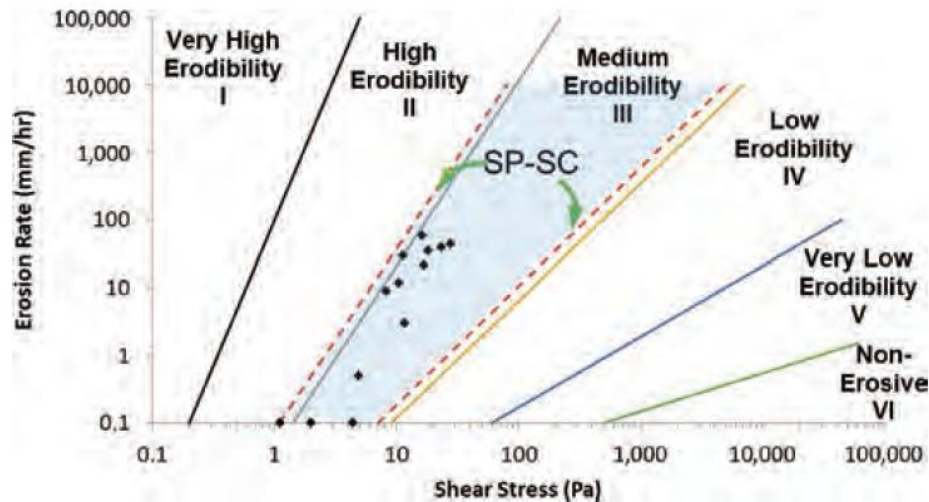
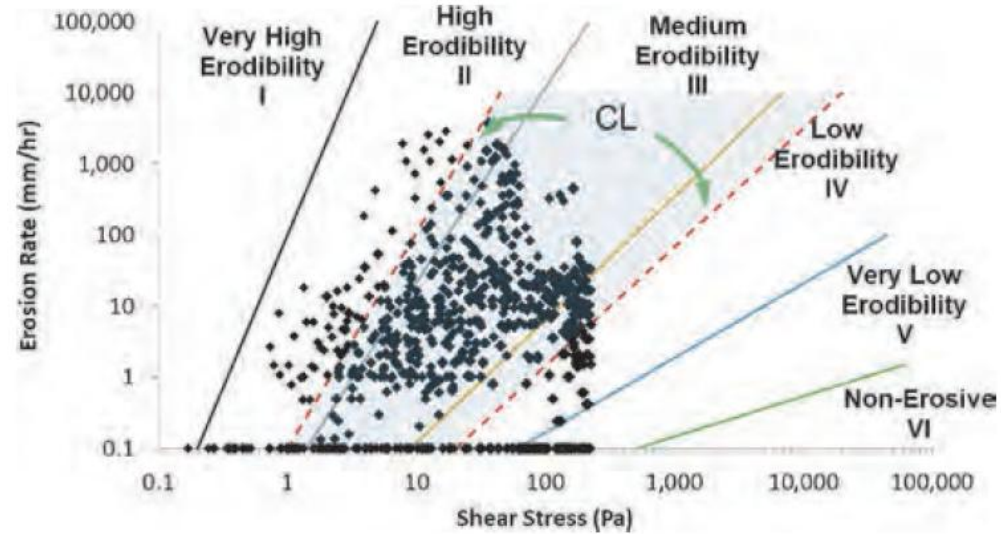


Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

USCS Categories	Number of Samples
Fat clay (CH)	63
Lean clay (CL)	131
Poorly graded gravel (GP)	7
Clayey gravel (GC)	1
High-plasticity silt (MH)	14
Low-plasticity silt (ML)	24
Low-plasticity silty clay (ML-CL)	14
Clayey sand (SC)	28
Clayey silty sand (SC-SM)	8
Silty sand (SM)	17
Poorly graded sand (SP)	16
Poorly graded sand with clay (SP-SC)	3
Poorly graded sand with silt (SP-SM)	2
Well graded sand with silt (SW-SM)	1





Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

Evaluando la erosión potencial en puentes:

CONDICIONES DE AGUAS ARRIBA

RIVERAS

ESTABLES

INESTABLES

CANAL PRINCIPAL

Claro, con buena apertura de aproximación, o meandros o lazos, para orientar el puente

Existencia de islas, barreras, basura, cercos que afecten el escurrimiento.

