

LIBRO: PRY. PROYECTO
TEMA: CAR. Carreteras
PARTE: 1. ESTUDIOS
TÍTULO: 06. Estudios Hidráulico-Hidrológicos para Puentes
CAPÍTULO: 005. Análisis Hidráulicos

A. CONTENIDO

Este Manual contiene los procedimientos para realizar los análisis hidráulicos a que se refiere la Norma N·PRY·CAR·1·06·005, *Análisis Hidráulicos*, para determinar los gastos y sus correspondientes niveles, tirantes y velocidades, con los periodos de retorno que se establezcan conforme a lo indicado en la Cláusula D. de la Norma N·PRY·CAR·1·06·004, *Análisis Hidrológicos*, que se utilizan para el diseño hidráulico de un puente, con el propósito de elaborar el estudio hidráulico-hidrológico para puentes que realice la Secretaría con recursos propios o mediante un Contratista de Servicios.

B. REFERENCIAS

Este Manual se complementa con las siguientes:

NORMAS Y MANUALES	DESIGNACIÓN
Ejecución de Estudios Hidráulico-Hidrológicos para Puentes	N·PRY·CAR·1·06·001
Trabajos de Campo	N·PRY·CAR·1·06·002
Análisis Hidrológicos	N·PRY·CAR·1·06·004
Análisis Hidráulicos	N·PRY·CAR·1·06·005
Procesamiento de Información	M·PRY·CAR·1·06·003
Análisis Hidrológicos	M·PRY·CAR·1·06·004

C. ANÁLISIS HIDRÁULICOS

Para obtener los gastos, tirantes y velocidades en los diferentes tramos de cada sección hidráulica levantada conforme a lo indicado en la Fracción D.6. de la Norma N·PRY·CAR·1·06·002, *Trabajos de Campo*, así como el gasto total del flujo, que correspondan al nivel alcanzado por el agua en el cauce durante la creciente máxima de que se tenga noticia; se calculan los gastos, niveles, tirantes y velocidades en dichos tramos, que correspondan a los gastos máximos obtenidos según se indica en la Norma N·PRY·CAR·1·06·005, *Análisis Hidráulicos*; se determina el comportamiento hidráulico de los puentes cercanos que se hayan levantado; y se selecciona el gasto de diseño (Q_{DI}) que se utilizará para el diseño hidráulico del puente. El Ingeniero o Contratista de Servicios realizará los análisis hidráulicos aplicando los procedimientos que se describen en este Manual, comprobando previamente que las secciones sean normales respecto a la dirección del escurrimiento en crecientes extraordinarias, que estén ubicadas en tramos del cauce preferentemente rectos, sin cambios de pendiente y que no se alojen en sitios donde existan pozas.

D. DETERMINACIÓN DE LOS GASTOS, TIRANTES Y VELOCIDADES CORRESPONDIENTES AL NIVEL ALCANZADO POR EL AGUA EN EL CAUCE DURANTE LA CRECIENTE MÁXIMA DE QUE SE TENGA NOTICIA

Para calcular en cada sección hidráulica los gastos, tirantes y velocidades en sus diferentes tramos, así como el gasto total del flujo, correspondientes al nivel alcanzado por el agua en el cauce durante la crecienete máxima de que se tenga noticia, se procede como se indica a continuación:

D.1. DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE LA SECCIÓN HIDRÁULICA

De cada tramo de una sección hidráulica, se determinan las características geométricas que se indican enseguida:

- Los tirantes (y), en m, definidos por la diferencia entre el nivel alcanzado por el agua y el nivel del cauce en cada tramo de la sección hidráulica.
- El área hidráulica (A_h), en m^2 , por la que escurre el flujo, definida por el nivel alcanzado por el agua en el cauce, la longitud del tramo y el perfil del terreno natural dentro del mismo.
- El perímetro mojado (P_m), en m, definido por la longitud del fondo del cauce que tiene contacto con el agua en cada tramo de la sección hidráulica.
- El radio hidráulico (R_h), en m, determinado mediante la relación del área hidráulica entre el perímetro mojado de cada tramo de la sección hidráulica ($R_h = A_h/P_m$).

La determinación de las características geométricas de la sección hidráulica se puede realizar mediante una hoja de cálculo como la mostrada en la Tabla 1 de este Manual, en la que se ejemplifica el cálculo para la sección hidráulica que se muestra en la Figura 1 de este Manual.

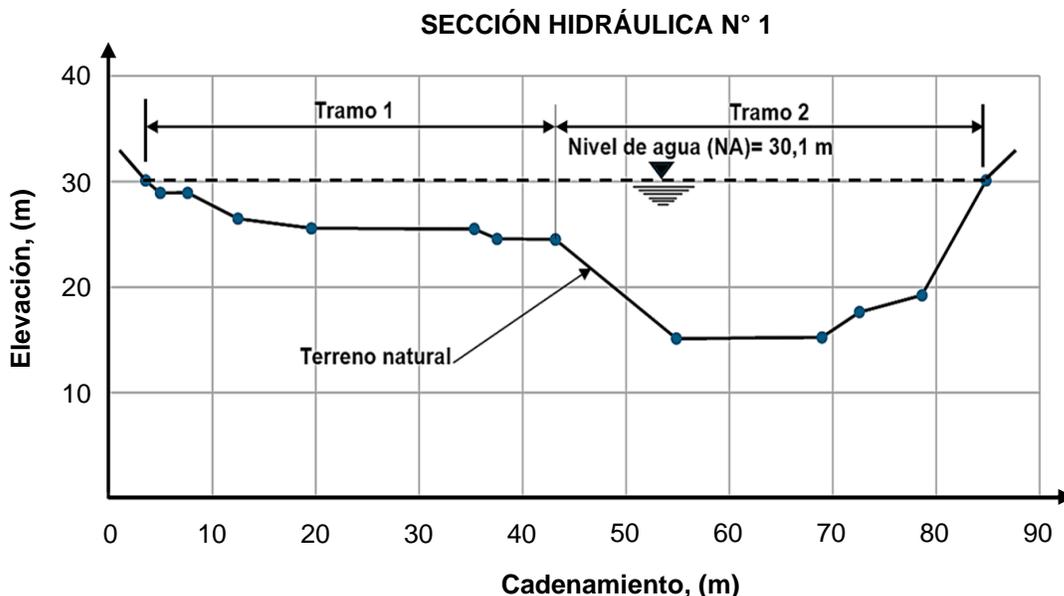


FIGURA 1.- Ejemplo de una sección hidráulica

TABLA 1.- Ejemplo del cálculo de las características geométricas de una sección hidráulica

