



UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES  
FACULTAD DE INGENIERÍA

**DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA  
CÁTEDRA DE CONSTRUCCIONES HIDRÁULICAS**

***HIDRÁULICA DE PUENTES***



***Ing. Adolfo GUILTELMAN***

**2025**

**Índice**

CAPÍTULO 0.	INTRODUCCIÓN .....	4
CAPÍTULO 1.	CÁLCULO DEL REMANSO .....	11
CAPÍTULO 2.	DIFERENCIA DE NIVEL A TRAVÉS DEL TERRAPLÉN .....	19
CAPÍTULO 3.	CONFIGURACIÓN DEL REMANSO.....	20
CAPÍTULO 4.	PUENTES DOBLES .....	24
CAPÍTULO 5.	CONDICIONES ANORMALES DE RELACIÓN CAUDAL–NIVEL.....	26
CAPÍTULO 6.	BIBLIOGRAFÍA.....	30

## Tabla de Ilustraciones

ILUSTRACIÓN 1 - LÍNEAS DE FLUJO PARA CRUCE NORMAL TÍPICO .....	6
ILUSTRACIÓN 2 - MODELO EN 2D .....	7
ILUSTRACIÓN 3 - ÁBACO ESTIMACIÓN $A_2$ .....	9
ILUSTRACIÓN 4 - TIPOS DE FLUJO .....	10
ILUSTRACIÓN 5 – CURVAS DE REMANSO EN CRUCE NORMAL AL PUENTE.....	11
ILUSTRACIÓN 6 – ÁBACO DE COEFICIENTE DE REMANSO SEGÚN TIPO DE ESTRIBO.....	14
ILUSTRACIÓN 7 - ÁBACO PARA OBTENER $\Delta K$ Y $\sigma$ .....	15
ILUSTRACIÓN 8 - ESKEMA DE CRUCES INCLINADOS.....	16
ILUSTRACIÓN 9 - ÁBACO PARA OBTENCIÓN DE $\Delta K_e$ .....	16
ILUSTRACIÓN 10 – CRUCES SESGADOS .....	17
ILUSTRACIÓN 11 - ÁBACO PARA OBTENCIÓN DE $\Delta K_s$ .....	18
ILUSTRACIÓN 12 – ÁBACO DE LA RELACIÓN DE NIVELES DIFERENCIALES DE AGUA .....	19
ILUSTRACIÓN 13 – ÁBACO PARA DISTANCIA AL PUNTO DE MÁXIMO RESALTO .....	20
ILUSTRACIÓN 14 – COEFICIENTE DE REMANSO PARA FLUJO TIPO II .....	21
ILUSTRACIÓN 15 - IMPORTANCIA DE CONSIDERAR LAS DIMENSIONES PROYECTADAS AL FLUJO.....	22
ILUSTRACIÓN 16 - SOCAVACIÓN POR CONTRACCIÓN VERTICAL .....	23
ILUSTRACIÓN 17 - FACTOR DE MULTIPLICACIÓN DE REMANSO PARA PUENTES DUALES.....	24
ILUSTRACIÓN 18 - FACTOR DE MULTIPLICACIÓN DE NIVEL DIFERENCIAL PARA PUENTES DUALES .....	26
ILUSTRACIÓN 19 - REMANSO CON CONDICIÓN DE DESCARGA DE NIVEL ANORMAL .....	28

## **Capítulo 0. Introducción**

La hidráulica de puentes se refiere al estudio del comportamiento del agua alrededor y a través de las estructuras de los puentes, con el objetivo de garantizar la seguridad y eficiencia de estas estructuras frente a las condiciones hidrológicas y de flujo. Se centra en el análisis de caudales, el diseño de estructuras de drenaje y la selección de medidas para proteger al puente contra posibles daños causados por el agua.

### Conceptos importantes en Hidráulica de Puentes:

- **Caudal**

Es la cantidad de agua que fluye a través de una sección transversal en un determinado periodo de tiempo. En el diseño de puentes, es crucial determinar el caudal máximo probable para diseñar una estructura que pueda conducir esa cantidad de agua sin causar inundaciones o daños.

- **Contracción del flujo**

Se refiere a la reducción del área transversal del flujo de agua al pasar por el puente, especialmente en la zona de los pilares y/o estribos. Esta contracción puede causar un aumento en la velocidad del agua y, por lo tanto, un aumento en la erosión del lecho.

- **Remanso**

Se refiere al aumento del nivel del agua aguas arriba del puente debido a la obstrucción parcial o total del flujo causada por la estructura del puente. Un remanso excesivo puede causar inundaciones y daños aguas arriba del puente.

- **Socavación**

Es la erosión del lecho del río alrededor de los pilares y estribos del puente debido al flujo de agua. La socavación puede debilitar la cimentación del puente y en casos extremos, causar su colapso.

- **Estudios hidrológicos e hidráulicos**

Son análisis que se realizan para determinar los caudales máximos, niveles de agua, velocidades del flujo y otros parámetros hidráulicos relevantes para el diseño de un puente. Estos estudios son fundamentales para garantizar que el puente sea seguro y eficiente desde el punto de vista hidráulico.

## HIDRÁULICA DE PUENTES – DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA

- Diseño hidráulico

Implica la selección de la ubicación adecuada del puente, el tamaño y la forma de los pilares y estribos, la altura libre sobre el nivel del agua, la protección contra socavación y otras medidas para poder asegurar que el puente funcione correctamente bajo diferentes condiciones de flujo.

Consideraciones importantes en el Diseño de Hidráulica de Puentes:

- Capacidad hidráulica

El puente debe ser capaz de manejar el caudal máximo esperado sin causar remanso excesivo ni velocidades peligrosas.

- Estabilidad de pilares y estribos

Se deben tomar las medidas necesarias para proteger los pilares y estribos contra la socavación y otros tipos de erosión.

- Medidas de protección

Se pueden utilizar diferentes tipos de protección como enrocados, gaviones, muros de contención, entre otros, para proteger las estructuras del puente y los terraplenes de acceso a él.

- Consideraciones ambientales

El diseño del puente también debe considerar el impacto ambiental en el río, y su entorno, como la fauna acuática y la calidad del agua.

En resumen, la HIDRAULICA DE PUENTES, es un campo complejo que requiere conocimiento profundo de la hidrología, la mecánica de los fluidos y los principios de ingeniería estructural.

Un diseño hidráulico adecuado es esencial para garantizar la seguridad y durabilidad de los puentes y además minimizar el impacto ambiental.

Efectos de la contracción del flujo en Puentes:

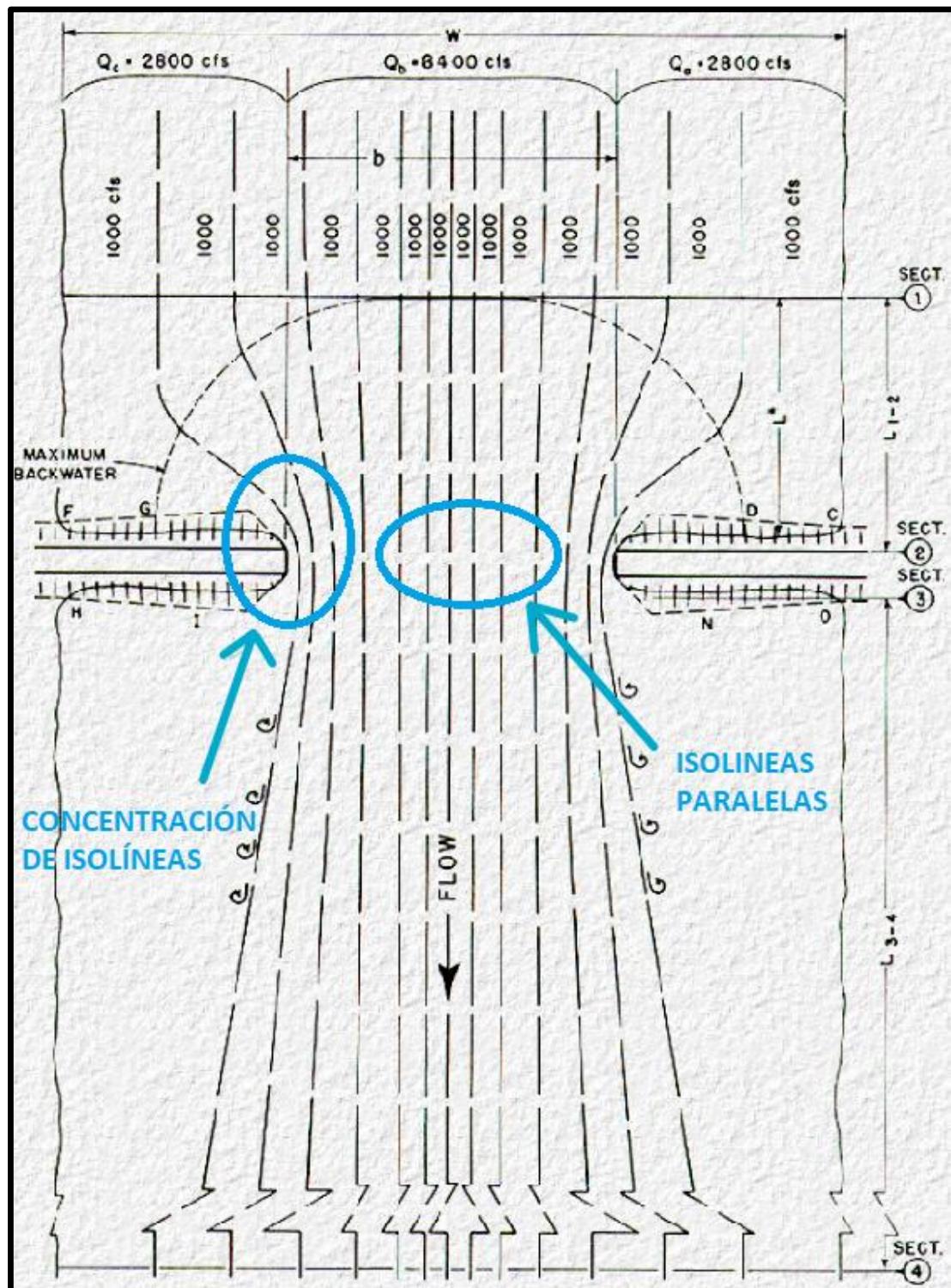


Ilustración 1 - Líneas de flujo para cruce normal típico

## HIDRÁULICA DE PUENTES – DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA

La contracción del flujo causa una pérdida de energía. La mayor parte de esta ocurría en la re-expansión aguas abajo del puente.

