

## CAPITULO 2

### INFORMACIÓN BÁSICA PARA ESTUDIOS DE SOCAVACIÓN EN PUENTES

<b>2</b>	<b>INFORMACIÓN BÁSICA PARA ESTUDIOS DE SOCAVACIÓN EN PUENTES .....</b>	<b>2.1</b>
<b>2.1</b>	<b>Estudios básicos de oficina y de campo .....</b>	<b>2.2</b>
2.1.1	Estudios topográficos .....	2.2
2.1.2	Estudios hidrológicos .....	2.3
2.1.3	Estudios hidráulicos.....	2.4
2.1.4	Estudios de suelos.....	2.5
<b>2.2</b>	<b>Determinación de caudales de diseño .....</b>	<b>2.6</b>
<b>2.3</b>	<b>Hidráulica en el sitio del cruce con un puente .....</b>	<b>2.8</b>
2.3.1	Tipos de flujo.....	2.9
2.3.2	Modelación hidráulica .....	2.13

### INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1	Tipos de flujo en la zona de un puente. ....	2.9
Figura 2.2	Estrechamiento de un cauce. Atala C. G. 1979.....	2.10
Figura 2.3	Tipos de flujo bajo en la zona del puente. Atala C. G. 1979. ....	2.11
Figura 2.4	Sección transversal en la zona del puente.....	2.15
Figura 2.5	Curva de calibración de un río. ....	2.16
Figura 2.6	1) Sección transversal en el puente. 2) Sección transversal aguas arriba. ....	2.18
Figura 2.7	Perfil longitudinal. ....	2.18
Figura 2.8	Ubicación de las secciones transversales. Medina, E. y Castillo J.,1997.....	2.20

### INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1	Composición ideal de datos para evaluación de socavación .....	2.1
Tabla 2.2	Períodos de retorno para diseño de puentes en función del riesgo y de la vida útil. Monforte O., A. M. y Galindo G., L. 1989. ....	2.7
Tabla 2.3	Modelos reconocidos de 1D, 2D y 3D. Universidad del Cauca – CRC- INGEOMINAS, (2005). ....	2.15

## 2 INFORMACIÓN BÁSICA PARA ESTUDIOS DE SOCAVACIÓN EN PUENTES

Siempre resulta complejo recolectar la información necesaria para hacer estudios de socavación en puentes ya sea que estén construidos o por construir, y por lo general, nunca se está satisfecho con la suficiencia y calidad de ella. Es necesario recolectar información de oficina y de campo desde el punto de vista topográfico, hidrológico, hidráulico y de suelos, la que se resume idealmente en la Tabla 2.1.

**Tabla 2.1 Composición ideal de datos para evaluación de socavación**

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

## 2.1 Estudios básicos de oficina y de campo

Para realizar el diseño de un puente y/o su evaluación con relación a socavación, se deben adelantar estudios básicos con el fin de conocer las características topográficas, hidrológicas, hidráulicas y de suelos en la zona de emplazamiento de la estructura. El estudio integral de un río debe comprender el entendimiento de su geomorfología, ya que cambios en su profundidad, ancho y alineamiento, en forma súbita o progresiva, pueden alterar la estabilidad de un puente, (Ver Parte I sobre Geomorfología Fluvial, Parte II sobre Transporte de Sedimentos y Parte III sobre Procesos Fluviales).

### 2.1.1 Estudios topográficos

Los estudios topográficos incluyen los siguientes pasos:

- Planificación general del estudio. Se deben establecer las características del trabajo de campo en lo referente a: longitud total del río en que se van a levantar las secciones transversales y su espaciamiento, errores permitidos, nomenclatura a usar, orden en la toma de las secciones, etc.
- Generación del abscisado longitudinal. Se debe realizar un levantamiento altimétrico y planimétrico con poligonales cerradas sobre la orilla del río tributario desde donde se amarrarán las secciones transversales. Referenciación de las secciones transversales. Se debe hacer el amarre altimétrico mediante nivelación de precisión, dejando BMs al inicio de cada sección transversal. En muchos casos de estudios de socavación, basta con poligonales abiertas.
- Toma de las secciones transversales. El levantamiento de las secciones transversales se realizará desde aguas abajo hacia aguas arriba, cubriendo una distancia conveniente a lado y lado de la llanura de inundación sobre ambos márgenes del cauce o hasta los puntos más altos de diques, si existen. Las secciones transversales estarán debidamente referenciadas en sus extremos al sistema de coordenadas IGAC y amarradas a la poligonal; la separación entre secciones depende de cada proyecto. Se requieren mínimo tres secciones para caracterizar una curva. Se deben relacionar los niveles del agua, a banca llena y de ser posible, niveles de aguas máximas. Con la finalidad de definir el gradiente hidráulico existente, se establecerá la diferencia relativa de nivel entre cada una de las secciones mediante el traslado e identificación de los niveles. Se detallarán las restricciones y obstáculos al flujo representadas en puentes, viaductos, box-culverts, necesario para definir los puntos de control hidráulico. En los sitios en donde el nivel de agua no permite el levantamiento topográfico convencional como estación total y nivel de precisión, las secciones deberán ser obtenidas mediante la utilización de una eco-sonda.
- Si el puente está construido, debe contarse con los planos de construcción y hacerse el levantamiento de la estructura existente dando especialmente énfasis a la nivelación de la losa y de los elementos de apoyo, tanto pilas como estribos.
- Procesamiento de la información. Se requiere, según corresponda en medio magnético e impreso: carteras de apoyo de los levantamientos topográficos; cálculos de las poligonales y nivelaciones. Plano de localización general de todas las secciones. Secciones transversales. Tabla de coordenadas de puntos de cada sección transversal. Informe escrito de eventualidades en el desarrollo de la campaña de campo.

**- Datos generales**

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

**- Secciones transversales**

El levantamiento topográfico se puede hacer, en el caso de puentes pequeños, mediante una poligonal abierta tendida en una de las márgenes del río, que sirve de base para tomar las secciones transversales y la batimetría en la zona del puente, así como las características geométricas de éste si ya está construido.

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

**- Socavación en puentes existentes**

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

**- Presencia de depósitos de sedimentos**

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

**- Esquemas**

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

**2.1.2 Estudios hidrológicos**

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

**• Información de estaciones hidrológicas**

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

**• Características fisiográficas de la cuenca hidrográfica**

La determinación de las características fisiográficas de la cuenca se hace sobre fotografías aéreas y planos topográficos.

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

**• Caudales, niveles y velocidades**

- Caudal medio en el cauce.
- Caudal y fecha de las crecientes máximas extraordinarias.
- Caudal de diseño.
- Caudales, niveles y velocidades de creciente correspondientes a períodos de retorno tales como 100 años ( $Q_{100}$ ), 500 años ( $Q_{500}$ ) y el caudal que sobrepasaría el puente ( $Q_{sp}$ ), (Ver Numeral 2.2).