Sección hidráulica N° 1										
NIVEL DEL AGUA (N/A) = 30,1 m										
Tramo j	Cadena- miento C_N m	Longitud L_i m	Elevación del terreno E_N m	Desnivel h_i m	Tirante y_N m	Área hidráulica A_{hi} m ²	Área Hidráulica del tramo A_{hj} m ²	Perímetro mojado P_{mi} m	Perímetro mojado del tramo P_{mj} m	Radio hidráulico del tramo R_{hj} m
1	3,52	---	30,10	---	0,00	---	---	---	---	---
	4,94	1,42	28,92	1,18	1,18	0,84	---	1,85	---	---
	7,58	2,64	28,93	0,01	1,17	3,10	---	2,64	---	---
	12,46	4,88	26,49	2,44	3,61	11,66	---	5,46	---	---
	19,57	7,11	25,57	0,92	4,53	28,94	---	7,17	---	---
	35,31	15,74	25,51	0,06	4,59	71,77	---	15,74	---	---
	37,52	2,21	24,56	0,95	5,54	11,19	---	2,41	---	---
	43,15	5,63	24,52	0,04	5,58	31,30	158,81	5,63	40,89	3,88
	43,15	0,00	24,52	0,00	5,58	0,00	---	0,00	---	---
	54,86	11,71	15,13	9,39	14,97	120,32	---	15,01	---	---
2	68,94	14,08	15,24	0,11	14,86	210,00	---	14,08	---	---
	72,57	3,63	17,63	2,39	12,47	49,60	---	4,35	---	---
	78,61	6,04	19,22	1,59	10,88	70,52	---	6,25	---	---
	84,82	6,21	30,10	10,88	0,00	33,78	484,23	12,53	52,21	9,27

$$L_i = C_N - C_{N-1} \quad h_i = |E_N - E_{N-1}| \quad y_N = NA - E_N \quad A_{hi} = L_i \times [y_N + y_{N-1}] / 2 \quad A_{hj} = \Sigma A_{hi} \text{ del tramo } j$$

$$P_{mi} = \sqrt{L_i^2 + h_i^2} \quad P_{mj} = \Sigma P_{mi} \text{ del tramo } j \quad R_{hj} = A_{hj} / P_{mj}$$

D.2. PENDIENTES HIDRÁULICAS MEDIAS DEL CAUCE PRINCIPAL

A partir de los puntos nivelados del perfil de la pendiente geométrica o hidráulica, levantado de acuerdo con lo indicado en la Fracción D.5. de la Norma N-PRY-CAR-1-06-002, *Trabajos de Campo*, se determinan las pendientes hidráulicas medias del cauce principal como sigue:

- D.2.1.** Se calcula la pendiente geométrica media o la pendiente hidráulica media, en 200 m o 2 veces el ancho del cauce, lo que resulte mayor, aguas arriba de cada sección hidráulica considerada, determinando el promedio pesado de las pendientes calculadas entre los puntos nivelados utilizando la siguiente expresión:

$$\bar{S} = \frac{\sum_{i=2}^N S_i \times d_i}{\sum_{i=2}^N d_i}$$

Donde:

\bar{S} = Pendiente geométrica media o pendiente hidráulica media, (adimensional), con aproximación al diezmilésimo

S_i = Pendiente entre dos puntos contiguos nivelados, (adimensional), con aproximación al diezmilésimo, obtenida mediante la siguiente expresión:

$$S_i = \frac{h_i}{L_i}$$

d_i = Distancia entre dos puntos contiguos nivelados, (m), obtenida mediante la siguiente expresión:

$$d_i = \sqrt{L_i^2 + h_i^2}$$

L_i = Longitud horizontal entre dos puntos contiguos nivelados, que determinan la pendiente S_i , (m)

h_i = Desnivel entre dos puntos contiguos nivelados, que determinan la pendiente S_i , (m)

N = Número de puntos contiguos nivelados para calcular la pendiente media, (adimensional)

- D.2.2.** El cálculo de la pendiente geométrica media o de la pendiente hidráulica media puede efectuarse empleando una hoja de cálculo como la mostrada en la Tabla 2 de este Manual, en la que se ejemplifica el cálculo para el perfil que define la pendiente geométrica que se muestra en la Figura 2 de este Manual.

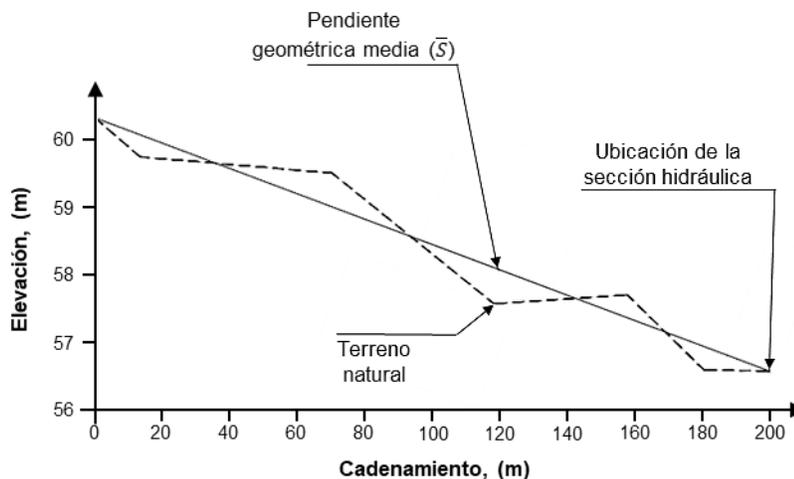


FIGURA 2.- Ejemplo de un perfil que define la pendiente geométrica de un cauce

TABLA 2.- Ejemplo del cálculo de la pendiente geométrica media

Punto <i>N</i>	Cadena- miento <i>C_N</i> m	Longitud <i>L_i</i> m	Elevación <i>E_N</i> m	Desnivel <i>h_i</i> m	Distancia <i>d_i</i> m	<i>S_i</i>	<i>S_i × d_i</i>
1	0	---	60,32	---	---	---	---
2	20	20	59,66	0,66	20,01	0,033 0	0,66
3	40	20	59,43	0,23	20,00	0,011 5	0,23
4	60	20	59,27	0,16	20,00	0,008 0	0,16
5	80	20	59,14	0,13	20,00	0,006 5	0,13
6	100	20	58,55	0,59	20,01	0,029 5	0,59
7	120	20	57,62	0,93	20,02	0,046 5	0,93
8	140	20	57,48	0,14	20,00	0,007 0	0,14
9	160	20	57,35	0,13	20,00	0,006 5	0,13
10	180	20	56,54	0,81	20,02	0,040 5	0,81
11	200	20	56,52	0,02	20,00	0,001 0	0,02
Sumas:				$\sum d_i =$	200,06	$\sum S_i d_i =$	3,80
				Pendiente media (\bar{S}) =		$\frac{\sum S_i \times d_i}{\sum d_i} =$	0,019 0
$L_i = C_N - C_{N-1}$		$h_i = E_{N-1} - E_N$		$d_i = \sqrt{L_i^2 + h_i^2}$		$S_i = \frac{h_i}{L_i}$	

D.2.3. Para el cálculo de la pendiente geométrica media, no se podrán utilizar puntos nivelados que correspondan a pozas o caídas debidas a la extracción de material o a depósitos de materiales.