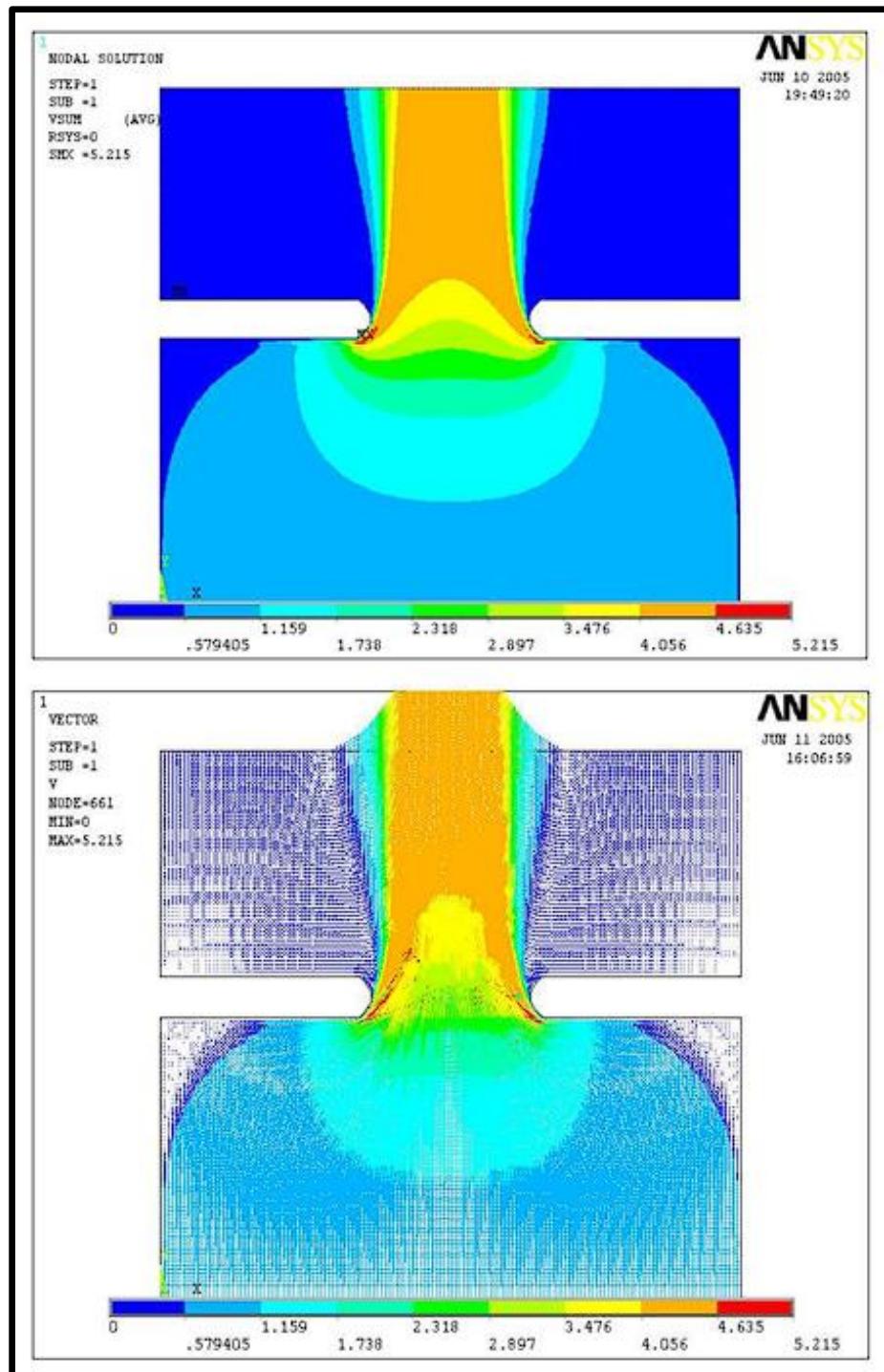


Ilustración 2 - Modelo en 2D

## **TRANSPORTE:**

Por ecuación de Chezy-Manning:

$$q = \frac{1}{n} \cdot A \cdot R^{2/3} \cdot S_0^{1/2}$$

Siendo:

- $n$  → Coeficiente de Manning
- $A$  → Sección del canal
- $R$  → Radio hidráulico
- $S_0$  → Pendiente del canal

Si se analiza el caso de pendiente constante, entonces, es válida la siguiente expresión:

$$K = \frac{1}{n} \cdot A \cdot R^{2/3}$$

## **RELACIÓN DE APERTURA DEL PUENTE:** (Utilizada para los gráficos y tablas)

La sección irregular en cursos naturales y la variación de la rugosidad, resulta en una variación en la velocidad en la sección transversal del río:

- Expresada en función de *caudales*:

$$M = \frac{Q_b}{Q_a + Q_b + Q_c} = \frac{Q_b}{Q}$$

Siendo los caudales de cada subsección de la primer figura

- Expresada en función de *relaciones de transporte*, asumiendo que todas las subsecciones tienen la misma pendiente:

$$M = \frac{K_b}{K_a + K_b + K_c} = \frac{K_b}{K}$$

**COEFICIENTE DE ENERGÍA CINÉTICA ( $\alpha$ ):**

$$\alpha_1 = \frac{\sum (q \cdot V^2)}{Q \cdot V_1^2} \quad \text{con} \quad \frac{V_1^2}{2g} = \left( \frac{Q}{A_1} \right)^2 \cdot \frac{1}{2g}$$

En la sección de la contracción, el coeficiente de energía cinética se puede calcular con una expresión similar o bien, se estima a partir de la siguiente tabla, entrando con  $M$  y con  $\alpha_1$ :

$$\alpha_2 = \frac{\sum (q \cdot V^2)}{Q \cdot V_2^2}$$

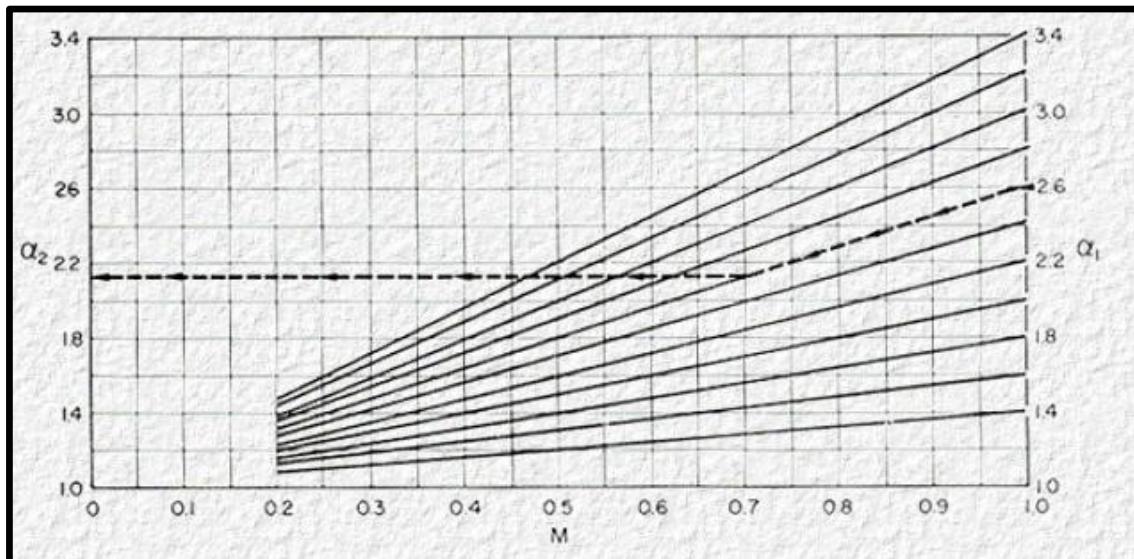


Ilustración 3 - Ábaco estimación  $\alpha_2$

## TIPOS DE FLUJO:

En la siguiente ilustración se puede observar un corte del canal y el puente y los distintos tipos de flujos que se pueden dar:

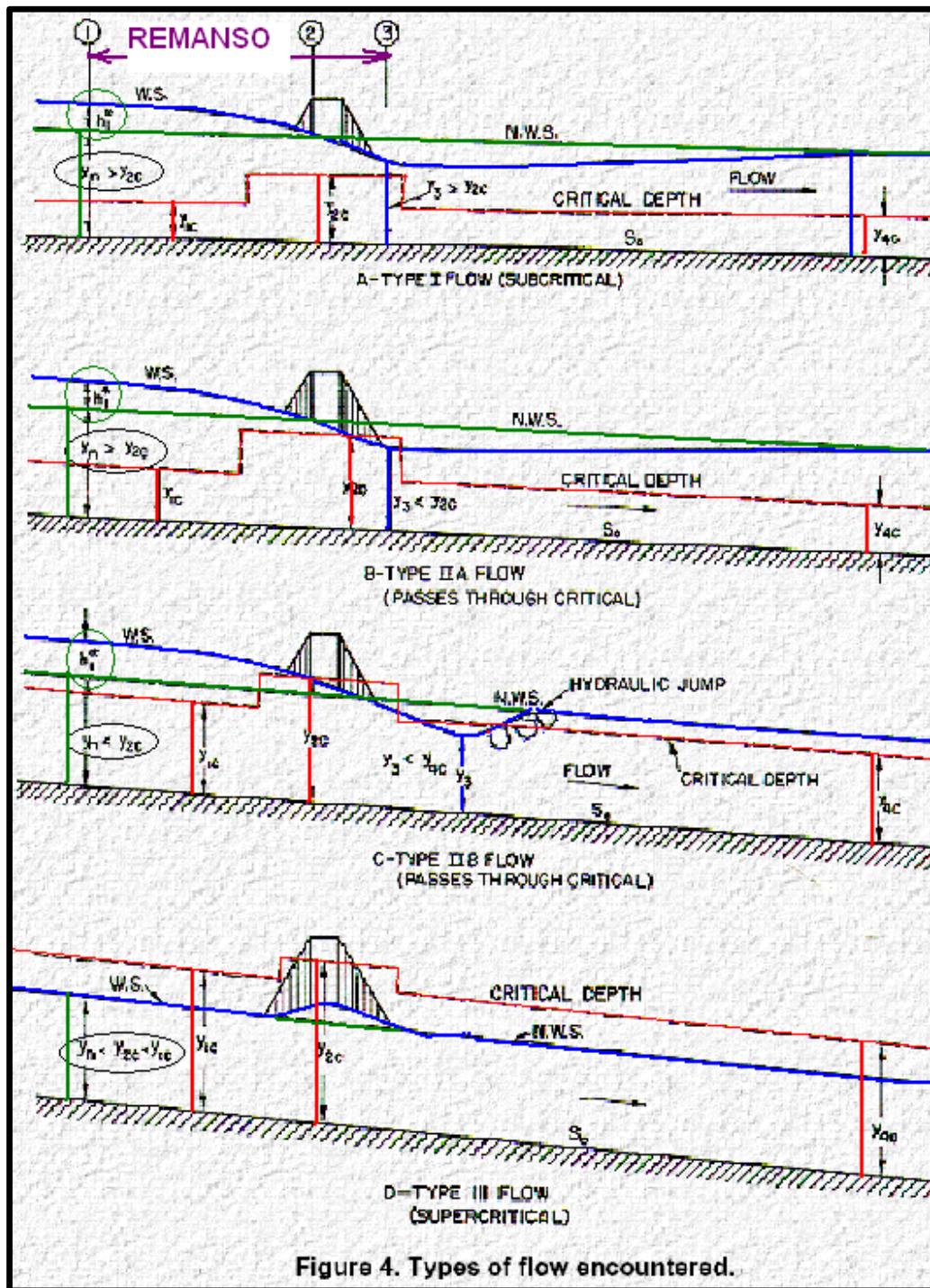


Ilustración 4 - Tipos de Flujo

## Capítulo 1. Cálculo del Remanso

### ECUACIÓN DE ENERGÍA Y DETERMINACIÓN DE $h_1^*$ :

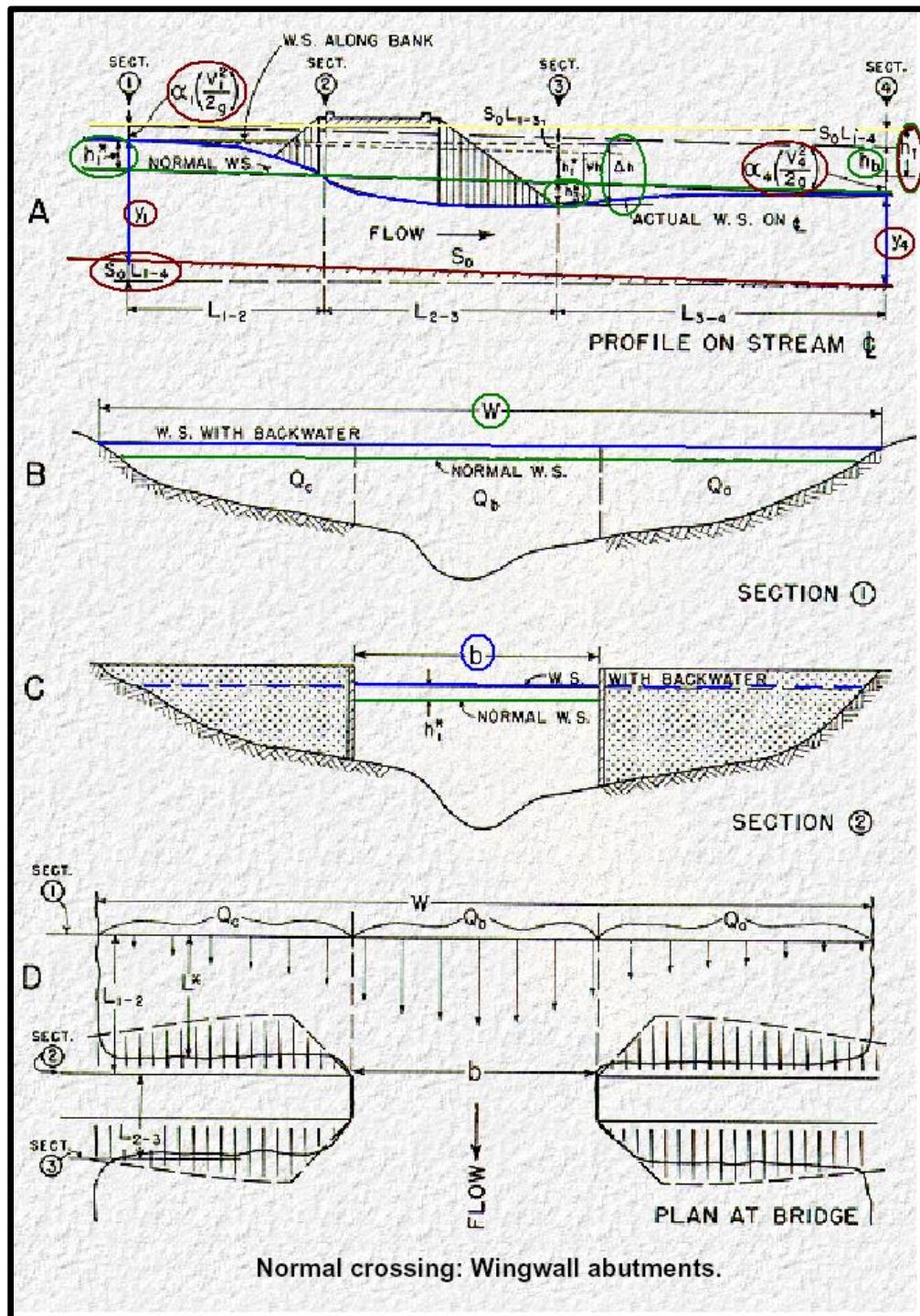


Ilustración 5 – Curvas de Remanso en cruce normal al puente

**HIPÓTESIS:**

Se asumen las siguientes hipótesis:

- Canal recto
- Área transversal uniforme
- Pendiente de fondo aproximadamente constantes entre las secciones 1 y 4.
- El flujo está libre de contracciones y expansiones.
- No hay erosión apreciable en el lecho de la contracción.
- Flujo sub-critico (Flujo tipo I)

Igualando energías entre las secciones 1 y 4:

$$S_0 \cdot L_{1-4} + y_1 + \frac{\alpha_1 \cdot V_1^2}{2g} = y_4 + \frac{\alpha_4 \cdot V_4^2}{2g} + h_T$$

Siendo  $h_T$  la pérdida total de energía entre las secciones 1 y 4

$$y_1 - y_4 = \frac{\alpha_4 \cdot V_4^2}{2g} - \frac{\alpha_1 \cdot V_1^2}{2g} + h_T - S_0 \cdot L_{1-4}$$

Reemplazando:

$$h_1^* = \frac{\alpha_4 \cdot V_4^2}{2g} - \frac{\alpha_1 \cdot V_1^2}{2g} + h_b$$

Las pérdidas pueden expresarse como producto de un coeficiente de pérdida,  $K^*$  y la altura de velocidad en la sección 2:

$$h_b = K^* \cdot \frac{\alpha_2 \cdot V_{n2}^2}{2g}$$

Siendo  $V_{n2}$  la velocidad media en la sección contraída, para el nivel de agua normal, antes de construido el puente.

Reemplazando se obtiene:

$$h_1^* = \left[ \frac{\alpha_4 \cdot V_4^2}{2g} - \frac{\alpha_1 \cdot V_1^2}{2g} \right] + K^* \cdot \frac{\alpha_2 \cdot V_{n2}^2}{2g}$$

Asumiendo que las secciones transversales en 1 y 4 son iguales, resulta que  $\alpha_4 = \alpha_1$  por lo que el mismo sale como factor común.

Ademas, por condición de continuidad, se cumple que:

$$A_1 \cdot V_1 = A_4 \cdot V_4 = A_{n2} \cdot V_{n2}$$

Las velocidades son proporcionales a las áreas, por lo que, operando, puede expresarse:

$$h_1^* = \left[ \left( \frac{A_{n2}}{A_4} \right)^2 - \left( \frac{A_{n2}}{A_1} \right)^2 \right] \cdot \alpha_1 \cdot \frac{V_{n2}^2}{2g} + K^* \cdot \alpha_2 \cdot \frac{V_{n2}^2}{2g}$$

Representa la diferencia de energía cinética entre la sección 1 y 4

Las variables que intervienen en la última expresión son:

- $h_1^*$  → Remanso total
- $K^*$  → Coeficiente de pérdidas totales en el remanso
- $\alpha_1$  → Coeficiente de corrección de altura de velocidad en las secciones 1 y 4
- $\alpha_2$  → Coeficiente de corrección de altura de velocidad en la contracción
- $A_{n2}$  → Área mojada en la contracción con tirante normal
- $V_{n2}$  → Velocidad media en la contracción con tirante normal
- $A_4$  → Área mojada en la sección 4 (Luego de restablecido de régimen normal)
- $A_1$  → Área mojada en la sección 1 (con la contracción)

Luego, hallar el remanso total “ $h_1^*$ ”, resulta un **PROCESO ITERATIVO**:

1. Se estima  $h_1^*$  a partir de la siguiente expresión:  $h_1^* \cong K^* \cdot \frac{\alpha_2 \cdot V_{n2}^2}{2g}$
2. Se determina  $A_1$  como:  $A_1 = f(h_1^*)$
3. Luego se calcula  $h_1^*$  a partir de:  $h_1^* = \left[ \left( \frac{A_{n2}}{A_4} \right)^2 - \left( \frac{A_{n2}}{A_1} \right)^2 \right] \cdot \alpha_1 \cdot \frac{V_{n2}^2}{2g} + K^* \cdot \alpha_2 \cdot \frac{V_{n2}^2}{2g}$
4. Finalmente, se compara con el “ $h_1^*$ ” estimado en el paso 1.

Ahora, el coeficiente de pérdidas totales del remanso “ $K^*$ ”, se obtiene de la siguiente expresión:

$$K^* = K_b + \Delta K_p + \Delta K_e + \Delta K_s$$

El valor total del coeficiente  $K^*$ , también se ve afectado por:

- Número, tamaño, forma y orientación de pilas en la contracción.
- Excentricidad o posición asimétrica del puente con respecto a la sección transversal.
- Inclinación o ángulo entre el eje del camino y el eje del canal.

A continuación, se desarrolla cada uno de los términos mencionados en la expresión anterior.

➤ El primer parámetro “ $K_b$ ”, tiene en cuenta la presencia de los **ESTRIBOS** del puente:

Este coeficiente se obtiene a partir de la relación de apertura “ $M$ ”, utilizando el siguiente ábaco:

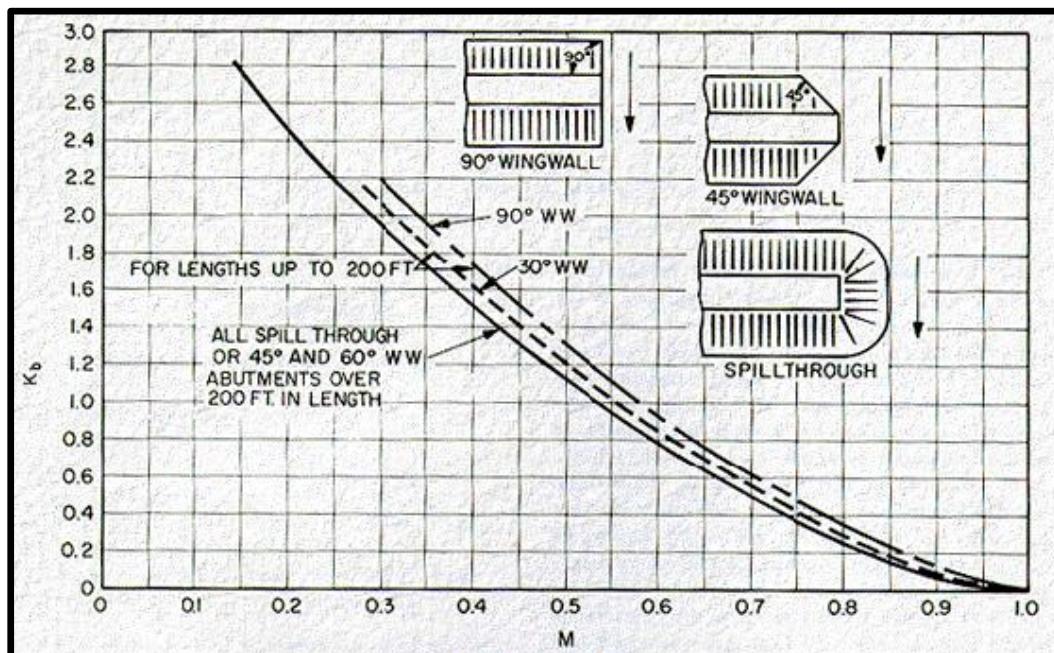


Ilustración 6 – Ábaco de Coeficiente de remanso según tipo de Estribo

Como se puede notar en la ilustración anterior, a menor  $M$ , mayor es el coeficiente de pérdidas en el remanso, lo que indica que aumenta la contracción.