Agradación o degradación del lecho

Evidencias de movimiento del canal respecto del puente

Evidencias de encharcamiento del flujo

PLANICIES DE INUNDACIÓN

Evidencias significativas de flujo en las planicies

Modelo de flujo en planicies, ¿hace que el caudal sobrepase el camino o regrese al canal principal?

Existencia y adecuación hidráulica de alivio de puentes

Extensión de desarrollo de las planicies y de alguna obstrucción al flujo, en la proximidad del puente.

Evidencia de que el agua sobrepasa el camino

Basura o escombros en el canal aguas arriba

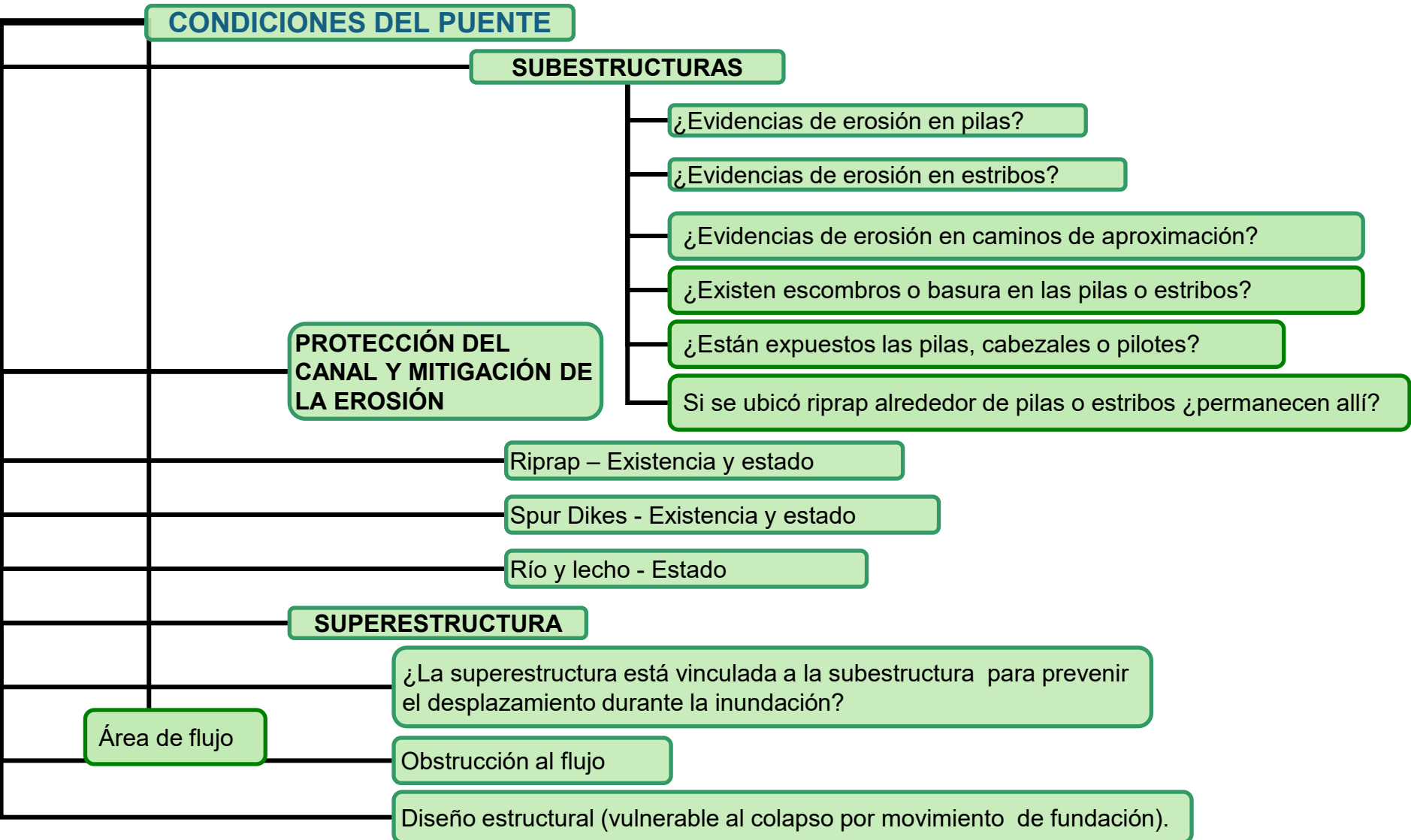
Otros factores: existencia de tributarios, diques puentes etc.