D.2.4. Si el valor de la pendiente geométrica media o la pendiente hidráulica media resulta igual a 2 % o menor, se calculan las velocidades de la corriente en cada tramo mediante el método de Manning, indicado en la Fracción D.5. de este Manual. Si es mayor de 2 %, dicho método no proporciona valores confiables, por lo que se determina la velocidad de la corriente en canales prismáticos por el método directo por pasos y en canales no prismáticos por el método estándar por pasos, según se indica en las Fracciones H.1 e I.1 de este Manual, respectivamente.

D.3. COEFICIENTES DE RUGOSIDAD

Utilizando la información contenida en el estudio geológico, con apoyo en el informe fotográfico, las fotografías aéreas y las cartas topográficas, geológicas, edafológicas y de uso de suelo, a que se refieren las Fracciones D.2. y D.3., así como el Inciso E.1.1. de la Norma N-PRY-CAR-1-06-001, *Ejecución de Estudios Hidráulico-Hidrológicos para Puentes*, y con base en los datos recabados durante el reconocimiento de campo conforme a lo indicado en el Inciso C.2.3. de la Norma N-PRY-CAR-1-06-002, *Trabajos de Campo*; para cada tramo de las diferentes secciones hidráulicas levantadas como se indica en la Fracción D.6. de dicha Norma, se determina su coeficiente de rugosidad de Manning (*n*), el cual define el grado de influencia sobre la velocidad del escurrimiento que tienen las condiciones del cauce y sus llanuras de inundación, tales como las características de los materiales que los constituyen, de la vegetación, del uso de suelo y del tirante de agua, utilizando los valores que se indican en las Tablas 3, 4, 5 y 6 de este Manual.

TABLA 3.- Coeficientes de rugosidad de Manning (n) para conductos cerrados, operados parcialmente llenos

Tipo de suelo y condiciones del cauce	Coeficientes de rugosidad n		
	Mínimo	Normal	Máximo
a) Cemento:			
1. Pulido	0,010	0,011	0,013
2. En mortero	0,011	0,013	0,015
b) Concreto:			
1. Alcantarilla recta y libre de azolve	0,010	0,011	0,013
2. Alcantarilla con curvas, conexiones y algunos azolvamientos	0,011	0,013	0,014
3. Bien terminado, libre de irregularidades	0,011	0,012	0,014
4. Alcantarilla recta, con pozos de visita o entradas	0,013	0,015	0,017
5. Colado en molde de acero, sin acabado	0,012	0,013	0,014
6. Colado en molde de madera, sin acabado	0,012	0,014	0,016
7. Colado en molde de madera rugosa, sin acabado	0,015	0,017	0,020
c) Alcantarillado sanitario, cubierto de lama de desechos, con curvas y conexiones	0,012	0,013	0,016
d) Alcantarillado pavimentado en el fondo, con fondo liso	0,016	0,019	0,020
e) Mampostería de piedra pequeña cementada en las juntas	0,018	0,025	0,030

TABLA 4.- Coeficientes de rugosidad de Manning (n) para canales recubiertos o revestidos

Tipo y descripción del canal	Coeficientes de rugosidad n		
	Mínimo	Normal	Máximo
a) Concreto:			
1. Acabado con llana metálica	0,011	0,013	0,015
2. Acabado con llana de madera	0,013	0,015	0,016
3. Acabado con grava en el fondo	0,015	0,017	0,020
4. Sin acabado	0,014	0,017	0,020
5. Lanzado, sección buena	0,016	0,019	0,023
6. Lanzado, sección ondulada	0,018	0,022	0,025
7. Sobre roca bien excavada	0,017	0,020	---
8. Sobre roca irregularmente excavada	0,022	0,027	---
b) Fondo de concreto acabado con llana, bordos de:			
1. Piedra acomodada sobre mortero	0,015	0,017	0,020
2. Mampostería de piedra mal acomodada sobre mortero	0,017	0,020	0,024
3. Mampostería de piedra pequeña, cementada y repellada	0,016	0,020	0,024
4. Mampostería de piedra pequeña cementada	0,020	0,025	0,030
5. Mampostería seca de piedra pequeña, o zampeado	0,020	0,030	0,035
c) Fondo de grava con taludes de:			
1. Concreto colado en moldes	0,017	0,020	0,025
2. Piedra mal acomodada en mortero	0,020	0,023	0,026
3. Mampostería seca de piedra pequeña, o zampeado	0,023	0,033	0,036
d) Ladrillo:			
1. Vitricota	0,011	0,013	0,015
2. Con mortero de cemento	0,012	0,015	0,018

(Continúa Tabla 4)

TABLA 4.- Coeficientes de rugosidad de Manning (n) para canales recubiertos o revestidos (Continuación)

Tipo y descripción del canal	Coeficientes de rugosidad n		
	Mínimo	Normal	Máximo
e) Mampostería de piedra:			
1. Pequeña, cementada	0,017	0,025	0,030
2. Pequeña, seca	0,023	0,032	0,035
f) Piedra labrada	0,013	0,015	0,017
g) Asfalto:			
1. Liso	0,013	0,013	---
2. Rugoso	0,016	0,016	---
h) Cubierta vegetal	0,030	---	0,500
i) Suelo-cemento	0,015	0,016	0,017

TABLA 5.- Coeficientes de rugosidad de Manning (n) para canales excavados o dragados en diferentes tipos de suelo