Para puentes de longitud mayor a 60 m, independientemente de la forma del estribo, se utiliza la curva más baja, porque la geometría del estribo tiene menos importancia cuando la luz del puente aumenta.

➤ El siguiente parámetro a definir es aquel que tiene en cuenta el **EFFECTO DE LAS PILAS**:  $\Delta K_p$

Este parámetro depende principalmente de:

- La relación entre el área de las pilas y el área de apertura del puente:

$$J = \frac{A_p}{A_{n2}}$$

- El tipo de pilas.
- El valor de la relación de apertura (M).
- La angularidad de las pilas con la dirección del flujo.

El mismo se obtiene a partir de la siguiente expresión:  $\Delta K_p = \sigma \cdot \Delta K$ , siendo:

“ $\sigma$ ” un coeficiente de corrección según sea la relación de apertura M → Ábaco (B)

“ $\Delta K$ ” → Ábaco (A)

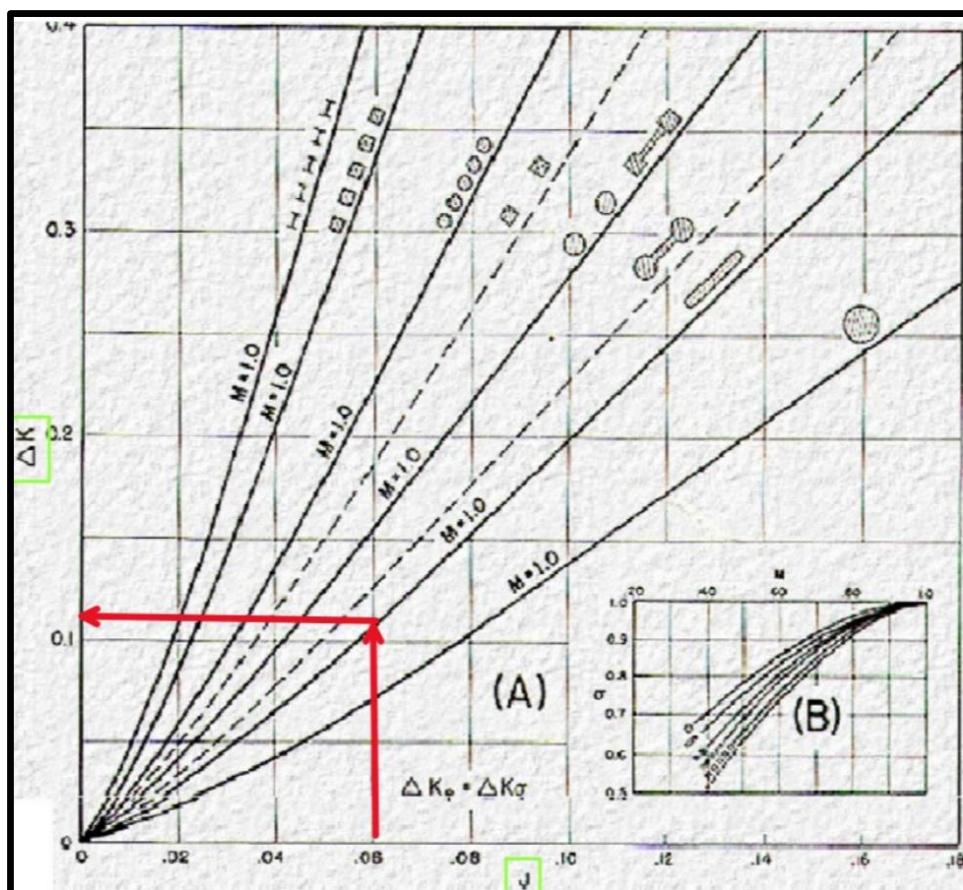


Ilustración 7 - Ábaco para obtener  $\Delta K$  y  $\sigma$

Observar que las distintas curvas indican los distintos tipos de pilas que pueden tenerse.

Para cruces que son inclinados, se utilizan los mismos gráficos y se varía el cálculo de  $J$ ,  $\Delta_{n2}$  y  $M$ .

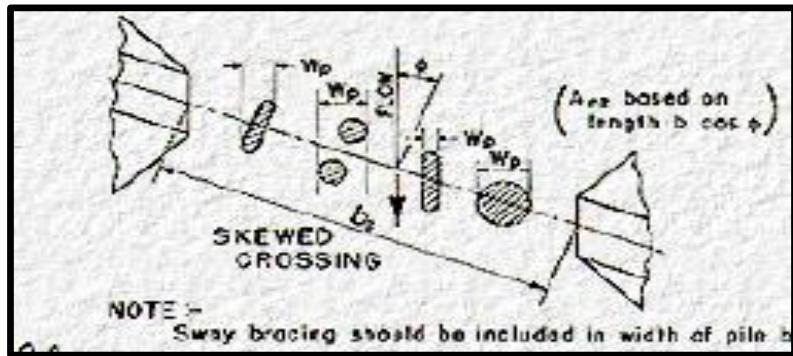


Ilustración 8 - Esquema de cruces inclinados

- El término que corresponde a “ $\Delta K_e$ ”, tiene en cuenta el **EFFECTO DE EXCENTRICIDAD**

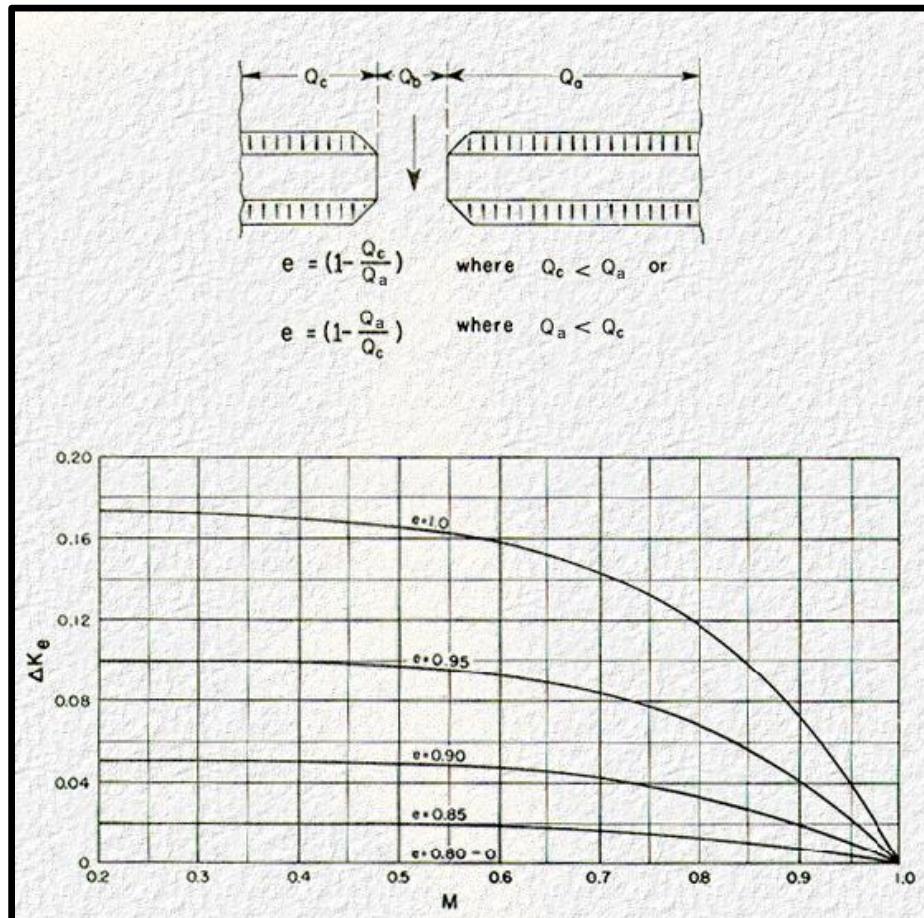


Ilustración 9 - Ábaco para obtención de  $\Delta K_e$

- El término que corresponde a “ $\Delta K_s$ ”, tiene en cuenta el **EFFECTO DE LA INCLINACIÓN**:

Respecto del cruce normal, se modifican los valores de  $M$ ,  $A_{n2}$  y  $V_{n2} = f(A_{n2})$ .

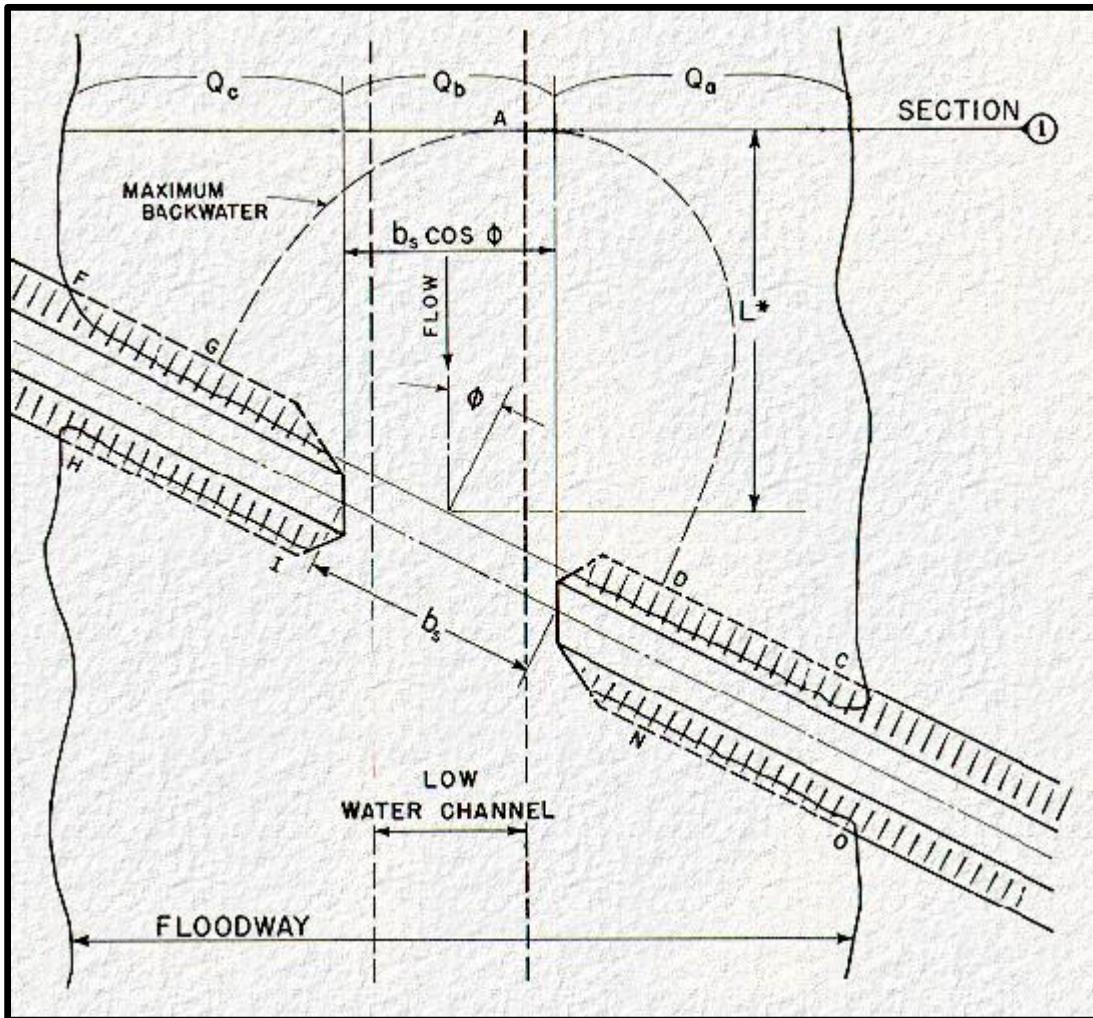


Ilustración 10 – Cruces Sesgados

El ábaco para su obtención se muestra en la ilustración 11.