**2.1.3 Estudios hidráulicos**

Lo estudios hidráulicos llevan a determinar los parámetros necesarios para calcular y evaluar la socavación en puentes para lo que usualmente se requiere contar con información como la siguiente:

**• Características hidráulicas del río**

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

**• Descripción de estructuras u obras de control próximas al sitio del puente**

- Puentes (tipo, antigüedad, elevación de la rasante del puente, orientación del puente, orientación de las pilas, dirección de la corriente en épocas de avenidas, sección transversal del cruce, comportamiento del puente ante crecientes).
- Presas (función, operación del embalse, grado de regulación).
- Obras de encauzamiento y protección contra la erosión.
- Obras de encauzamiento y protección contra inundaciones.

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

#### • Cálculos hidráulicos

Determinación de parámetros hidráulicos: velocidad, profundidad del agua, área mojada, perímetro mojado, etc., Ver Numeral 2.3.

#### 2.1.4 Estudios de suelos

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

Un informe geológico para hacer estudios de cimentación de un puente debe incluir información sobre:

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

Por otra parte, los parámetros más importantes de los sedimentos del cauce que de una u otra forma intervienen en el cálculo de las profundidades máximas de socavación son: densidad y peso específico, velocidad de caída, distribución granulométrica, tamaño, desviación estándar geométrica, peso específico de la mezcla agua-sedimento en suspensión, viscosidad de la mezcla agua-sedimento en suspensión.

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

## 2.2 Determinación de caudales de diseño

El caudal medio del río corresponde usualmente al caudal con un período de retorno de por ejemplo 2 años o a una creciente frecuente que ha conformado el cauce principal y es muy probablemente menor que el caudal de diseño. Este caudal no es representativo de condiciones extraordinarias de flujo ni podrá ser el caudal de diseño para el puente.

Debe prestarse especial atención a la determinación del caudal de creciente pues es la base del diseño hidráulico del puente y de la evaluación de las profundidades de socavación. Dicha determinación se hace de acuerdo al proyecto específico teniendo en cuenta los siguientes criterios: tipo de obra, vida útil de la obra, tiempo de retorno o frecuencia de la creciente, seguridad y economía.

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

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

- **Métodos empíricos:** se usan para tener una idea preliminar sobre el gasto de diseño y si sólo se cuenta con información de algunas características físicas de la cuenca. Ejemplos de estos métodos son: envolventes de Creager, envolvente de Lowry, método de Talbot.
- **Métodos semi-empíricos:** consideran la precipitación y características de la cuenca hidrográfica para la determinación del caudal. El método racional y el de Burkli-Ziegler son ejemplos de métodos semi-empíricos.
- **Métodos hidro-meteorológicos:** se basan en la respuesta de la cuenca hidrográfica ante un evento dado que se resume en la relación precipitación-escurrimiento-caudal. Los hidrogramas unitarios son métodos hidro-meteorológicos.
- **Métodos de sección y pendiente:** se debe escoger un tramo de río con condiciones lo más homogéneas posibles para estimar la pendiente media del cauce, el coeficiente de rugosidad de Manning, el perímetro mojado, el área mojada y el radio hidráulico que corresponden a un nivel de creciente asumido (*NAME*).

Esta información permite aplicar la ecuación de Manning y encontrar el caudal correspondiente. Su uso es conveniente para verificar datos o cuando no hay información de tipo hidrológico, Ver Numeral 2.3.

• **Métodos probabilísticos:** se basan en suponer que los caudales máximos anuales aforados en una sección de un cauce son una muestra aleatoria de una población de gastos máximos. Hay varios métodos probabilísticos en uso y la diferencia entre ellos es la forma de la distribución probabilística que suponen tiene la población. Ejemplos de estos métodos son: valores extremos tipo I o Gumbel, Log-Pearson tipo III, Hazen-Fuller-Foster, Levediev, Nash.

Los métodos probabilísticos determinan el caudal dependiendo de un período de retorno el cual está ligado al riesgo aceptable para una determinada estructura. El riesgo aceptable depende de la importancia de la obra y de aspectos económicos, sociales, técnicos, políticos, ecológicos, entre otros.

$$R = 1 - \left(1 - \frac{1}{T_r}\right)^{v_u} \dots\dots\dots 2.1$$

- R = riesgo de falla
- T<sub>r</sub> = período de retorno
- v<sub>u</sub> = vida útil de la obra

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

**Tabla 2.2 Períodos de retorno para diseño de puentes en función del riesgo y de la vida útil. Monforte O., A. M. y Galindo G., L. 1989.**

Riesgo de Falla R [%]	Vida útil del puente en años [v <sub>u</sub> ]				
	5	30	50	70	100
Período de retorno en años [T <sub>r</sub> ]					
40	10	59	98	138	196
50	8	44	73	101	145
60	6	33	55	77	110
80	4	19	32	44	63
99	1.7	7	11	16	22

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

Dada la importancia de los puentes como parte de la infraestructura vial de un país y considerando que la seguridad del usuario debe estar por encima de todo, para la evaluación de puentes nuevos o ya construidos desde el punto de vista hidráulico y de socavación, y sobre todo, cuando haya incertidumbre en la información hidrológica disponible, resulta conveniente considerar períodos de retorno de 100 años (Q<sub>100</sub>) y hacer chequeos para ver lo que ocurriría si se



presentan super-crecientes de 500 años ( $Q_{500}$ ), o mayores, de forma que el puente sea sobrepasado, ( $Q_{sp}$ ).

### 2.3 Hidráulica en el sitio del cruce con un puente

La construcción de un puente implica en ocasiones que se invada parte del cauce con el consecuente estrechamiento de su sección transversal produciéndose cambios en la velocidad del flujo y en la pendiente hidráulica de la corriente en que se construye.

El estrechamiento del cauce por un puente resulta en luces más pequeñas que reducen costos de construcción, pero por otro lado, produce una pérdida de energía que se traduce en sobre-elevación de la superficie del agua hacia aguas arriba de la contracción. A esta sobre-elevación se le llama altura de remanso y debe tenerse en cuenta para calcular tanto la longitud como el claro vertical del puente.

El remanso del flujo puede provocar inundaciones aguas arriba del puente con consecuencias negativas para los usos del suelo y otras actividades. En el sitio del estrechamiento se produce un aumento en la energía cinética del flujo que ocasiona socavaciones a veces excesivas en los apoyos del puente. El incremento en la energía potencial aguas arriba del puente ocasiona velocidades mayores en el estrechamiento aumentándose la capacidad de transporte del flujo. La mayor capacidad de transporte se traduce en socavación del fondo en el estrechamiento y en las cercanías. A medida que la socavación continúa, el área hidráulica debajo del puente aumenta, y la velocidad y la resistencia al flujo decrecen resultando en una reducción en el remanso. Esto significa que la altura del remanso es menor si existe socavación en el cauce. Sin embargo, el incremento de la sección hidráulica ocurre algún tiempo después de iniciado el proceso erosivo. Al principio de la avenida, el proceso erosivo será nulo teniéndose una sección recta equivalente a una de lecho fijo. Por lo tanto, el caso más desfavorable desde el punto de vista de la socavación en un puente resulta cuando se calcula el remanso considerando lecho fijo, caso en el que la altura del remanso será máxima y el poder erosivo mayor.

**2.3.1 Tipos de flujo**

Cuando se tienen condiciones de flujo libre en la zona del puente se dice que el flujo es bajo, en tanto que el flujo alto se considera cuando la estructura llega a actuar a presión o como un vertedero, (Figura 2.1).