Tipo y descripción del canal	Coeficientes de rugosidad n		
	Mínimo	Normal	Máximo
a) Tierra, recto y uniforme:			
1. Limpio, recientemente terminado	0,016	0,018	0,020
2. Limpio, después de intemperizado	0,018	0,022	0,025
3. Grava, sección uniforme y limpia	0,022	0,025	0,030
4. Con poco pasto y poca hierba	0,022	0,027	0,033
b) Tierra, sinuoso, flujo con poca velocidad:			
1. Sin vegetación	0,023	0,025	0,030
2. Pasto, algo de hierba	0,025	0,030	0,033
3. Hierba densa o plantas acuáticas en canales profundos	0,030	0,035	0,040
4. Fondo de tierra y mampostería en los bordos	0,028	0,030	0,035
5. Fondo rocoso y hierba en los bordos	0,025	0,035	0,040
6. Fondo empedrado y bordos limpios	0,030	0,040	0,050
c) Excavado o dragado en línea recta:			
1. Sin vegetación	0,025	0,028	0,033
2. Pocos arbustos en los bordos	0,035	0,050	0,060
d) Cortado en roca:			
1. Liso y uniforme	0,025	0,035	0,040
2. Con salientes agudas e irregulares	0,035	0,040	0,050
e) Canales abandonados, hierbas y arbustos sin cortar:			
1. Hierba densa, tan alta como el nivel del agua	0,050	0,080	0,120
2. Fondo limpio, arbustos en las orillas	0,040	0,050	0,080
3. Igual al anterior, con máximo nivel del agua	0,045	0,070	0,110
4. Arbustos densos, altos niveles del agua	0,080	0,100	0,140

TABLA 6.- Coeficientes de rugosidad de Manning (n) para cauces naturales

Tipo y descripción del cauce	Coeficientes de rugosidad n		
	Mínimo	Normal	Máximo
A. Arroyos (ancho de la superficie libre del agua en avenidas < 30 m):			
a) Corriente con planicie:			
1. Limpios, rectos, sin deslaves ni estancamientos profundos, tirante alto	0,025	0,030	0,033
2. Igual al anterior, pero más rocoso y con hierba	0,030	0,035	0,040
3. Limpios, sinuosos, algunas irregularidades en el fondo	0,033	0,040	0,045
4. Igual al anterior, algo de hierba y rocas	0,035	0,045	0,050
5. Igual al anterior, pero menor profundidad y secciones poco eficaces	0,040	0,048	0,055
6. Igual que el 4, pero con más piedras	0,045	0,050	0,060
7. Tramos irregulares con hierba y estancamientos profundos	0,050	0,070	0,080
8. Tramos con mucha hierba, estancamientos profundos, cauces de inundación con raíces y plantas subacuáticas	0,075	0,100	0,150
b) Corrientes de montaña, sin vegetación en el cauce, bordos muy inclinados, árboles y arbustos a lo largo de las márgenes, que quedan sumergidos durante las inundaciones:			
1. Fondo de grava, boleó y algunos cantos rodados	0,030	0,040	0,050
2. Fondo de boleó y grandes rocas	0,040	0,050	0,070
B. Planicies de inundación:			
a) Pastura sin arbustos:			
1. Pasto bajo	0,025	0,030	0,035
2. Pasto alto	0,030	0,035	0,050
b) Áreas de cultivo:			
1. Sin cultivo	0,020	0,030	0,040
2. Cultivo maduro en surcos	0,025	0,035	0,045
3. Cultivo maduro en campo	0,030	0,040	0,050
c) Arbustos:			
1. Arbustos escasos y mucha hierba	0,035	0,050	0,070
2. Pocos arbustos y árboles, en invierno	0,035	0,050	0,060
3. Pocos arbustos y árboles, en verano	0,040	0,060	0,080
4. Mediana y densa población de arbustos, en invierno	0,045	0,070	0,110
5. Mediana y densa población de arbustos, en verano	0,070	0,100	0,160
d) Árboles:			
1. Población densa de sauces en verano, rectos	0,110	0,150	0,200
2. Terrenos talados con troncos muertos	0,030	0,040	0,050
3. Igual al anterior, pero con troncos retoñados	0,050	0,060	0,080
4. Gran concentración de madera, algunos árboles caídos, pocos de escaso crecimiento, nivel de inundación debajo a las ramas	0,080	0,100	0,120
5. Igual al anterior, pero el nivel de inundación alcanza las ramas	0,100	0,120	0,160
C. Ríos (ancho de la superficie libre del agua en avenidas > 30 m.). El valor de n es menor que en los arroyos de igual descripción, pero donde los bordos ofrecen menor resistencia:			
a) Secciones regulares sin cantos rodados ni arbustos	0,025		0,060
b) Secciones rugosas e irregulares	0,035		0,100

D.4. FUNCIONAMIENTO HIDRÁULICO DEL CAUCE PRINCIPAL

De existir dentro de la cuenca zonas bajas, almacenamientos de agua u otras obras que influyan en el funcionamiento hidráulico del cauce principal, con base en los datos de campo a que se refiere el Inciso C.2.4. de la Norma N-PRY-CAR-1-06-0002, *Trabajos de Campo*, se determinan los efectos de regulación o control del flujo que dichas zonas u obras tienen en el cauce principal.

D.5. DETERMINACIÓN DE LAS VELOCIDADES EN LA SECCIÓN HIDRÁULICA

Una vez determinadas las características geométricas de una sección hidráulica, como se indica en la Fracción D.1. de este Manual, se calculan las velocidades de la corriente en cada tramo, mediante el método de Manning si la pendiente geométrica media o la pendiente hidráulica media es igual a 2 % o menor, de lo contrario, las velocidades han de ser estimadas utilizando mediciones con molinetes o cuerpos flotantes, que puedan haberse realizado durante la creciente máxima en el sitio en estudio o en alguna estación de aforo cercana, o de acuerdo con las características de los arrastres.

La velocidad del flujo para cada tramo de una sección hidráulica mediante el método de Manning se determina con la siguiente expresión:

$$V_j = \frac{R_{hj}^{2/3} \sqrt{\bar{S}}}{n_j}$$

Donde:

V_j = Velocidad de la corriente en el tramo j , (m/s)

R_{hj} = Radio hidráulico del tramo j , (m)

\bar{S} = Pendiente hidráulica media aguas arriba del sitio donde se ubique la sección hidráulica, determinada como se indica en el Inciso D.2.1. de este Manual, con aproximación al diezmilésimo, (adimensional)

n_j = Coeficiente de rugosidad de Manning del tramo j , determinado según se indica en la Fracción D.3. de este Manual, (adimensional)

Para determinar las velocidades de la corriente en cada tramo de una sección hidráulica mediante el método de Manning, se puede utilizar una hoja de cálculo como la mostrada en la Tabla 7 de este Manual, en la que se ejemplifican las determinaciones correspondientes a la sección hidráulica mostrada en la Figura 1 de este Manual, suponiendo para dicho ejemplo una pendiente hidráulica media (\bar{S}) de 0,001 y coeficientes de rugosidad (n) de 0,060 para el tramo 1 y de 0,045 para el tramo 2.