Este tiene en cuenta el ángulo de incidencia con respecto al eje del puente ( $\Phi$ ). Cada una de las curvas, corresponde a un ángulo diferente, siendo la curva de  $\Phi = 0^\circ$ , la que da un valor de  $\Delta K_s$  nulo.

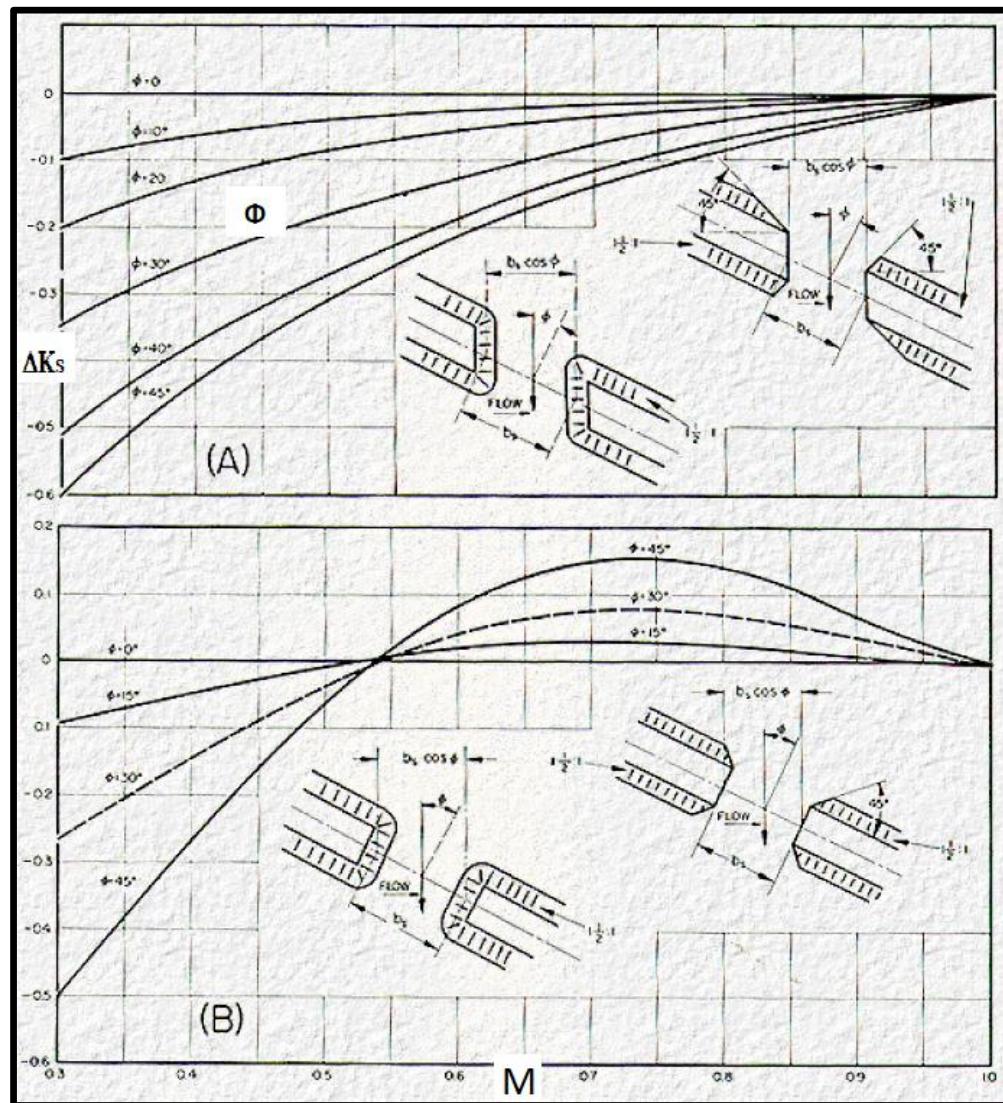


Ilustración 11 - Ábaco para obtención de  $\Delta K_s$

Como se observa en el ábaco anterior,  $\Delta K_s$  puede ser positivo o negativo, según como sea la inclinación y la relación de apertura.

El cruce inclinado con ángulos hasta  $20^\circ$  produce resultados objetables para cualquier tipo de estribos para ángulos mayores, la concentración del flujo en los estribos produce remolinos, reduciendo la eficiencia del canal e incrementando las posibilidades de erosión.

Luego la diferencia entre el ábaco (A) del ábaco (B) tienen en cuenta la dirección de los estribos con respecto al cauce del río y el eje del puente.

La longitud H-I y N-O puede definirse arbitrariamente o un valor no mayor a 2 luces del puente.

## Capítulo 2. Diferencia de nivel a través del terraplén

### DETERMINACIÓN DE $h_3^*$ :

Partiendo de un dato fácilmente mesurable ( $\Delta h$ ), se puede trazar la curva de remanso:

La diferencia en la elevación de la superficie del agua entre aguas arriba y aguas abajo del puente en la proximidad de los estribos  $\Delta h$ , no es el remanso provocado por el puente.

Puede definirse el nuevo nivel de agua, conociendo  $h_3^*$ . La estimación es válida siempre que el perfil no ascienda por estancamiento desde aguas abajo o por planicies de inundación restringido.

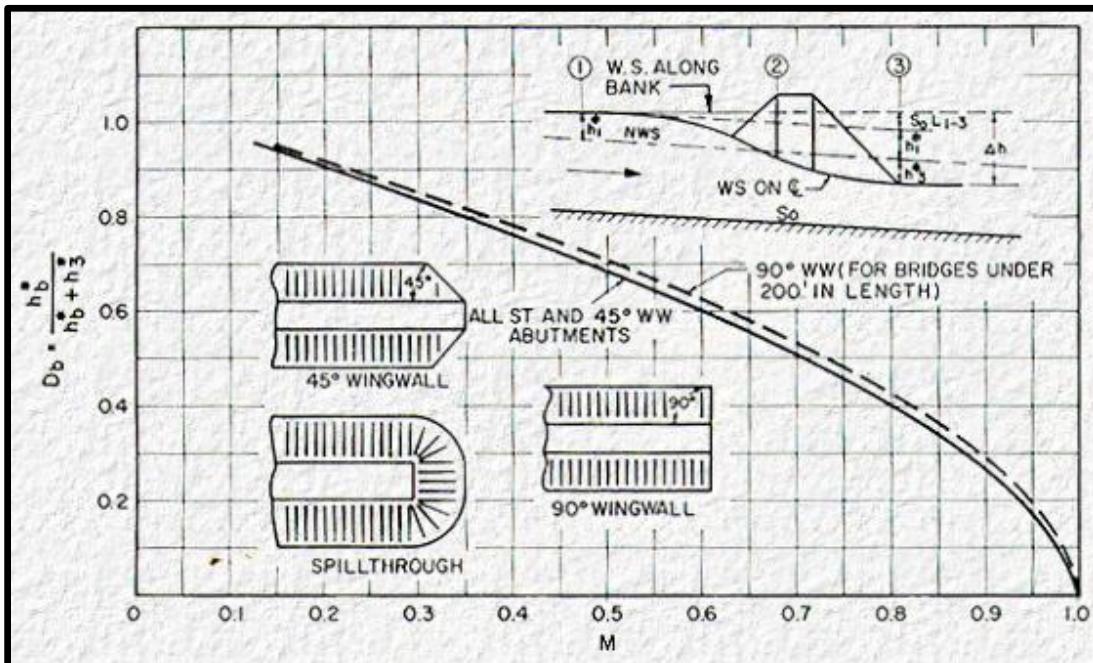


Ilustración 12 – Ábaco de la relación de niveles diferenciales de agua

$$h_3^* = h_b^* \cdot \left( \frac{1}{D_b} - 1 \right) \quad ; \quad h_b^* = K_b \cdot \frac{\alpha_2 \cdot V_{n2}^2}{2 \cdot g}$$

Existen correcciones por efecto de pila y de excentricidad. (De tablas en forma similar a lo explicado).

**DIFERENCIA DE NIVEL EN LA SUPERFICIE DEL AGUA A TRAVÉS DEL PUENTE:**

Habiendo calculado el tirante  $h_3^*$ , según lo detallado y conociendo el remanso total  $h_1^*$  calculado en el anterior capítulo, se puede obtener la diferencia en la elevación de la superficie del agua a lo largo del terraplén como:

$$\Delta h = h_3^* + h_1^* + S_o \cdot L_{1-3}$$

Siendo  $S_o$  la pendiente del canal, y  $L_{1-3}$ , la longitud entre las secciones correspondientes. Para ello, primero se debe obtener esta longitud.

**Capítulo 3. Configuración del Remanso**

**DISTANCIA AL PUNTO DE MÁXIMO REMANSO:**

En este capítulo, se busca determinar la distancia  $L^*$ , desde el punto de encuentro del nivel del agua con el terraplén de aguas arriba.