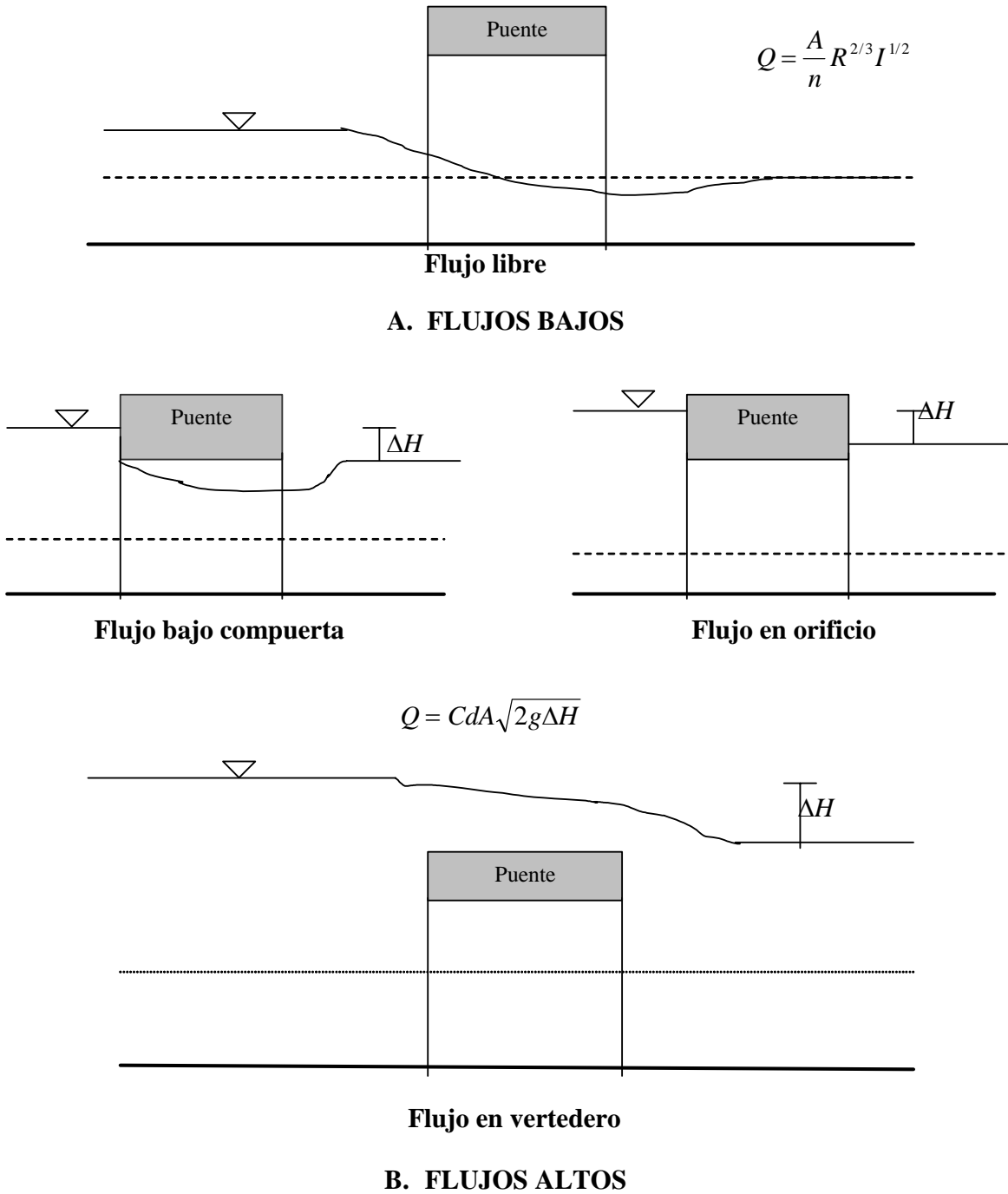


Figura 2.1 Tipos de flujo en la zona de un puente.

**A) Flujos bajos**

El siguiente enfoque es puramente teórico pero es la mejor aproximación desde el punto de vista hidráulico de lo que ocurre en el sitio del cruce de un río con un puente cuando el flujo es bajo o libre, ya que no se cuenta con información suficiente de campo o de laboratorio para determinar lo que realmente ocurre en la práctica durante una creciente.

Las Figura 2.4 y Figura 2.5 presentan el efecto del estrechamiento de un cauce visto en planta y en perfil longitudinal, respectivamente. El flujo se reduce de un ancho  $B$  a un ancho  $b$ . La entrada y la salida de la reducción funcionan como una contracción y una expansión, respectivamente. Las zonas  $A$  representan los terraplenes de acceso del puente que estrechan el cauce y por tanto producen un efecto de remanso aguas arriba. Varias secciones se estudian teóricamente a lo largo de la zona de influencia de un puente.

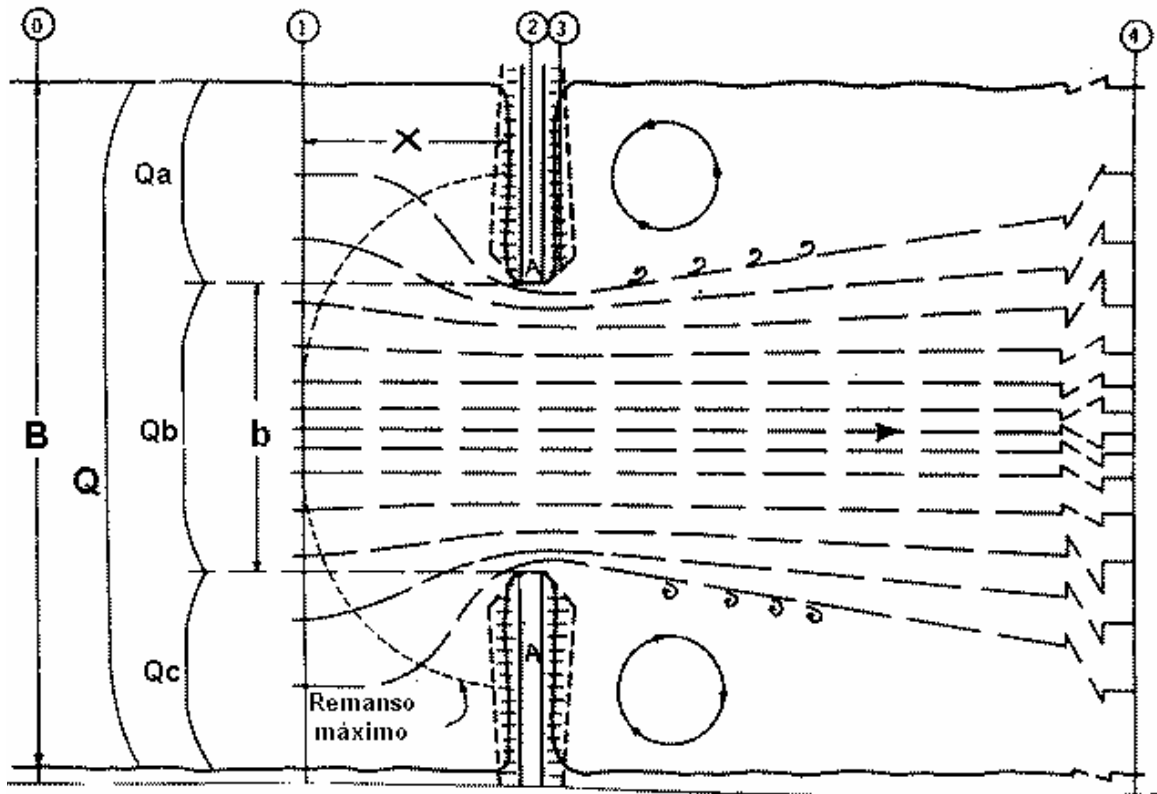
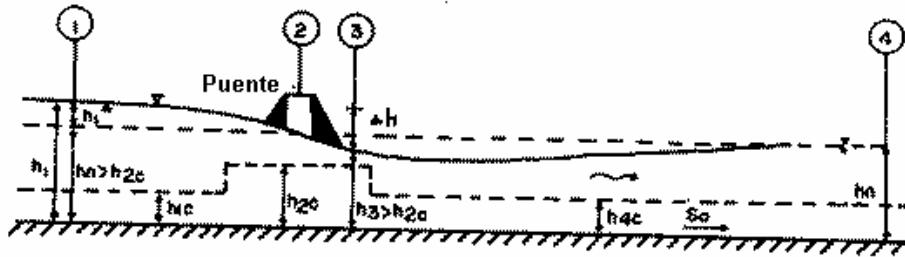