D.6. DETERMINACIÓN DE LOS GASTOS DE LA SECCIÓN HIDRÁULICA

Una vez calculadas las velocidades de la corriente en todos los tramos de una sección hidráulica, se determinan los gastos correspondientes aplicando la ecuación de continuidad, mediante la siguiente expresión:

$$Q_j = A_{hj} \times V_j$$

Donde:

Q_j = Gasto parcial en cada tramo j considerado, (m³/s)

A_{hj} = Área hidráulica en cada tramo j considerado, (m²)

V_j = Velocidad de la corriente en cada tramo j considerado, (m/s)

Posteriormente, los gastos parciales se suman para obtener el gasto total de la sección hidráulica analizada, mediante la siguiente expresión:

$$Q_{tot} = \sum_{j=1}^M Q_j$$

Donde:

Q_{tot} = Gasto total en la sección hidráulica, (m³/s)

Q_j = Gasto parcial en cada tramo j considerado, (m³/s)

M = Número de tramos de la sección hidráulica, (adimensional)

En la Tabla 7 de este Manual se muestra el cálculo de las velocidades y los gastos para la sección hidráulica mostrada en la Figura 1 de este Manual.

TABLA 7.- Ejemplo de cálculo de la velocidad y el gasto del flujo en una sección hidráulica

Sección hidráulica N°1						
Tramo j	A_{hj} m ²	R_{hj} m	n_j	$R_{hj}^{2/3}$	V_j m/s	Q_j m ³ /s
1	158,81	3,88	0,060	2,47	1,30	206,67
2	484,23	9,27	0,045	4,41	3,10	1 501,62
$Q_{tot} = \sum Q_j =$						1 708,29
$\bar{S} = 0,001$		$V_j = \frac{R_{hj}^{2/3} \sqrt{\bar{S}}}{n_j}$			$Q_j = A_{hj} \times V_j$	

D.7. SELECCIÓN DEL GASTO MÁXIMO OBSERVADO

Los gastos totales calculados para cada sección hidráulica, correspondientes a la creciente máxima de que se tenga noticia, no se promediarán ni se forzarán para que coincidan, sino que se elegirá como gasto máximo observado en campo (Q_{MOC}) el obtenido para la sección donde el nivel alcanzado por el agua en el cauce, durante la creciente máxima de que se tenga noticia, sea más confiable. Si los gastos son semejantes, puede seleccionarse el calculado para la sección del cruce, junto con los gastos y las velocidades parciales de cada tramo de esa sección.

E. DETERMINACIÓN DE LOS NIVELES, TIRANTES Y VELOCIDADES CORRESPONDIENTES A LOS GASTOS DE CONSTRUCCIÓN (Q_{CO}), TEÓRICO DE DISEÑO (Q_{TDI}) Y COMPLEMENTARIOS (Q_{500} Y Q_{1000})

El cálculo de los niveles, tirantes, gastos y velocidades en los diferentes tramos de la sección hidráulica de cruce, que se tendrán con los gastos de construcción (Q_{CO}), de diseño (Q_{DI}) y complementarios (Q_{500} y Q_{1000}), que corresponden a los gastos obtenidos como se indica en el Manual M-PRY-CAR-1-06-004, *Análisis Hidrológicos*, para los periodos de retorno establecidos conforme a lo indicado en la Cláusula D. de la Norma N-PRY-CAR-1-06-004, *Análisis Hidrológicos*, se hace pasando estos gastos por dicha sección.

Para pasar el gasto por la sección hidráulica se procede por tanteos, para lo que se propone un nivel del agua y siguiendo el procedimiento indicado en las Fracciones D.1., D.5. y D.6. de este Manual, se calcula el gasto total que corresponda a dicho nivel. Si el gasto calculado no es el gasto esperado, se repite el proceso proponiendo otros niveles del agua hasta que, a juicio del Ingeniero o Contratista de Servicios, ambos gastos sean lo suficientemente cercanos. Se consideran como nivel del agua, tirantes, gastos y velocidades en cada tramo de la sección, correspondientes al gasto transitado por ella, los determinados en el último tanteo.

Cuando las características del cruce y cauce en estudio lo ameriten, los parámetros hidráulicos (niveles de agua, gasto y velocidad de diseño) podrán obtenerse mediante perfiles de flujo e incluso con herramientas de cómputo que permitan modelar el comportamiento del flujo en cauces naturales, artificiales o a través de estructuras hidráulicas.

F. DETERMINACIÓN DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE PUENTES CERCANOS

Cada uno de los puentes cercanos sobre la misma corriente que la del sitio en estudio, se analiza según lo establecido en la Fracción C.7. de la Norma N-PRY-CAR-1-06-005, *Análisis Hidráulicos*.

G. SELECCIÓN DEL GASTO DE DISEÑO

Para seleccionar el gasto de diseño (Q_{DI}), que determina los tirantes correspondientes al nivel de aguas de diseño (NADI) y que se ha de utilizar en el diseño hidráulico del puente, se procede como se indica a continuación:

- G.1.** El gasto máximo observado en campo (Q_{MOC}), determinado como se indica en la Cláusula D. de este Manual, se ajusta al periodo de retorno para el que se calculó el gasto teórico de diseño (Q_{TDI}), de la siguiente manera:

- G.1.1.** Con el valor del periodo de retorno estimado conforme a lo indicado en el Inciso C.2.7. de la Norma N-PRY-CAR-1-06-002, *Trabajos de Campo*, para la creciente máxima de que se tenga noticia, en la gráfica de gastos máximos-periodos de retorno que se refiere en la Fracción D.2. del Manual M-PRY-CAR-1-06-003, *Procesamiento de Información*, así como en los Incisos D.1.4. y D.2.7. del Manual M-PRY-CAR-1-06-004, *Análisis Hidrológicos*, según el método empleado para su elaboración, se determina el gasto teórico para ese periodo de retorno (Q_T) y se calcula el factor de ajuste con la siguiente expresión:

$$Fa = \frac{Q_T}{Q_{TDI}}$$

Donde:

Fa = Factor de ajuste, adimensional

Q_T = Gasto teórico determinado en la gráfica de gastos máximos-periodos de retorno, para el periodo de retorno estimado para la creciente máxima de que se tenga noticia, (m^3/s)

Q_{TDI} = Gasto teórico de diseño, (m^3/s)

- G.1.2.** El gasto máximo observado en campo ajustado (Q_{MOC}'), se obtiene con la siguiente expresión:

$$Q_{MOC}' = Fa \times Q_{MOC}$$

Donde:

Q_{MOC}' = Gasto máximo observado en campo, ajustado al periodo de retorno para el que se calculó el gasto teórico de diseño, Q_{TDI} , (m^3/s)

Fa = Factor de ajuste, (adimensional)

Q_{MOC} = Gasto máximo observado en campo, determinado como se indica en la Cláusula D. de este Manual, (m^3/s)

- G.1.3.** Se comparan el gasto máximo observado en campo ajustado (Q_{MOC}') y el gasto teórico de diseño (Q_{TDI}), seleccionando como el gasto de diseño (Q_{DI}) que se ha de utilizar en el diseño hidráulico del puente el que resulte mayor.