Para un cruce “normal”, es decir, perpendicular al eje del puente, se tiene el siguiente ábaco:

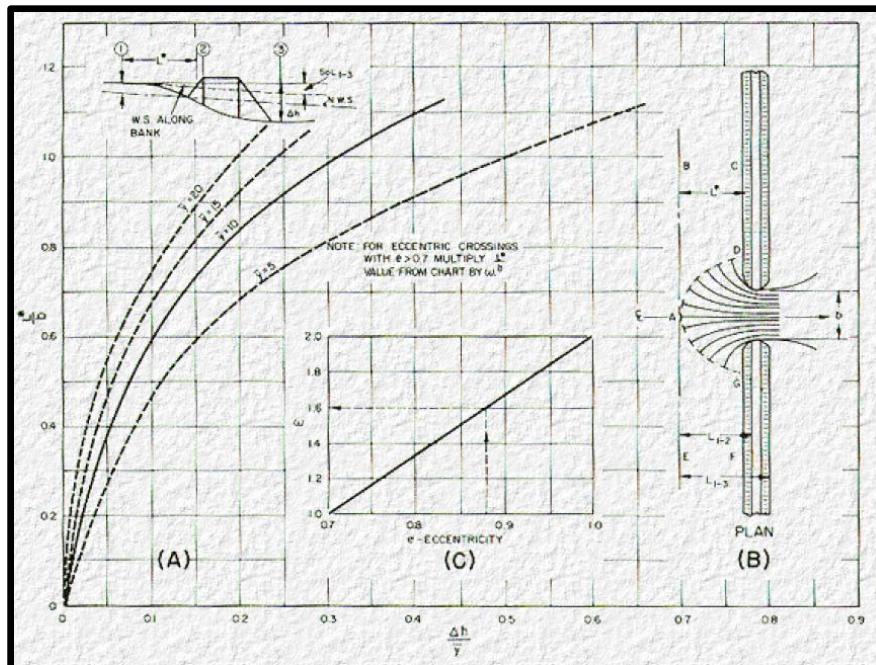


Ilustración 13 – Ábaco para distancia al punto de máximo resalto

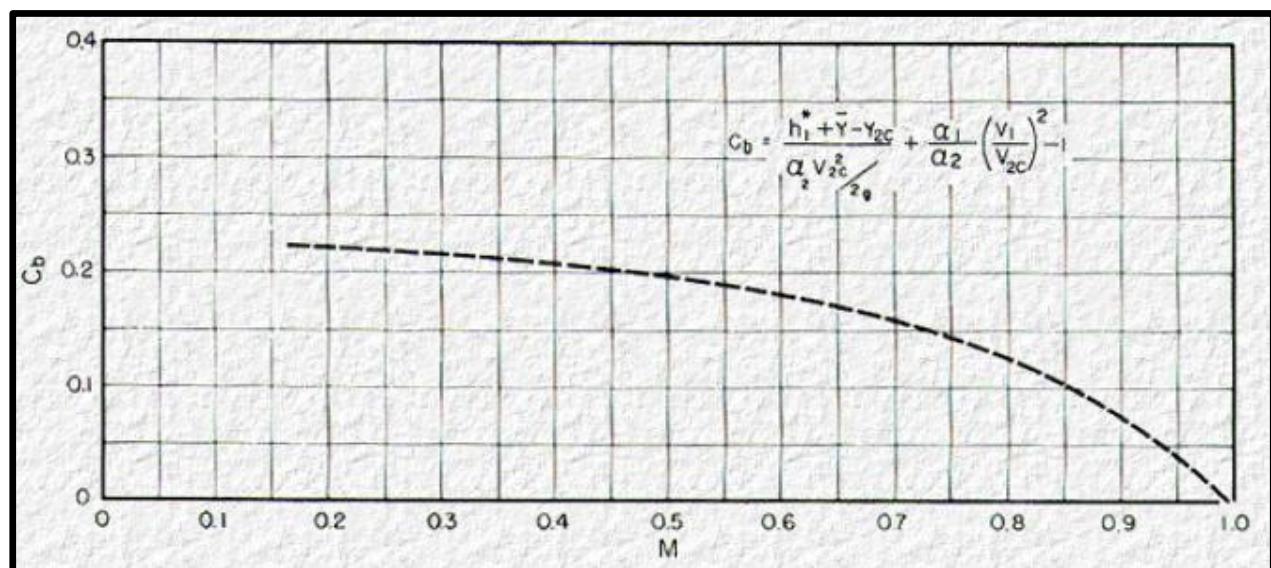
Dicha longitud, se obtiene a partir de un proceso ITERATIVO:

1. Se estima:  $\frac{\Delta h}{y} \cong h_1^* + h_3^*$
2. Se obtiene de tablas:  $\frac{L^*}{b} \rightarrow L$
3. Se calcula nuevamente:  $\frac{\Delta h}{y}$
4. Se compara con el  $\Delta h$  estimado en el primer paso.

Luego, la longitud entre las secciones 1 y 3 ( $L_{1-3}$ ), se determina de forma geométrica como se visualiza en la ilustración 13.

Ademas, como en todos los casos, existen correcciones por excentricidad y/o inclinación que se calculan por medio de ábacos (Ver Hydraulics of Bridge Waterways)

En el caso de tener un Flujo Tipo II, se procede en forma similar, calculando todos los valores y luego se corrigen entrando al ábaco de la ilustración 14.



## EFFECTO DE UNA PILA MAL ALINEADA CON FLUJO PRINCIPAL:

En la siguiente ilustración, se puede observar que, si el proyectista interpreta mal la dirección del flujo, puede subestimar la dimensión proyectada al escurrimiento, provocando un aumento de las velocidades locales y una erosión intensificada en la pila.

En este caso, el flujo de agua lee “ $a_{proj}$ ” y “ $b_{proj}$ ”, no las dimensiones a  $90^\circ$  del puente.

Tener en cuenta la orientación incorrecta (a y b), puede incrementar notablemente el socavamiento en ciertas pilas.

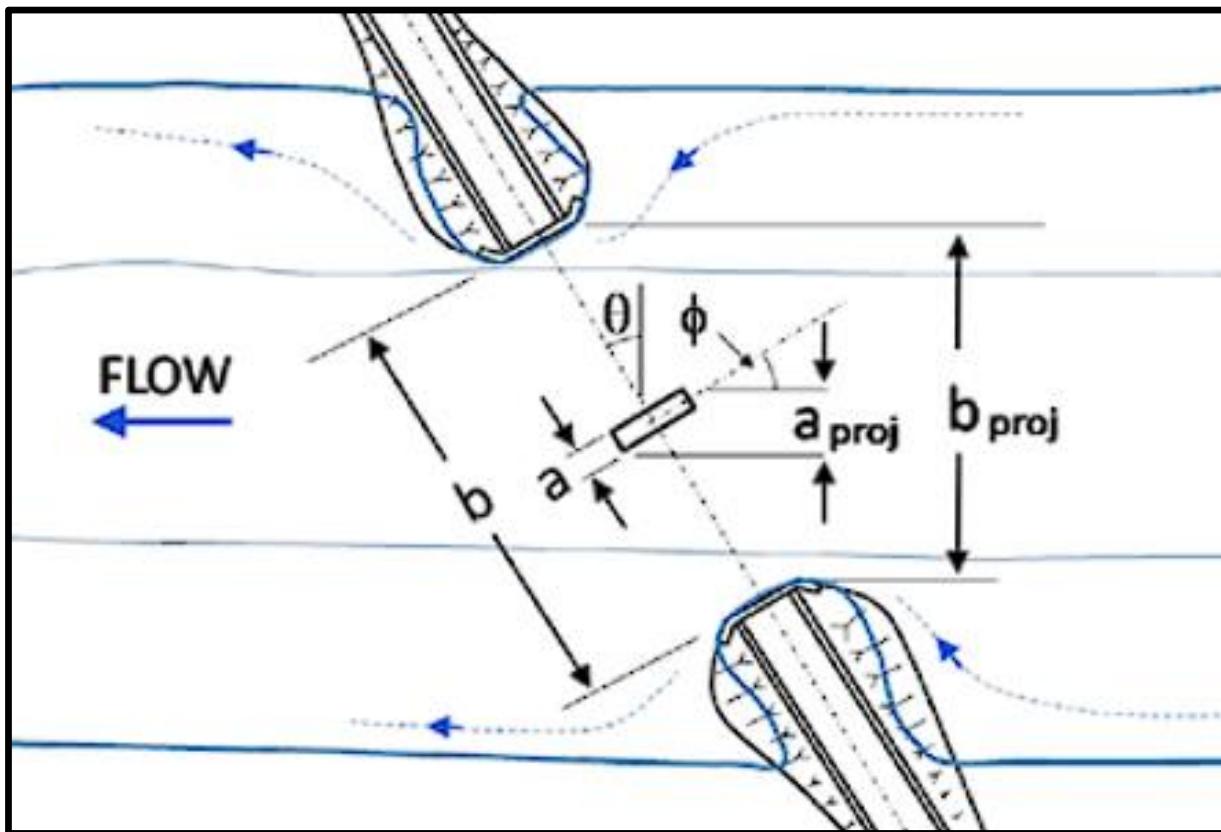


Ilustración 15 -Importancia de considerar las dimensiones proyectadas al flujo

**SOBREPASO DEL PUENTE DURANTE CRECIDAS MÁXIMAS:**

En la siguiente ilustración se muestra una sección transversal de un puente sometido a una crecida que supera la rasante de la calzada, generando dos regímenes de escurrimiento:

- Sobre la calzada → Flujo tipo vertedero.
- Por debajo del tablero → Flujo tipo orificio.

Esta configuración produce altas velocidades bajo el puente, lo que puede originar un fenómeno de socavación local por contracción vertical, de profundidad  $Y_s$ .

Ademas del cálculo del remanso y de las condiciones de pasaje del flujo, resulta fundamental verificar la estabilidad estructural del puente y sus anclajes. En casos extremos, la presión diferencial puede generar el levantamiento del tablero y desplazamiento hacia aguas abajo.

Este tipo de análisis se complementa con el estudio de socavación local, que será abordado en un apunte específico posterior.

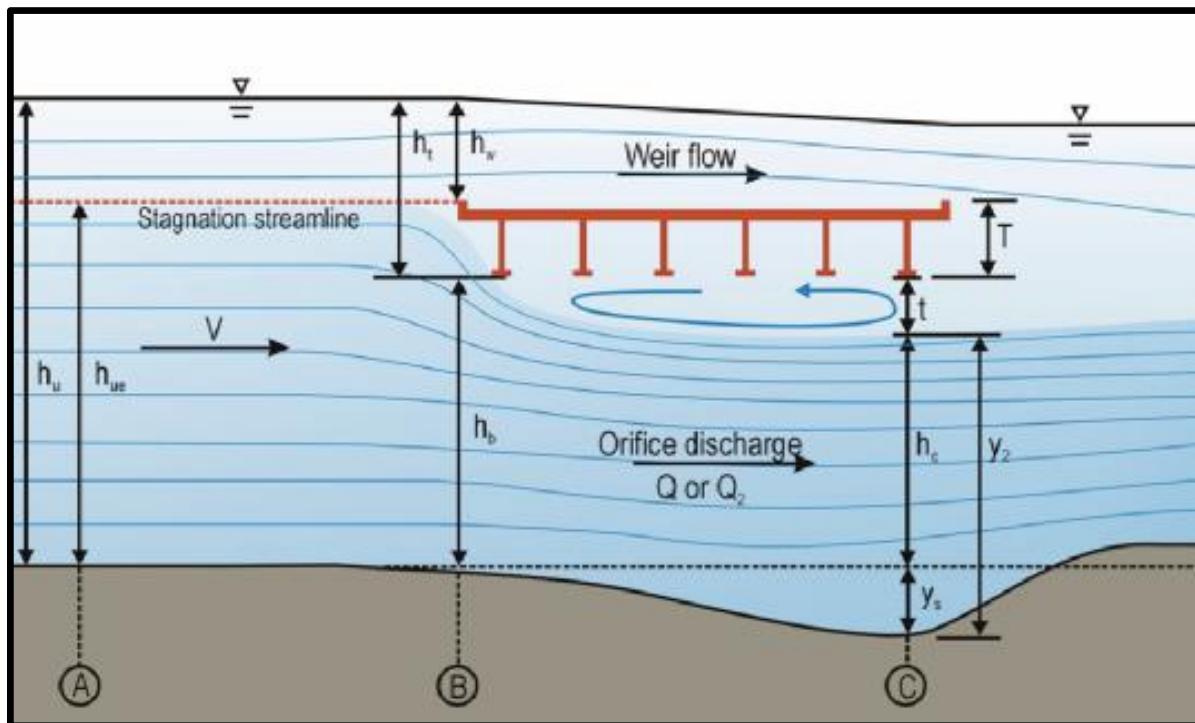


Ilustración 16 - Socavación por contracción vertical

## Capítulo 4. Puentes Dobles

En muchas situaciones de diseño, especialmente en autopistas de calzadas separadas, es habitual disponer de *dos estructuras de puente paralelas*, una para cada sentido de circulación. A este tipo de configuración se lo denomina **puentes dobles**.