Figura 2.2 Estrechamiento de un cauce. Atala C. G. 1979.

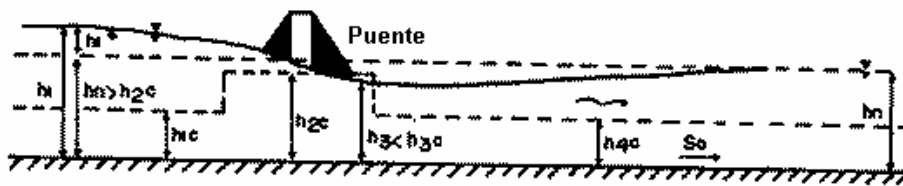
**Sección 0:** sección aguas arriba hasta donde influye el remanso.

**Sección 1:** sección próxima al estrechamiento donde el agua comienza a acelerarse. Es la sección que representa el máximo remanso; está situada a una distancia  $X$  de los terraplenes de acceso.

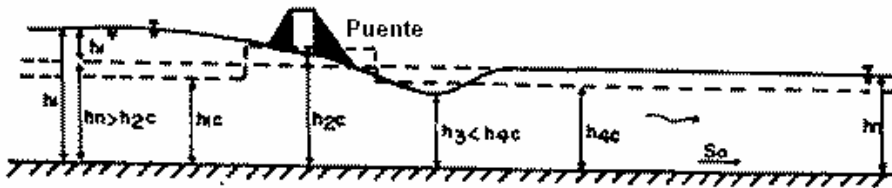
**Sección 2:** sección de ancho mínimo del flujo. El flujo se separa de las fronteras sólidas siendo la contracción del flujo mayor que el ancho de la abertura.



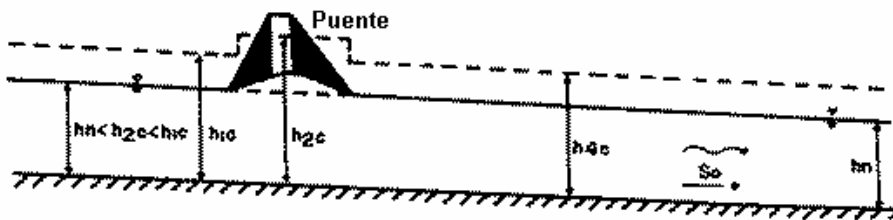
FLUJO TIPO A (Subcrítico)



FLUJO TIPO B1 (Paso por flujo crítico)



FLUJO TIPO B2 (paso por flujo crítico)



FLUJO TIPO C (Supercrítico)

Figura 2.3 Tipos de flujo bajo en la zona del puente. Atala C. G. 1979.

**Sección 3:** sección con menor tirante de agua. Es donde empieza a ocurrir el retardo del flujo. Aguas abajo de la Sección 3 se presentan remolinos de agua entre las fronteras sólidas del terraplén y las laderas.

**Sección 4:** sección aguas abajo hasta donde influye la contracción del cauce. A partir de esta sección se restablecen las condiciones de flujo uniforme.

Entre las Secciones 0 y 1, el flujo es gradualmente variado.

Entre las secciones 1 y 2 el flujo es rápidamente variado acelerado.

Entre las secciones 2 y 3 el flujo es como el que se produciría al pasar por un orificio.

Entre las Secciones 3 y 4, el flujo es gradual o rápidamente variado retardado

En resumen, en la zona de un puente se pueden presentar cuatro situaciones de flujo cuando existe flujo libre a través del puente tal como se ilustra en la Figura 2.3.

• **Flujo tipo A**

Este tipo de flujo se da cuando la superficie del agua a través del puente es completamente subcrítica y por lo tanto los tirantes de agua son siempre mayores que la profundidad crítica. Este es el caso más frecuente en la práctica.

• **Flujo tipo B**

Existe cuando los perfiles son subcríticos o supercríticos. Para ambos perfiles, el flujo tipo B ocurre cuando los perfiles pasan por la profundidad crítica en la sección contraída del puente.

Para un perfil supercrítico, el puente actúa como un control ocasionando que la elevación de la superficie del agua hacia aguas arriba esté por encima de la profundidad crítica.

· **Flujo tipo B1**

Se caracteriza porque los tirantes de agua fuera de la sección contraída siempre son mayores que el crítico, pasando el flujo por el tirante crítico en el estrechamiento. Por lo tanto, la superficie del agua hacia aguas arriba del estrechamiento, y por ende el remanso, se vuelven independientes de las condiciones aguas abajo de la contracción.

· **Flujo tipo B2**

Este tipo de flujo presenta un pequeño salto hidráulico aguas abajo de la Sección 3 debido a que el tirante normal del agua hacia aguas abajo es mayor que el tirante crítico a la salida del estrechamiento y a que el tirante en la Sección 3 es menor que el tirante crítico. El flujo pasa de supercrítico en la Sección 3 a subcrítico en la Sección 4.

• **Flujo tipo C**

En este caso, los tirantes de agua siempre son menores que el crítico. Teóricamente, no se presenta remanso para este tipo de flujo. La superficie del agua se altera en la zona adyacente al puente sin extenderse su efecto más allá. El flujo supercrítico no es común en la práctica aunque puede ocurrir en cauces de montaña.

**B) Flujos altos**

Se considera que el puente está sometido a flujos altos cuando se presenta flujo a presión o en vertedero, situaciones que deben ser evitadas en el diseño, (Ver Figura 2.1).