- G.2.** Se valoran los impactos estructurales y económicos que, en el puente por diseñar, tendrían los gastos complementarios (Q_{500} y Q_{1000}), considerando sus niveles y velocidades. Si los impactos no son significativos, puede elegirse alguno de estos gastos como gasto de diseño (Q_{DI}), con lo que se aumenta considerablemente la seguridad de la estructura.
- G.3.** Si el gasto seleccionado como se indica en la Fracción anterior no es el gasto de diseño (Q_{DI}), los niveles, tirantes, gastos y velocidades en los diferentes tramos de la sección hidráulica de cruce, que se han de utilizar en el diseño hidráulico del puente, se determinan haciendo pasar el gasto seleccionado por esa sección, procediendo por tanteos como se indica en la Cláusula E. de este Manual.

H. CÁLCULO DEL FLUJO EN CANALES PRISMÁTICOS

El procedimiento para calcular el flujo en un canal prismático consiste en aplicar, de forma reiterada, la ecuación de la energía a distintos tramos del canal, hasta la integración numérica de la ecuación dinámica del flujo gradualmente variado. El cálculo se inicia en una sección de control y continúa en la dirección contraria al flujo cuando es subcrítico y en la misma dirección del flujo cuando es supercrítico. El cálculo termina en el otro extremo del cauce en la que se satisfaga alguna condición particular (salto hidráulico, energía constante, entre otras) o cuando se aproxime asintóticamente al tirante normal de un flujo uniforme. Para calcular el perfil del flujo de un canal, se aplica el método más adecuado, según sea el caso, como se indica en la Fracción C.8. de la Norma N-PRY-CAR-1-06-005, *Análisis Hidráulicos*, aplicando los procedimientos que se describen a continuación:

H.1. MÉTODO DIRECTO POR PASOS

Este método consiste en dividir la longitud del canal prismático en estudio, como se muestra en la Figura 3 de este Manual, en una serie de tramos equivalentes y lo más rectos posibles, de forma que las secciones que los limitan, el material de construcción, la pendiente y el coeficiente de Manning sean uniformes. De este modo, se estiman las longitudes, elevaciones y geometría de cada sección.

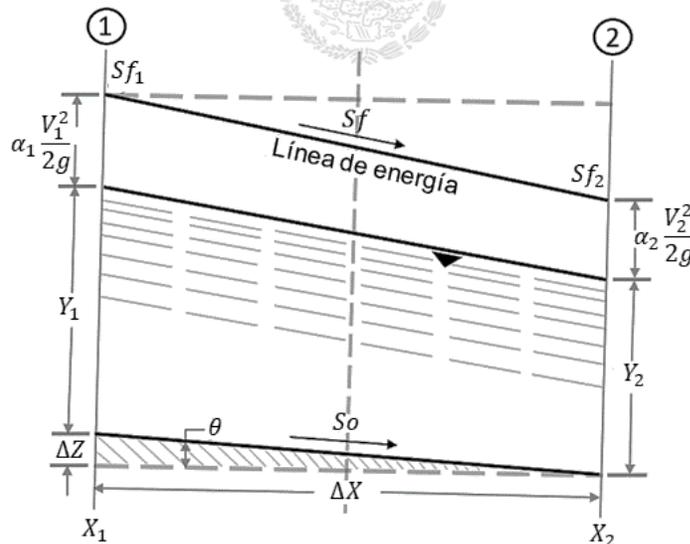


FIGURA 3.- Tramo de un canal prismático con rugosidad uniforme de la sección 1 y 2 separada a una distancia ΔX

Este método considera la ecuación dinámica mostrada en la siguiente expresión:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{So - Sf}{(1 - F^2) \cos \theta}$$

Donde:

S_o = Pendiente del fondo, (m/m)

S_f = Pendiente de la línea de energía, (m/m)

F = Es el número de Froude en la sección, (adimensional)

θ = Ángulo de inclinación del fondo entre secciones

Aplicando la ecuación anterior entre secciones en términos de incrementos finitos, se obtiene la siguiente expresión:

$$\Delta X = \frac{(1 - \bar{F}^2) \times \cos \theta \times \Delta Z}{S_o - \bar{S}_f}$$

Sustituyendo $(1 - \bar{F}^2) \times \cos \theta \times \Delta Z = \Delta E = (E_2 - E_1)$ en la expresión anterior, se obtiene la siguiente expresión:

$$\Delta X = \frac{E_2 - E_1}{S_o - \bar{S}_f}$$

Donde:

ΔX = Diferencial de posición entre secciones en dirección x , (m)

E_1, E_2 = Valor de la energía en cada sección, (adimensional)

S_o = Pendiente del fondo, (m/m)

\bar{S}_f = Pendiente media de la línea de energía, (m/m)

La energía específica (E) se calcula en cada sección con la siguiente expresión:

$$E = Y \cos \theta + \alpha \frac{V^2}{2g} = Y \cos \theta + \alpha \frac{Q^2}{2gA^2}$$

De lo que se desprende la siguiente expresión para determinar la diferencial de posición entre secciones en dirección x (ΔX):

$$X_2 = X_1 + \frac{E_2 - E_1}{S_o - \bar{S}_f}$$

Resultando en la forma original de la ecuación dinámica:

$$X_2 = X_1 + \frac{(1 - \bar{F}^2) \times \cos \theta \times \Delta Z}{S_o - \bar{S}_f} \quad (Y_2 = Y_2)$$

Donde:

X_1, X_2 = Posición entre las secciones 1 y 2

\bar{F} = Es el valor medio del número de Froude en dos secciones, adimensional

θ = Ángulo de inclinación del fondo entre secciones

ΔZ = Diferencial de posición entre secciones en dirección y , (m)

S_o = Pendiente del fondo, (m/m)

\bar{S}_f = Pendiente media de fricción representativa del tramo, (m/m)

Y_1, Y_2 = Tirante de las secciones 1 y 2, (m)

El valor representativo de la pendiente media de fricción en el tramo se selecciona a partir de las siguientes expresiones:

Pendiente media aritmética:

$$\bar{S}f = \frac{Sf_1 + Sf_2}{2}$$

Pendiente media geométrica:

$$\bar{S}f = \sqrt{Sf_1 \times Sf_2}$$

Pendiente media armónica:

$$\bar{S}f = \frac{2 \times Sf_1 \times Sf_2}{Sf_1 + Sf_2}$$

Donde:

$\bar{S}f$ = Pendiente media de fricción representativa del tramo, (m/m)

Sf_1, Sf_2 = Pendiente de fricción de cada sección, (m/m)

Al expandir el término a la derecha de las ecuaciones anteriores con una serie de Taylor, las tres proporcionan resultados idénticos cuando se desprecian los términos del orden $(\Delta Sf/Sf_1)^2$ o mayores, donde $\Delta Sf = Sf_2 - Sf_1$.