### Efecto hidráulico de puentes dobles:

El remanso producido por los puentes dobles es mayor que el producido por un puente simple, pero de menor valor que el que se obtendría considerado los dos puentes por separado.

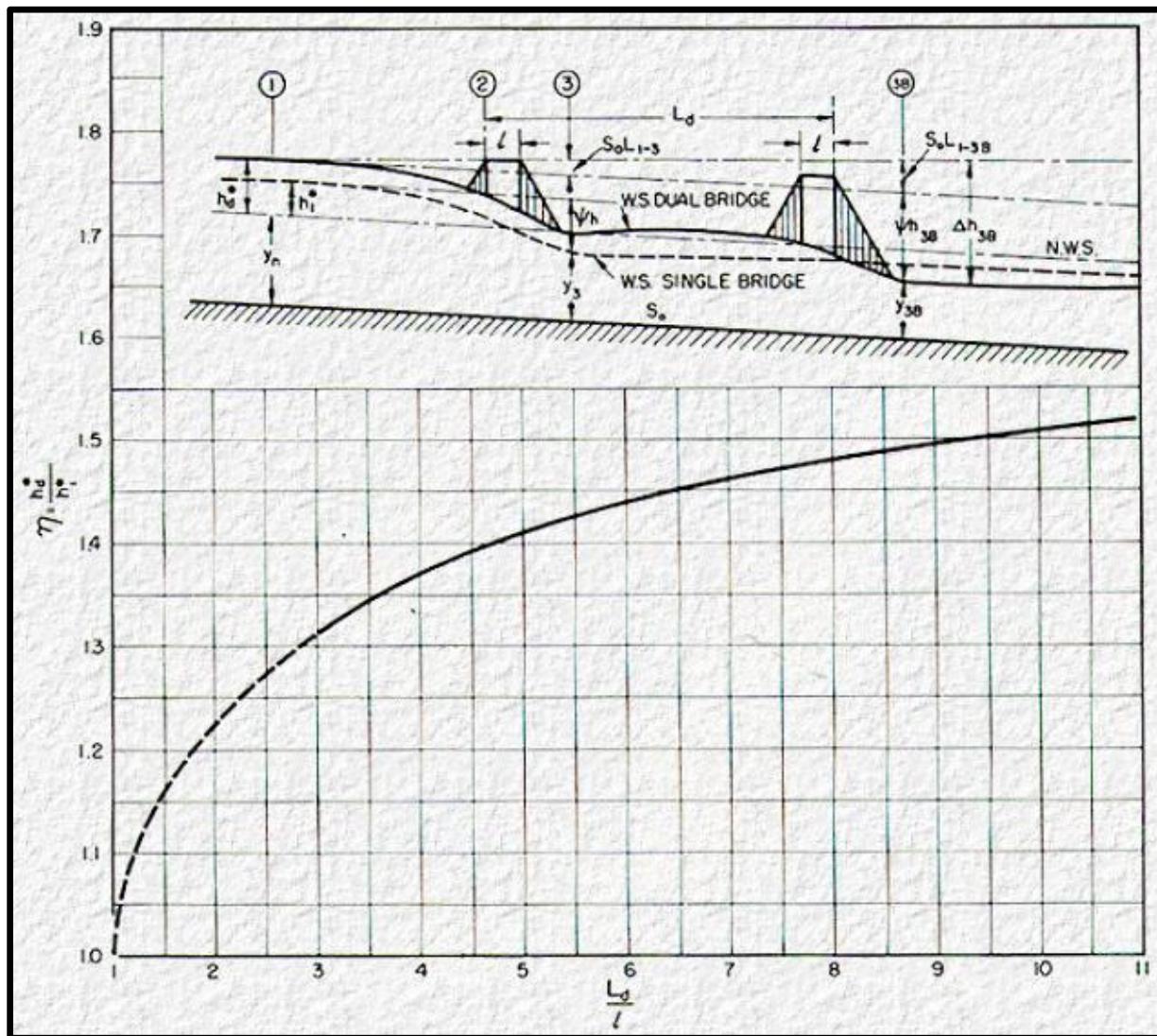


Ilustración 17 - Factor de multiplicación de remanso para puentes duales

Se ha comprobado experimentalmente que el remanso total generado por dos puentes, no es la suma directa de los remansos individuales, sino que se considera un **factor de multiplicación** que tiene en cuenta este efecto:

$$\eta = \frac{h_d^*}{h_1^*}$$

Entonces, para determinar el remanso en puentes dobles, primero es necesario calcular el remanso para un solo puente ( $h_1^*$ ), como se describió en los capítulos anteriores. Luego el remanso para los puentes dobles, medido aguas arriba del primer puente será:

$$h_d^* = h_1^* \cdot \eta$$

Dicho factor de multiplicación, se obtiene del ábaco que se muestra en la Ilustración 15. Depende principalmente de la distancia entre puentes ( $L_d$ ) y del ancho del puente individual ( $l$ ).

De dicho ábaco se puede observar que para  $L_d$  muy pequeñas, los puentes actúan como uno y es por ello que  $\eta \approx 1$ . A medida que aumenta  $L_d$ , el efecto de interacción crece y el remanso en conjunto aumenta  $\eta > 1$ . Entonces, el remanso aguas arriba del puente ( $h_d^*$ ) resulta mayor. Para distancias muy altas el efecto de cada puente se vuelve independiente y es por ello que  $\eta$  se estabiliza.

### DIFERENCIA DE NIVEL TRANSVERSAL:

Cuando el cruce del puente es **excéntrico** respecto al eje del cauce, se produce una diferencia de nivel entre ambas márgenes, lo cual se ve afectada por la configuración de puentes dobles.

Es por ello que se introduciré un factor  $\xi$ , que al igual que  $\eta$ , depende de la razón de “ $L_d$ ” y “ $l$ ”.

$$\xi = \frac{h_d^* + h_{3B}^*}{h_1^* + h_3^*} = \frac{\psi h_{3B}}{\psi h}$$

Donde:

- $h_d^*$  → remanso con dos puentes
- $h_1^*$  → remanso con un solo puente
- $h_3^*$  → componente aguas abajo
- $h_{3B}^*$  → componente aguas abajo para puente doble

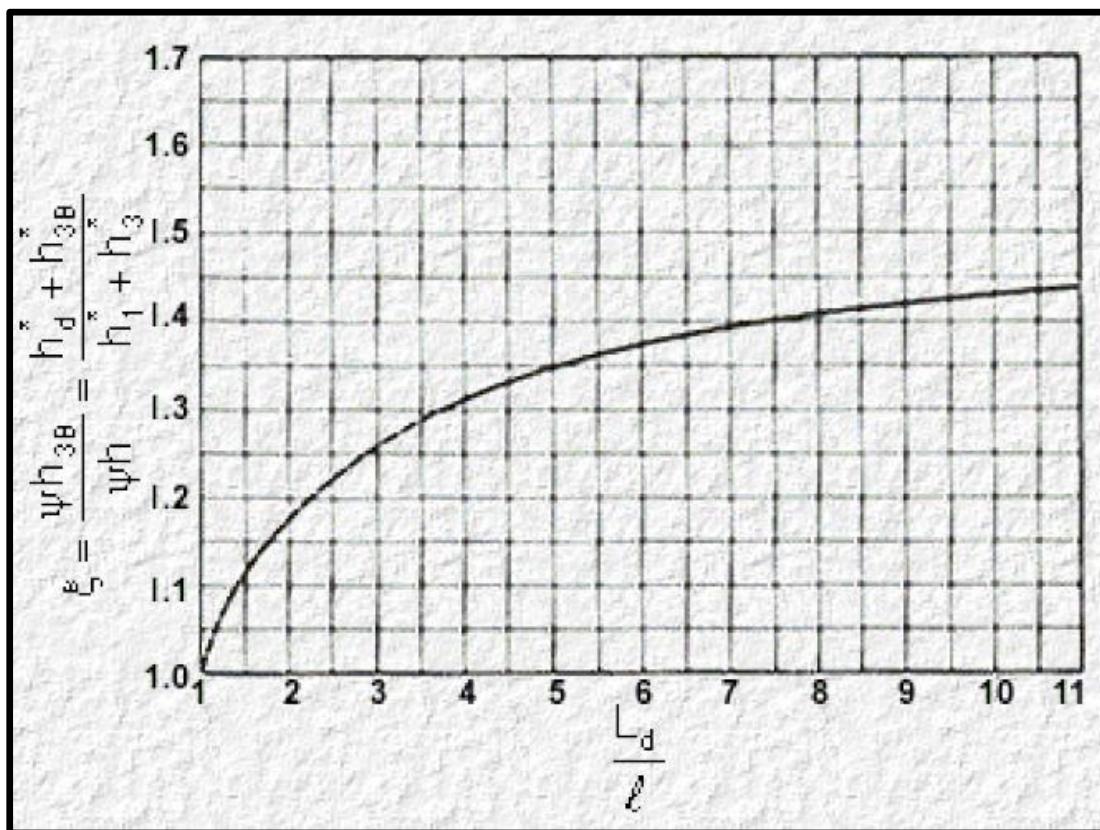


Ilustración 18 - Factor de multiplicación de nivel diferencial para puentes duales

## Capítulo 5. Condiciones anormales de relación Caudal–Nivel

En ciertas situaciones, el comportamiento hidráulico de un puente no se puede analizar únicamente con su propia cuenca de aporte. Existen casos donde el nivel de agua está condicionado por factores externos, y se dice entonces que existe una **condición anormal de relación caudal–nivel**.