**• Flujo a presión**

El flujo a presión se presenta cuando la superficie del agua entra en contacto con la parte más baja de la losa o de las vigas del puente, formando un remanso aguas arriba. Dos casos de flujo a presión se consideran:

- El agua entra en contacto sólo con el extremo del puente aguas arriba y usa para ello un tipo de ecuación de flujo bajo compuerta, (Hydraulics of Bridge Waterways FHWA, 1978);
- El agua entra en contacto con toda la sección interior del puente usando para sus cálculos la ecuación de orificio, (Hydraulics of Bridge Waterways FHWA, 1978);

**• Flujo sobre vertedero**

El flujo sobre vertedero ocurre cuando el agua pasa por encima del puente.

**2.3.2 Modelación hidráulica**

Según se consigna en Universidad del Cauca – CRC- INGEOMINAS, (2005), existen numerosos programas para modelar las condiciones hidráulicas y morfológicas en ríos; dichos programas varían en el grado de sofisticación y fiabilidad. La ciencia de la modelación numérica esta progresando rápidamente haciendo que nuevos programas replacen a los ya obsoletos. Los programas para modelación pueden clasificarse dependiendo de qué calculan, cuántas dimensiones son usadas y particularidades de los métodos numéricos empleados, lo que hace que muchos de ellos sean para aplicaciones muy específicas.

En el caso de la hidráulica fluvial, los modelos pueden clasificarse como: modelos de lecho fijo, modelos de lecho móvil y modelos de régimen permanente y no-permanente, aunque pueden existir combinaciones entre ellos.

**Modelos de lecho fijo:** los modelos de lecho fijo requieren información hidráulica, sedimentológica, topográfica y de calibración. En este tipo de modelos el sedimento no se emplea para calcular el arrastre, pero sí para evaluar las condiciones de rugosidad del cauce. Estos modelos sugieren un cauce de sección transversal fija.

**Modelos de lecho móvil:** los modelos de lecho móvil inician una modelación previa de las características hidráulicas. Una vez calibrado el comportamiento hidráulico se procede a incluir los datos complementarios que afectan a los sedimentos: granulometrías, zona erosionable y no erosionable y profundidad de la zona erosionable (profundidad de acorazamiento, controles geológicos, etc.). Una vez calibrados los modelos de lecho móvil, arrojan información importante para el análisis del comportamiento hidráulico-morfológico de la corriente y su cauce.

**Modelos de régimen no-permanente:** los modelos de régimen no permanente requieren igualmente características topográficas, hidráulicas, sedimentológicas, de calibración y condiciones de caudal en función del tiempo. A lo anterior, se suma la complejidad de sus ecuaciones que se traduce en problemas adicionales de estabilidad numérica y convergencia. Por

esto, es necesario realizar primero un proceso de calibración en condiciones de régimen permanente y finalmente un análisis de sensibilidad del modelo de los parámetros que se consideren inciertos.

**Modelos matemáticos fluviales o de flujo libre:** con las herramientas informáticas existentes, la simulación o modelación del comportamiento hidráulico y morfológico de cauces aluviales es un recurso de fácil utilización que proporciona buenos resultados para el análisis de complejos problemas que se presentan en el área de la ingeniería fluvial. Muchas personas y organizaciones públicas y privadas de gobiernos de todo el mundo, universidades, institutos, centros, entre otros, se han esforzado en desarrollar teorías, modelos y herramientas que mejor modelen el comportamiento de los ríos aluviales. Sin embargo, en nuestro país, estas técnicas son recientes y se inunda el medio de incertidumbre e incredulidad.

En los últimos años, numerosos modelos en dos y tres dimensiones han sido desarrollados para la predicción del flujo en canales abiertos artificiales y naturales. Los ríos aluviales de tipo meándrico presentan corrientes secundarias que inducen los procesos de movimiento del lecho a lo largo y ancho de la llanura de inundación. Por lo anterior, la modelación de este tipo de sistemas es compleja y requiere sofisticadas técnicas numéricas, siendo necesario recurrir a exactos y robustos códigos de computador que puedan detallar el comportamiento de las corrientes principales y secundarias de los flujos a través de las secciones transversales, permitiendo estimar el transporte de sedimentos y los cambios en el lecho.

La facilidad de simular los procesos hidráulico-morfológicos, su dinámica y respuesta a estructuras invasoras, pasivas, temporales o permanentes del sistema, permitirá estudiar con mejor detalle la estabilización de los ríos y el impacto ambiental y ecológico de la intervención. En la Tabla 2.3 se relacionan algunos modelos reconocidos en el campo de la modelación e investigación y otros comerciales de circulación libre o licenciada para su aplicación en estudios de desarrollo gubernamental o privado.

**Tabla 2.3 Modelos reconocidos de 1D, 2D y 3D. Universidad del Cauca – CRC-INGEOMINAS, (2005).**

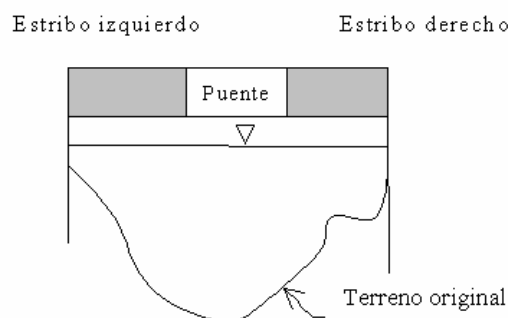
Modelos Unidimensionales	Modelos Bidimensional	Modelos Tridimensional
HEC2 HEC-RAS RIVERCAD ISIS MIKE 11 WSPRO HEC-6 SEDIMOD FLUVIAL-11 DAMBRK SOBEK	SMS SED2D RIVER 2D BRI-STARS G-STARS HYDRO2DE RAM-2 CCHE2D DELFT 2D	SSIIM-CFD FLOW3D DELFT 3D CH3D-SED TRISULA <sup>1</sup>

En la práctica, cuatro diferentes enfoques de modelación hidráulica del flujo a través del puente se pueden usar para determinar los parámetros necesarios para calcular socavación: flujo uniforme y una sola sección transversal; flujo uniforme y dos secciones transversales; cálculo de la profundidad del remanso usando métodos empíricos; flujo variado usando varias secciones transversales, el cual es el mejor enfoque.

**1) Modelación hidráulica asumiendo flujo uniforme y una sola sección transversal**

Usualmente, la determinación de los parámetros hidráulicos para hacer la evaluación de un puente con relación a socavación se hace por medio de métodos simplificados que asumen condiciones de flujo uniforme y no consideran el efecto del remanso causado por la estructura, ni la aceleración del flujo al pasar por el puente.

La estructura del puente se superpone a la sección transversal para tener en cuenta su influencia sobre los parámetros hidráulicos.



**Figura 2.4 Sección transversal en la zona del puente.**

<sup>1</sup> TRISULA 1994. 3D Numerical simulation of turbulent shallow-water flow in square harbor trisula. Marco D. J. P. Bijvelds,1 C. Kranenburg,2 and Guus S. Stelling3 26 / JOURNAL OF HYDRAULIC ENGINEERING / JANUARY 1999. Citado en Universidad del Cauca – CRC-INGEOMINAS, (2005).