De las expresiones previas para la determinación de la pendiente media, se recomienda el uso de la pendiente media aritmética que conduce a un error máximo menor, considerando que a menor distancia entre las secciones 1 y 2, la variación del tirante será baja, lo que conduce a resultados con mayor precisión.

La pendiente de fricción (Sf) en cada sección se calcula mediante la ecuación de Manning, de acuerdo con lo indicado en las siguientes expresiones:

$$Sf_1 = \left[\frac{V_1 \times n}{R_{h1}^{2/3}} \right]^2$$

$$Sf_2 = \left[\frac{V_2 \times n}{R_{h2}^{2/3}} \right]^2$$

Donde:

Sf_1, Sf_2 = Pendiente de fricción de cada sección, (m/m)

V_1, V_2 = Velocidad media en cada sección, (m/s)

n = Coeficiente de rugosidad de Manning, (adimensional)

R_{h1}, R_{h2} = Radio hidráulico de cada sección, (m)

Una vez identificado el tipo de perfil y la dirección en que se efectúa el cálculo, se conocen las características hidráulicas en alguna de las dos secciones:

- En la 1 si el cálculo es en la dirección del flujo.
- En la 2 si es en la dirección opuesta.

A partir de una sección de control de tirante conocido, se selecciona un tirante en la sección próxima y se calcula la distancia que los separa con las ecuaciones dinámicas anteriores. El tirante que se utiliza en la sección cuya ubicación se desconoce será cercano al conocido, principalmente en las zonas donde existan cambios importantes del perfil de flujo que se calcula, a fin de no perder precisión en el resultado, considerando que el error se acumula en la distancia total que se maneja, así se conoce la localización de la sección cuyo tirante se estimó, el cual pasa a ser el tirante conocido en el cálculo de la Cláusula I. de este Manual. Asimismo, el incremento o decremento sucesivo del tirante y el cálculo de la posición de la sección donde ocurre, permiten conocer el perfil del flujo en la longitud deseada del canal.

Cuando S_f tiende a S_o , debido a que la diferencia $S_o - S_f$ resulta pequeña y ΔX tiende a ∞ , se identifica como una zona donde el perfil tiende asintóticamente al del flujo uniforme, entonces es suficiente utilizar un tirante con una diferencia pequeña respecto del normal (es común el empleo del 1 %) para dar por terminado el cálculo.

Este método es la primera variante de un método de diferencias finitas que tiene la ventaja de permitir el cálculo directo del perfil del flujo sin requerir de iteraciones, aunque se puede realizar por tanteos cuando se necesite el tirante en secciones elegidas, incluso si no se desea perder precisión en los cálculos al usar valores pequeños de ΔX (constantes o variables según se desee) o si ocurren cambios de rugosidad en el tramo.

I. CÁLCULO DEL FLUJO EN CANALES NO PRISMÁTICOS

Un canal no prismático se constituye a partir de un sistema de canales en serie que considera los cambios de geometría, pendiente, rugosidad y elevación del fondo en secciones asignadas normalmente por razones topográficas (S_1, S_2, \dots, S_N), hidráulicas o constructivas, como se muestra en la Figura 4 de este Manual, o un canal de forma completamente irregular como puede ser el cauce de un río.

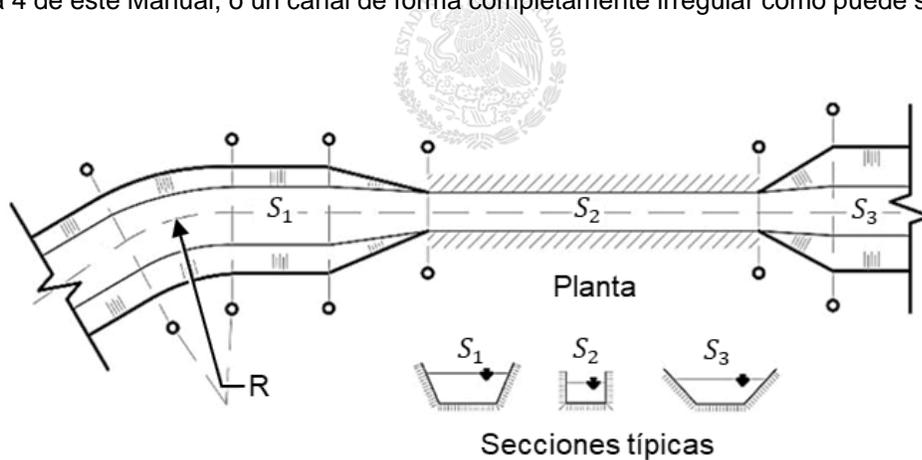


FIGURA 4.- Esquema típico de secciones en un canal artificial no prismático

La parte del río en estudio se divide en una serie de tramos equivalentes, de forma que las secciones que los limitan y el coeficiente de Manning sean aproximadamente uniformes, como se muestra en la Figura 5 de este Manual. Así se determina la ubicación, elevación y geometría de las secciones (como la longitud de cada tramo) y se estima el coeficiente.

Para efectuar los cálculos en el río, se requiere disponer de los siguientes elementos geométricos e hidráulicos: área (A), perímetro (P) y radio hidráulico (R_h), de las secciones medidas en campo para distintos valores del nivel del agua, en forma tabular y gráfica, así como el coeficiente de rugosidad de Manning (n) equivalente en cada tramo, si es el caso.

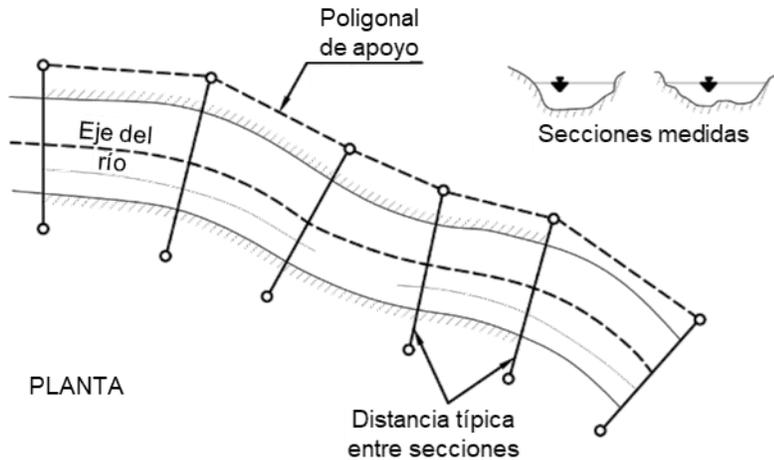


FIGURA 5.- Levantamiento topo-hidráulico de un río

I.1. MÉTODO ESTÁNDAR POR PASOS

El esquema para el tratamiento de cualquier tramo en un canal no prismático se muestra en la Figura 6 de este Manual.