Este fenómeno ocurre cuando el nivel del agua está controlado por condiciones externas, típicamente aguas abajo, y no por la dinámica natural del tramo del río, como, por ejemplo:

- Estructuras de control aguas abajo (represas, terraplenes, otros puentes).
- Condiciones de almacenamiento lateral.
- Afluencia desde canales o derivaciones.

A estas situaciones se las denomina “*Condiciones anormales de descarga de etapa*”.

Cuando el flujo está condicionado, el remanso aguas arriba del puente tiende a modificarse. Si bien la expresión es formalmente igual, lo que cambia es la sección que se evalúa para evaluar la velocidad  $V_{2A}$ .

## HIDRÁULICA DE PUENTES – DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA

$$h_{1A}^* = K^* \cdot \frac{V_{2A}^2}{2g}$$

$$K^* = K_b + \Delta K_p + \Delta K_e + \Delta K_s$$

Ahora, como se observa en la ilustración 19, el tirante  $h_{1A}^*$  se mide respecto al nivel anormal.

A diferencia de lo que ocurre en condiciones normales, la sección contraída (y por ende la velocidad  $V_{2A}$ ) se evalúa en base al nuevo tirante impuesto por la curva de etapa anormal.

El parámetro  $K^*$  no cambia debido a que este tiene en cuenta las perdidas según la configuración del puente como se explicó en capítulos anteriores. Pero si las condiciones hidráulicas modifican los parámetros del mismo ( $M$ ,  $b$ ,  $B$  y demás), entonces  $K^*$  también se vería modificado.

Lo determinante en este caso es que si el nivel aguas abajo se eleva por encima del normal (como se observa en la imagen), se incrementa el tirante efectivo  $y_A$ , lo cual agranda la sección de paso y por ende reduce la velocidad  $V_{2A}$ .

Como consecuencia, el tirante aguas arriba  $h_{1A}^*$  **también disminuirá**, en comparación al caso “normal”, ya que depende directamente de la energía cinética de contracción aguas abajo.

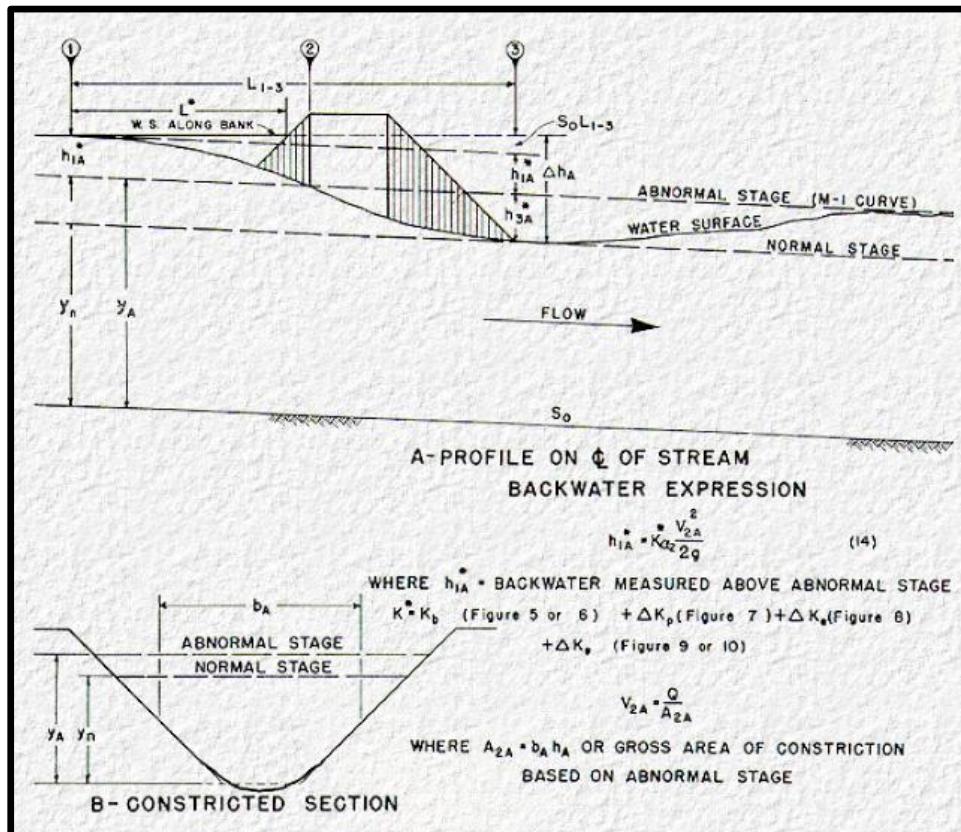


Ilustración 19 - Remanso con condición de descarga de nivel anormal

### Método de la energía

El método que hemos aplicado para encontrar la superficie libre , esta basado en la ecuación de la energía. Hemos descripto su aplicación general para los cálculos del perfil de la superficie del agua en una dimensión (1D). En los puentes, el método de la energía resta los terraplenes de la carretera, los estribos, el tablero del puente y los pilares del área de flujo efectiva. El método aumenta el perímetro mojado para tener en cuenta los lados de los pilares, los estribos y la cuerda inferior del puente si está en contacto con el flujo. La cuerda inferior y los lados de los pilares pueden afectar significativamente el perímetro mojado. La disminución del área y el aumento del perímetro mojado reducen la conductancia. El grado de reducción depende de la obstrucción impuesta por el puente y los terraplenes de la carretera. La reducción de la conductancia aumenta la pendiente de fricción, lo que incrementa la pérdida por fricción a través del cauce del puente.

### Método del balance de momento:

El método del balance de momento se basa en el principio de que la suma de las fuerzas que actúan en una dirección determinada sobre un volumen de control es igual a la masa de agua en el volumen de control multiplicada por su aceleración. A diferencia del método de la energía, el método del balance de momento proporciona una forma de tener en cuenta el diseño hidráulicamente hidrodinámico de los pilares. Las ecuaciones incluyen un término para la fuerza de arrastre de los pilares. La entrada del usuario incluye el coeficiente de arrastre , que puede variar desde 0.29 (para pilares de forma elíptica con una relación longitud-ancho de 8:1) hasta 2.0 (para pilares de punta cuadrada). Estas grandes diferencias en el coeficiente de arrastre pueden afectar los resultados, especialmente cuando los pilares son la causa principal de la pérdida de energía en el cruce del puente. Al igual que el método de la energía, el método del momento incluye los lados de los pilares en el perímetro mojado. La tensión de corte se multiplica por el perímetro mojado para determinar esta fuerza de resistencia. Por lo tanto, en el método del momento, los pilares contribuyen a dos fuerzas de resistencia: el arrastre del pilar y la fricción a lo largo de los lados del pilar. HEC-RAS ofrece la opción de incluir o excluir el componente de peso y/o el componente de fricción del balance de fuerzas. La exclusión de cualquiera de estas fuerzas da como resultado una solución de momento incompleta. El componente de fricción siempre está presente como una fuerza de resistencia, y el componente de peso es típicamente una fuerza motriz, ya que las pendientes del canal tienden a ser positivas en los puentes. Excluir una fuerza motriz resulta en una sobreestimación de la superficie del agua aguas arriba y excluir la fuerza de fricción resulta en una subestimación de la superficie del agua aguas arriba.

### Ecuación de Yarnell:

La ecuación de Yarnell es estrictamente empírica, a diferencia del método de la energía y del método del balance de momento, que se derivan teóricamente. Yarnell realizó aproximadamente 2600 experimentos en canales, observando el cambio en la elevación de la superficie del agua causado por la inserción de pilares de diferentes tamaños, formas y configuraciones. La ecuación de Yarnell, descrita en detalle en el Manual de Referencia Hidráulica HEC-RAS (USACE

2021a), se basa en esos experimentos. El coeficiente K de Yarnell tiene en cuenta varias formas de pilares.

### **Método WSPRO:**

La FHWA desarrolló y apoyó un programa informático para perfiles de la superficie del agua llamado WSPRO a partir de la década de 1980. WSPRO se convirtió en el software estándar de análisis hidráulico de puentes para muchos DOT estatales. HEC-RAS incluye el enfoque de la hidráulica de puentes de ese programa como un método disponible. El método WSPRO utiliza una solución de paso estándar de la ecuación de la energía y es similar al método de la energía en la mayoría de los aspectos. A diferencia de los otros tres métodos de flujo de puentes de superficie libre discutidos aquí, el método WSPRO funciona desde la sección de salida hasta la sección de aproximación y no solo entre las secciones de delimitación aguas arriba y aguas abajo. El cálculo del método WSPRO de la pérdida total de energía en la región entre la sección transversal de delimitación aguas arriba y la sección de aproximación (secciones transversales 3 y 4 en la figura arriba) difiere notablemente del método de la energía. El método WSPRO utiliza una longitud de flujo promedio efectiva en este segmento. La longitud de flujo promedio efectiva es la longitud de trayectoria de flujo promedio para 20 tubos de corriente idealizados de igual conductancia que fluyen desde la sección transversal 4 a la sección transversal 3 siguiendo trayectorias curvilíneas teóricas. El Manual del Usuario de WSPRO (FHWA 1986) explica los detalles de las trayectorias de flujo de los tubos de corriente asumidos.

### **Selección del enfoque de modelado de superficie libre:**

Los métodos de la energía, el balance de momento y WSPRO son adecuados para la mayoría de los sitios de cruce de puentes en condiciones de superficie libre. Entre estos tres, el método del balance de momento es único en la forma de contabilizar el arrastre de los pilares en función de la forma de los mismos. Por lo tanto, el método del balance de momento es una buena opción cuando los pilares son el factor predominante de pérdida de energía. Esto es especialmente cierto cuando la geometría del pilar es algo aerodinámica, ya que el método del balance de momento reconoce los efectos beneficiosos de un diseño aerodinámico. Los métodos de la energía y WSPRO son aplicables cuando las pérdidas por fricción y los efectos de restricción son predominantes. En la mayoría de los casos, los resultados de los dos métodos, cuando se aplican correctamente en las mismas condiciones, son muy similares en términos de la línea de grado de energía y la elevación de la superficie del agua aguas arriba del puente. Sin embargo, solo el método WSPRO tiene en cuenta diferentes tipos de geometrías de estribos (por ejemplo, estribos de vertido frente a estribos verticales con muros de contención). A menudo se prefiere el método de la energía porque tiene menos requisitos de entrada que el método WSPRO y, en la mayoría de los casos, produce aproximadamente los mismos resultados. El método del momento también suele funcionar bien en situaciones en las que la restricción es el factor de pérdida predominante. También tiene la ventaja de que puede adaptarse mejor a un flujo rápidamente variado, una característica del flujo de puentes de superficie libre de clase B y clase C.

## **Capítulo 6. Bibliografía**

Hydraulics of Bridge Waterways – HDS1

Ven T. Chow .

Evaluating Scour at Bridges.. FHwy ..Fifth Edition .

Evaluation of Existing Equations for Local Scour at Bridge Piers . D. M. Sheppard, A.M.ASCE; B. Melville, M.ASCE2; and H. Demir, M.ASCE3