La ecuación que se usa es la de Chezy con coeficiente de rugosidad de Manning. El procedimiento que se describe a continuación se puede aplicar a la sección transversal del río con o sin puente.

$$Q = \frac{1}{n} AR^{2/3} S^{1/2} \quad [\text{SI o, ST}] \dots\dots\dots 2.2$$

Dos casos se van a considerar dependiendo de la información disponible:

**a) Se conoce el caudal de estiaje ( $Q_e$ ) y el caudal de diseño ( $Q_d$ ) o el *NAME***

El proceso a seguir es el siguiente:

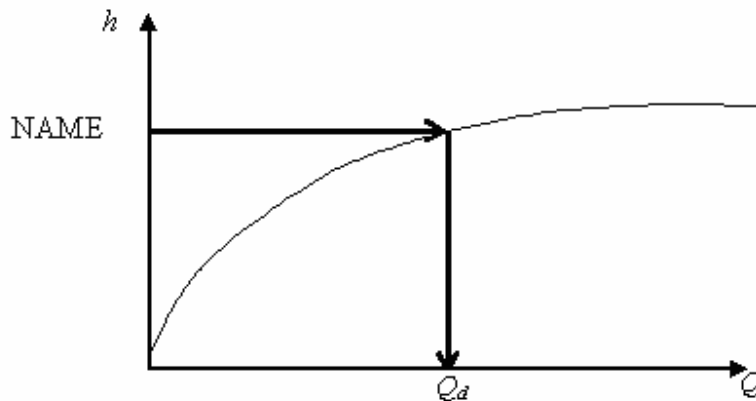
- Determinación de la sección transversal del cauce en época de estiaje.
- Determinación de la profundidad del agua ( $h$ ) en época de estiaje.
- Determinación del perímetro mojado de estiaje ( $P = f(h)$ ).
- Determinación del área mojada de estiaje ( $A = f(h)$ ).
- Determinación del radio hidráulico ( $R = A/P = f(h)$ ).
- Se afora el caudal de estiaje ( $Q_e$ ). El caudal se puede estimar por métodos directos aplicando la ecuación de continuidad de la vena líquida, conocidos el área mojada y la velocidad media de la corriente. La velocidad se puede determinar por medio de molinetes, flotadores, o trazadores.
- Se determina el coeficiente de distribución de gasto ( $\alpha$ ).

$$\alpha = \frac{Q_e}{AR^{2/3}} \dots\dots\dots 2.3$$

- Se considera  $\alpha$  constante para condiciones de estiaje y avenida.
- Con el coeficiente  $\alpha$  conocido, se determinan los caudales correspondientes a diferentes profundidades del agua ( $h$ ) incluyendo profundidades de creciente.

$$Q = \alpha AR^{2/3} = f(h) \dots\dots\dots 2.4$$

- Se grafica la curva de calibración que relaciona  $Q$  y  $h$ .
- Si el caudal de diseño ( $Q_d$ ) es conocido se determina el *NAME* correspondiente.
- Si el *NAME* es conocido, se determina el caudal de diseño ( $Q_d$ ) correspondiente.



**Figura 2.5 Curva de calibración de un río.**

**b) Se conoce la pendiente del cauce y el caudal de diseño ( $Q_d$ ) o el *NAME***

- Determinación de la sección transversal del cauce en época de estiaje.
- Estimación del coeficiente de rugosidad de Manning.
- Determinación de la pendiente longitudinal del cauce considerando un tramo de unos 200 m hacia aguas arriba y hacia aguas abajo del ponteadero.
- Se determina el coeficiente de distribución de gasto ( $\alpha$ ).

$$\alpha = \frac{S^{1/2}}{n} \dots\dots\dots 2.5$$

- Determinación de la profundidad del agua ( $h$ ) en época de estiaje.
- Determinación del perímetro mojado de estiaje ( $P = f(h)$ ).
- Determinación del área mojada de estiaje ( $A = f(h)$ ).
- Determinación del radio hidráulico ( $R = A/P = f(h)$ ).
- Determinación del caudal de estiaje ( $Q_e$ ) con la Ecuación 2.4
- Se considera  $\alpha$  constante para condiciones de estiaje y avenida.
- Con el coeficiente  $\alpha$  conocido, se determinan los caudales correspondientes a diferentes profundidades del agua ( $h$ ) incluyendo profundidades de creciente, usando la Ecuación 2.4
- Se grafica la curva de calibración que relaciona  $Q$  y  $h$ , Figura 2.5.
- Si el caudal de diseño ( $Q_d$ ) es conocido, se determina el *NAME* correspondiente.
- Si el *NAME* es conocido, se determina el caudal de diseño ( $Q_d$ ) correspondiente.

**2) Modelación hidráulica asumiendo flujo uniforme y dos secciones transversales**

Es recomendable trabajar con un mínimo de dos secciones transversales con el objeto de analizar el comportamiento del flujo al aproximarse a la estructura del puente. En este caso, se debe considerar una sección muy próxima a la cara aguas arriba y la otra separada una distancia de aproximadamente una luz del puente medida hacia aguas arriba, o donde se presuma que éste ya no ejerce más influencia sobre el flujo.

La experiencia ha demostrado, después de hacer varias evaluaciones de la hidráulica en la zona de puentes, que si se consideran estas secciones de manera independiente, el nivel del agua resultante en la sección aguas arriba está por debajo del nivel del agua en la sección del puente, lo cual no está de acuerdo con la teoría establecida para la condición de flujo subcrítico ni con lo que se observa en la práctica. Por esta razón, es conveniente buscar una forma de amarrar el funcionamiento hidráulico de las dos secciones estableciendo el control en la sección de aguas abajo. Con este propósito y tratando de simplificar la modelación de una forma lógica se ha procedido de la siguiente manera:

Se determina el caudal de diseño, se establece la pendiente media en un tramo representativo de al menos 200 m, se calculan los parámetros hidráulicos ( $A$ ,  $P$ ,  $R$ ,  $V$  y el  $NAME_p$  en la zona del puente, se estima el desnivel  $\Delta h$  que debe existir entre el nivel del agua en el puente y el nivel del agua en la sección transversal aguas arriba, donde,  $\Delta h = LS_p$ ,  $L$  es la distancia que separa las dos

secciones transversales y  $S_p$  es la pendiente media en el cauce. Adicionalmente, se establece el  $NAME_a$  en la sección de aguas arriba ( $NAME_a = NAME_p + \Delta h$ ). Finalmente, se debe iterar para el caudal de diseño hasta encontrar la pendiente correspondiente aguas arriba  $S_a$  y poder entonces determinar los parámetros hidráulicos en esta sección.

Este tipo de cálculos se puede realizar con la ayuda de programas de computador sencillos como HYDRAL o con una hoja electrónica.

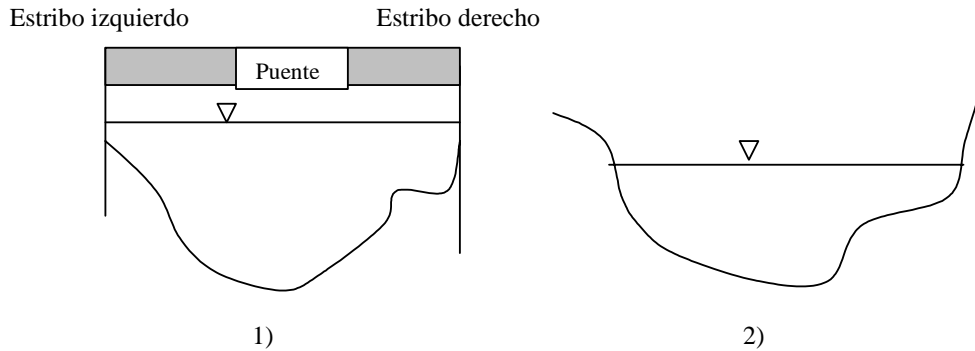


Figura 2.6 1) Sección transversal en el puente. 2) Sección transversal aguas arriba.