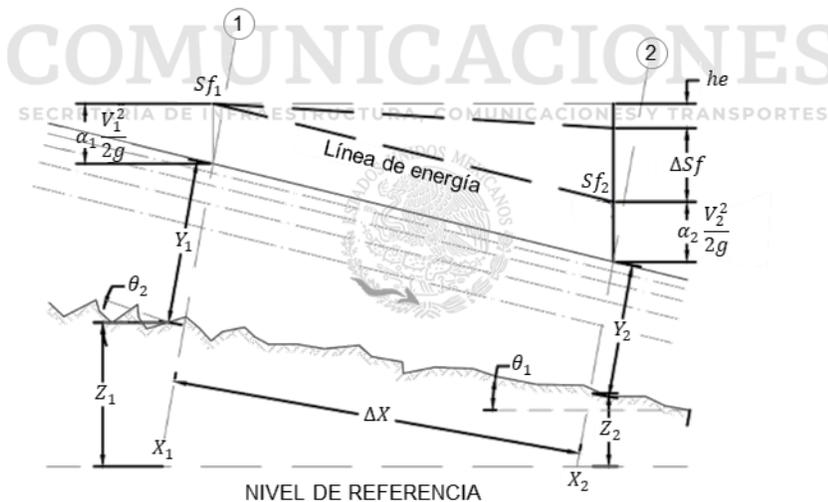


FIGURA 6.- Esquema de solución en canales no prismáticos

La ecuación de energía entre las secciones 1 y 2 se define mediante la siguiente expresión:

$$H_1 = H_2 + hf + he$$

Donde:

H_1, H_2 = Nivel de energía de cada sección, (m)

he = Pérdida de energía, (m)

hf = Pérdida por fricción

La pérdida por fricción hf es la más importante y se determina con la longitud del tramo y la pendiente media representativa como sigue:

$$hf = (X_2 - X_1) \times \frac{(Sf_1 + Sf_2)}{2}$$

Donde:

X_1, X_2 = Posición de las secciones 1 y 2

Sf_1, Sf_2 = Pendientes de fricción que se determinan para cada sección con el coeficiente de Manning medio del tramo, (m/m)

La pérdida de energía (he) es causada por la turbulencia producida con el cambio de velocidad que se da de una sección a la otra. En canales artificiales, el cambio ocurre por variaciones bruscas o graduales en la elevación del fondo o en la geometría de la sección.

Para flujo subcrítico se valorará la pérdida mencionada con la expresión siguiente:

$$he = ke \left(\alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} - \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} \right)$$

Donde:

he = Pérdida de energía, (m)

α = Coeficiente de corrección de energía cinética, (adimensional)

V_1, V_2 = Velocidad media en cada sección, (m/s)

g = Fuerza de gravedad, (m/s²)

ke es un coeficiente que tiene signo positivo cuando el área hidráulica se contrae de 1 a 2 ($A_1 > A_2, V_1 < V_2$) y negativo cuando se expande ($A_1 < A_2, V_1 > V_2$).

Si la pérdida no se considera, $ke = 0$. Los valores de ke serán:

- 0 a 0,2 en contracciones graduales ($A_1 > A_2, V_1 < V_2$).
- 0,3 en expansiones graduales ($A_1 < A_2, V_1 > V_2$).
- 0,5 en contracciones o expansiones bruscas.

El procedimiento estándar por pasos para calcular Y_2 se describe a continuación:

- Se calcula el nivel de energía (H_1) y la pendiente de fricción (Sf_1) con los valores conocidos del gasto (Q), la posición de la sección en dirección y (Z_1), el tirante de la sección (Y_1), el coeficiente de corrección de energía cinética (α_1), la posición de las secciones (X_1, X_2) y el coeficiente de rugosidad de Manning (n) del tramo.
- Se puede estimar un tirante inicial de la sección (Y_2) en un perfil de régimen supercrítico, sin considerar el cambio en el tirante que se da de la sección 1 a la 2 ($Y_1 \cos \theta_1 \cong Y_2 \cos \theta_2$) y que $hf \cong (X_2 - X_1) Sf_1$.
- El valor inicial de la velocidad se calcula mediante la siguiente expresión:

$$V_2 = \sqrt{\frac{2g}{\alpha_2} \left(Z_1 - Z_2 + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} - hf \right)}$$

Donde:

V_1, V_2 = Velocidad media en cada sección, (m/s)

g = Fuerza de gravedad, (m/s²)

α = Coeficiente de corrección de energía cinética, (adimensional)

Z_1, Z_2 = Posición de la sección en dirección y , (m)

hf = Pérdida por fricción, (m)

Con base en la siguiente expresión de distribución, se obtiene (Y_2):

$$A_2 = \frac{Q}{V_2}$$

- Se calcula el área hidráulica de la sección (A_2), el perímetro mojado de la sección (P_2), el radio hidráulico (R_{h2}), la pendiente de fricción (Sf_2) y el nivel de energía (H_2), con el valor estimado del tirante de la sección (Y_2) y la geometría de la sección 2, incluyendo la pérdida por energía (he).
- Se calcula la pérdida de energía (he), con la selección del signo adecuado del coeficiente ke , de acuerdo con el cambio del área hidráulica o la velocidad del flujo.
- Se determina el nivel de energía (H_e) con la siguiente ecuación y su valor absoluto se compara con la tolerancia (TOL) elegida.

$$H_e = H_2 + hf + he - H_1$$

Donde:

H_e = Nivel de energía, (m)

H_1, H_2 = Nivel de energía de cada sección, (m)

hf = Pérdida por fricción, (m)

he = Pérdida de energía, (m)

Si $|H_e| \leq TOL$, Y_2 es el valor final en la sección 2.

COMUNICACIONES
SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES

J. BIBLIOGRAFÍA

Sotelo Ávila, Gilberto. *Hidráulica de Canales*. México, UNAM, Facultad de Ingeniería, 2002, 836 p.



COMUNICACIONES

SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES



SUBSECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA

Dirección General de Servicios Técnicos

Av. Coyoacán 1895

Col. Acacias, Benito Juárez, 03240

Ciudad de México

www.gob.mx/sct