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES





Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES

CONDICIONES DE AGUAS ABAJO

RIVERAS

ESTABLES

INESTABLES

CANAL PRINCIPAL

Claro, con buenas condiciones de fuga, o meandros, lazos y otras obstrucciones.

Agradación o degradación del lecho

Evidencias de movimiento del canal respecto del puente

Evidencias de erosión del lecho extensiva

PLANICIES DE INUNDACIÓN

Claro y abierto tal que el flujo contraído en el puente regrese suavemente al plano de inundación o restringido y bloqueado por diques, árboles u otras obstrucciones.

Evidencia de erosión y socavación debido a turbulencias

Otros factores: Embalse o confluencias con grandes cursos que puedan causar tirantes de aguas abajo variables que pueden crear condiciones de flujos de alta velocidad a través del puente.



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica SEMINARIO 2025 HIDRAULICA DE PUENTES



Río en el Norte del Perú.



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica SEMINARIO 2025 HIDRAULICA DE PUENTES



Río Francolí en Tarragona (1994)



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica SEMINARIO 2025 HIDRAULICA DE PUENTES



Río Mapocho en Santiago de Chile (Foto Luis Ayala).



Escuela de Graduados de Ingeniería Hidráulica

SEMINARIO 2025

HIDRAULICA DE PUENTES



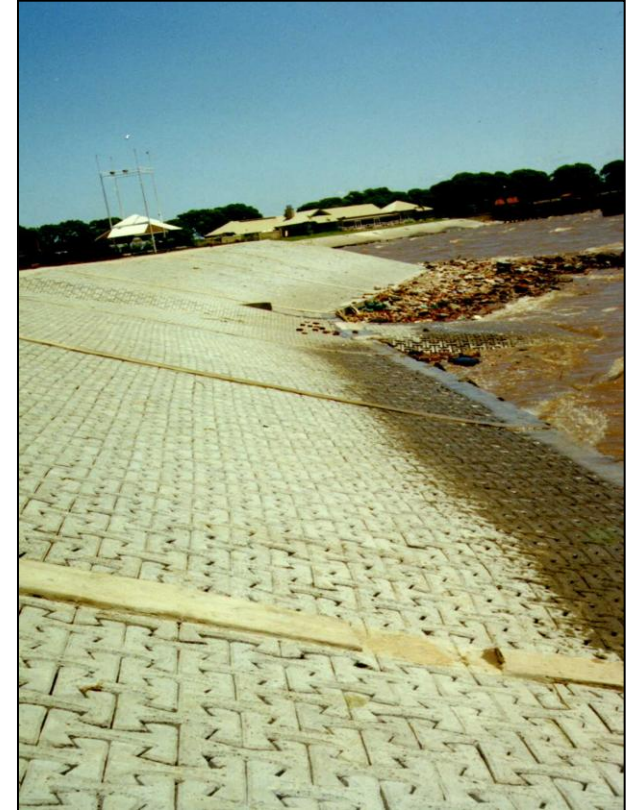
Río Segre en Balaguer



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

BIBLIOGRAFÍA:

- "Erosión Local alrededor de Pilas de Puente" - Ing. Raúl Antonio LOPARDO - Abril de 1982.
- "Control de la Erosión Fluvial en Puentes" - Textos de la Dirección General de Carreteras - Ing. José Ramón TÉMEZ PELÁEZ - Septiembre de 1988.
- "Control de Erosión y Sedimentos (En Obras de Ingeniería y Ambiente) -Erosión General y Protección de Márgenes" - Mario I. SCHREIDER - Noviembre de 1994.
- "Erosion Control"- Journal for Erosion & Sediment Control Professionals.
- Federal Highway – HEC 18
- NCHRP 915 - Relationship Between Erodibility