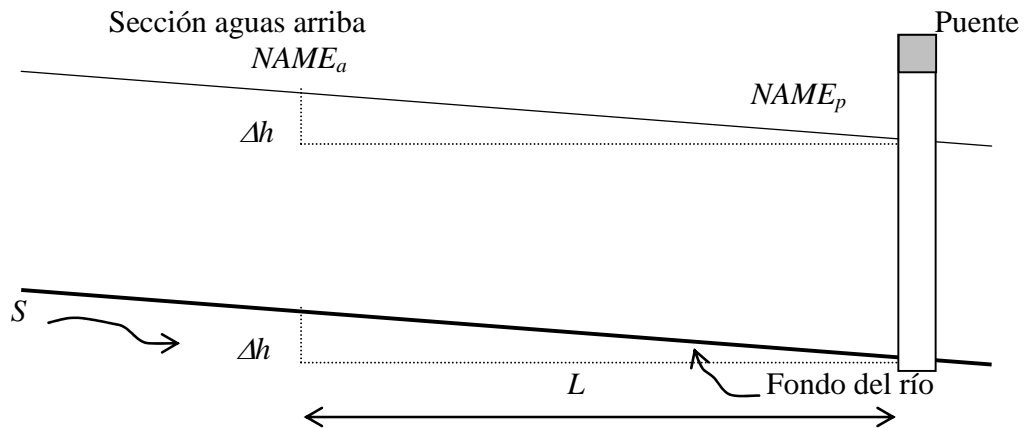


Figura 2.7 Perfil longitudinal.

### 3) Cálculo de la profundidad del remanso usando métodos empíricos

La determinación de la profundidad de remanso en un puente no es un cálculo simple independientemente del método que se use ya que muchas variables se encuentran involucradas en el análisis de un tramo de un río. A un nivel preliminar no es necesario considerar el efecto del remanso en la evaluación de la socavación de un puente. Sin embargo, un análisis completo de la

estabilidad de un puente debe incluir el cálculo de la curva de remanso para determinar los parámetros hidráulicos que afectan la profundidad de socavación.

Existen varios métodos para el cálculo de la altura de remanso considerando fijo el lecho del cauce como los desarrollados por el Departamento de Transportes de los Estados Unidos, (Bradley J. N., 1978 y Atala, C. G., 1979). Estos métodos aplican el principio de conservación de la energía entre secciones transversales situadas aguas arriba y aguas abajo del puente.

#### 4) Flujo variado

El programa HEC-RAS (<http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras>) fue desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros Militares de los Estados Unidos (Hydrologic Engineering Center - HEC), para realizar cálculos hidráulicos en una dimensión para sistemas de cauces naturales o artificiales (River Analysis System - RAS). HEC-RAS facilita el cálculo de perfiles del agua y de los parámetros hidráulicos del cauce; es una versión mejorada para Windows de versiones anteriores como WSPRO (Water Surface Profiles) y HEC-2.

La última versión del HEC-RAS es la 4 de 2006 y está en proceso de prueba. Esta es una versión que supera en gran medida la 3.1.3 publicada en el año 2005 y permite considerar cuatro grandes componentes de análisis:

- a) Curvas de remanso en flujo permanente
- b) Simulaciones con flujo no permanente
- c) Cálculos de transporte de sedimentos y fronteras móviles
- d) Análisis de calidad del agua

La versión del HEC-RAS 3.1.1 de 2003 es suficiente para modelar la hidráulica en la zona del puente con flujo permanente, subcrítico, supercrítico y mixto, en tramos de cauces con pendientes menores del 10%. También realiza cálculos de profundidades de socavación en puentes considerando socavación por contracción y local en estribos.

Entre otras aplicaciones de hidráulica, esta versión del HEC-RAS permite modelar una variedad de puentes con diferentes formas de pilas y estribos, y calcular parámetros hidráulicos tales como: niveles del agua, velocidades y área mojada para diferentes caudales en el sitio del ponteadero. El programa modela flujos bajos y altos. De acuerdo al caudal de escorrentía máximo estimado para el diseño, se puede determinar la estructura del puente más eficiente en cuanto a capacidad hidráulica, así como también controlar algunos parámetros de diseño hidráulico, (Medina E. y Castillo J., 1997).

El procedimiento de cálculo está fundamentado en la ecuación de la Energía donde las pérdidas por fricción son evaluadas mediante la Ecuación de Manning y las pérdidas por contracción y/o expansión son evaluadas teniendo en cuenta el cambio en la cabeza de velocidad. Para situaciones de flujos bajos donde el perfil del agua varía rápidamente debido a fuertes obstrucciones en el cauce, como sucede en algunos puentes o alcantarillas, se usa también la ecuación de Momentum o ecuación de Cantidad de Movimiento. Otras dos ecuaciones que maneja el programa para flujos bajos son de tipo semi-empírico como es la Ecuación de Yarnell y

una ecuación dada por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). Para flujos altos, el programa usa la ecuación de la energía, las ecuaciones de flujo a presión en orificios y compuertas, o las de flujo sobre vertederos.

Los datos requeridos para llevar a cabo esos cálculos son de tipo geométrico e hidráulico. Desde el punto de vista geométrico se requiere saber la topografía de las secciones transversales incluyendo el cauce principal y las laderas, considerando como mínimo cuatro secciones así: inmediatamente aguas arriba y aguas abajo del puente y a una distancia del puente aproximadamente igual a una vez su longitud total tanto hacia aguas arriba como hacia aguas abajo; longitud del tramo entre secciones transversales, coeficientes de pérdidas de energía (fricción, expansión y/o contracción), datos de la geometría del puente. Desde el punto de vista hidráulico se requiere saber el caudal y las condiciones de frontera como son la pendiente de la línea de energía, o el nivel del agua.

La Figura 2.8 ilustra la ubicación de las secciones transversales y el puente. La enumeración de las secciones transversales para usar el programa HEC-RAS debe hacerse desde aguas abajo hacia aguas arriba.

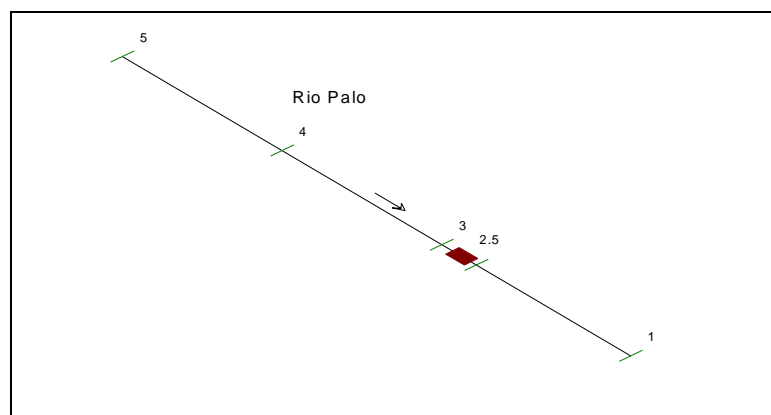


Figura 2.8 Ubicación de las secciones transversales. Medina, E. y Castillo J.,1997

- **Limitaciones del HEC-RAS**

- Flujo en una dimensión
- Pendientes bajas  $S < 10\%$ .

- **Selección del método de modelación hidráulica**

**a) Flujos bajos**

Agua por debajo de la parte inferior de la losa del puente.

**1) Ecuación de la energía**

Flujo gradualmente variado

**2) Ecuación de cantidad de movimiento**

Flujo gradualmente variado

Flujo rápidamente variado

- Ambos métodos consideran pérdidas por fricción y cambios en la geometría del puente.
- Ambos métodos modelan bien si predominan las pérdidas por fricción y el puente causa pequeña obstrucción, si el flujo pasa por la profundidad crítica en la vecindad del puente y para flujo subcrítico o supercrítico.
- La ecuación de cantidad de movimiento modela mejor cuando tanto las pérdidas por la pila y por fricción son predominantes, aunque cualquier método podría usarse.
- La ecuación de cantidad de movimiento es más aplicable si las pilas son el principal causante de pérdidas de energía y de los cambios en la superficie del agua.

## b) Flujos altos

Agua en contacto con la losa del puente.

### 1) Ecuación de la energía

### 2) Ecuación de orificios o vertederos

- Es preferible la ecuación de la energía en la mayoría de los casos.
- La ecuación de la energía se usa si la losa del puente causa pequeña obstrucción al flujo y la abertura no funciona como un orificio.
- Métodos de flujo a presión y vertedero se usan si la losa del puente causa obstrucción grande y remanso del flujo.
- Si el puente es sobrepasado y si la sumergencia no es muy grande deben usarse métodos de flujo a presión y en vertedero. Si la sumergencia es grande se usa la ecuación de la energía.
- Si el flujo es sumergido y la losa del puente no actúa como vertedero, debe usarse la ecuación de la energía.

• **Cálculo de perfiles de agua superficial:** los perfiles de agua superficial son calculados de una sección a otra resolviendo la ecuación de energía mediante un sistema de iteraciones “Método Directo por Pasos”, Chow, V. T. 1959). La pérdida de energía entre dos secciones está compuesta por pérdidas de fricción y contracción.

La determinación del transporte total y del coeficiente de velocidad para una sección transversal requiere que el flujo sea subdividido en unidades en las cuales la velocidad es uniformemente distribuida. El algoritmo utilizado por HEC-RAS, como mínimo, subdivide el flujo en las áreas del canal principal y las laderas derecha e izquierda, utilizando la entrada de los valores de coeficiente de Manning. El transporte del flujo es calculado para las subdivisiones con la siguiente forma de la Ecuación de Manning:

$$Q = KS_f^{1/2} \qquad K = \frac{1}{n} AR^{2/3}$$

$n$  = coeficiente de rugosidad de Manning para la subdivisión (adimensional)

$A$  = área del flujo para la subdivisión ( $m^2$ )

$R$  = radio hidráulico para la subdivisión (m)

$S_f$  = Pendiente hidráulica o de fondo (m/m)

$K$  = factor de transporte

El programa suma todos los transportes para obtener el transporte adecuado en la banca, la ladera derecha y la ladera izquierda. El cauce principal es usualmente analizado como un elemento singular. El transporte total para la sección transversal es obtenido al sumar los tres subdivisiones de transporte (izquierdo, derecho y canal principal).

**Coefficiente de Manning para el canal principal:** el flujo en el canal principal no se subdivide excepto cuando el coeficiente de rugosidad cambia en el área del canal o cuando se requieran parámetros hidráulicos puntuales. El programa determina si el valor de  $n$  que corresponde a la sección transversal puede ser subdividido o si el valor de  $n$  compuesto para el canal principal puede ser utilizado basado en el siguiente criterio:

Si la pendiente lateral del canal es más pronunciada que 5H:1V y el canal principal tiene más de un valor de  $n$ , se calcula automáticamente un valor de  $n_c$  compuesto. El modelo determina la rugosidad equivalente; existen muchas hipótesis para el cálculo de este parámetro Paulovskii, Muhlhofer, Banks, Lotter, entre otros. Además, usa las recomendaciones de Horton y Einstein que se basa en el supuesto de considerar que cada sub-área tiene la misma velocidad e igual a la velocidad media de la sección, con lo cual se obtiene la siguiente ecuación:

$$n_c = \frac{\sum (P_i \cdot n_i^{1.5})^{2/3}}{\sum P_i}$$

$n_c$  = coeficiente de rugosidad compuesta o equivalente

$n_i$  = coeficiente de rugosidad para la subdivisión  $i$

$P_i$  = perímetro mojado para la subdivisión  $i$

El procedimiento coincide en dividir la sección hidráulica en las partes que sean necesarias y asignarles un valor de “ $n$ ” de rugosidad según corresponda a su naturaleza física de oposición al flujo. Como las secciones están geoméricamente definidas, el modelo evalúa con la fórmula anterior el valor de rugosidad equivalente, (Ver Parte II sobre Transporte de Sedimentos).

**Evaluación de la cabeza principal de energía cinética:** debido a que el programa HEC-RAS está desarrollado para perfiles de agua superficial, solamente una superficie de agua y una carga de energía se computan en cada sección transversal. Para una elevación de agua superficial dada, la energía principal es obtenida al realizar el cálculo con ponderación de las  $N$  subsecciones en la sección transversal. (Ladera derecha, izquierda y canal principal).

**Evaluación de pérdidas por fricción:** las pérdidas por fricción son evaluadas por HEC-RAS como el producto de  $S_f$  y  $L$ , donde  $S_f$  es el gradiente de fricción y  $L$  es la distancia ponderada para el tramo de análisis. El gradiente de fricción (pendiente de la línea de energía) para cada sección transversal es estimada con la ecuación de Manning.

**Evaluación de contracciones y expansiones:** el programa asume que una contracción está ocurriendo cuando la cabeza de velocidad aguas abajo es mayor que la cabeza de velocidad aguas arriba. De igual manera, cuando la cabeza de velocidad aguas arriba es mayor que la cabeza de velocidad aguas abajo, el programa asume que una expansión del flujo está ocurriendo.

- **Condiciones de frontera**

Cuatro son las condiciones de frontera disponibles en el modelo del HEC-RAS

- Nivel del agua
- Profundidad crítica
- Gradiente hidráulico
- Curva de calibración

- **Controles en el flujo**

El HEC RAS requiere la determinación de la ubicación de los controles dependiendo del tipo de flujo asumido

- Flujo subcrítico.  $Fr < 1$ : control del flujo aguas abajo.
- Flujo supercrítico.  $Fr > 1$ : control del flujo aguas arriba.
- Flujo crítico.  $Fr = 1$ : control del flujo aguas abajo y aguas arriba.