

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

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 utilizarán para el diseño hidráulico del 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 últimas versiones de las siguientes:

NORMAS Y MANUALES	DESIGNACIÓN
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 HIDRÁULICO

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* y 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; calcular 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-1-06-004, *Análisis Hidrológicos*, para los periodos de retorno establecidos; determinar el comportamiento hidráulico de los puentes cercanos que se hayan levantado; y seleccionar el gasto de diseño (Q_{D1}) 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, verificando 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 creciente 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) definidos por la diferencia entre el nivel alcanzado por el agua y los niveles de la superficie del cauce en cada tramo de la sección hidráulica, en metros.
- El área hidráulica (A_h) 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, en metros cuadrados.
- El perímetro mojado (P_m), que es la longitud de la superficie del cauce que tiene contacto con el agua en cada tramo de la sección hidráulica, en metros.
- El radio hidráulico (R_h), que es la relación del área hidráulica entre el perímetro mojado de cada tramo de la sección hidráulica ($R_h = A_h / P_m$), en metros.

Esta determinación se puede realizar usando como hoja de cálculo la Tabla 1, en la que se ejemplifica el cálculo para la sección hidráulica que se muestra en la Figura 1 de este Manual.

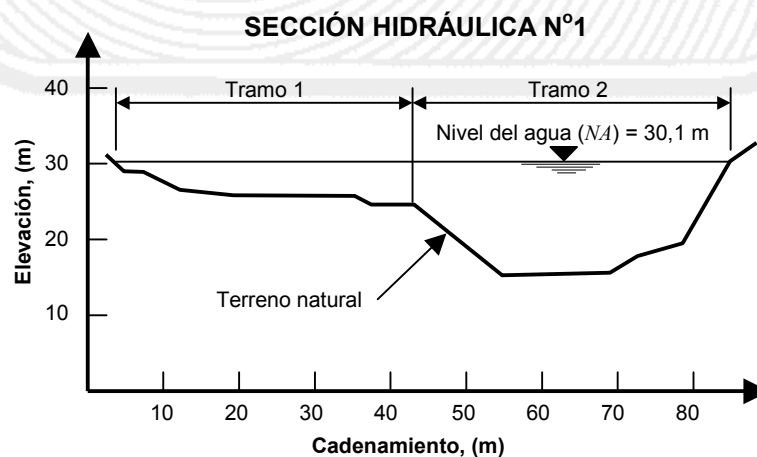


FIGURA 1.- Ejemplo de una sección hidráulica

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

Sección hidráulica N° 1		NIVEL DEL AGUA (NA) = 30,1 m									
Tramo j	Cadenamiento CN m	Longitud Li m	Elevación del terreno EN m	Desnivel hi m	Tirante yN m	Área hidráulica Ahi m²	Área hidráulica del tramo Ahj m²	Perímetro mojado Pmi m	Perímetro mojado del tramo Pmj m	Radio hidráulico del tramo Rhj 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	
$L_i = C_N - C_{N-1}$		$h_i = E_N - E_{N-1} $		$y_N = NA - E_N$		$A_{hi} = L_i (y_N - y_{N-1}) / 2$		$A_{hj} = \sum A_{hi}$ del tramo j		$R_{hj} = A_{hj} / P_{mj}$	
$P_{mi} = (L_i^2 + h_i^2)^{1/2}$		$P_{mj} = \sum P_i$ del tramo j									

D.2. DETERMINACIÓN DE LAS VELOCIDADES EN LA SECCIÓN HIDRÁULICA

Una vez determinadas las características geométricas de una sección hidráulica, como se indica en la Fracción anterior, 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 o menor de 2%, 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.

El Método de Manning establece que la velocidad del flujo para cada tramo de una sección hidráulica es:

$$V_j = \frac{R_{hj}^{2/3} \bar{S}^{1/2}}{n_j}$$

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, adimensional con aproximación al diezmilésimo, determinada como se indica en la Fracción C.4. del Manual M·PRY·CAR·1·06·003, *Procesamiento de Información*

n_j = Coeficiente de rugosidad de Manning del tramo j , adimensional, determinado según se indica en la Fracción C.5. del Manual M·PRY·CAR·1·06·003, *Procesamiento de Información*

Para determinar las velocidades de la corriente en cada tramo de una sección hidráulica mediante el Método de Manning, se puede utilizar como hoja de cálculo la Tabla 2, 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 0,0010 y coeficientes de rugosidad (n) de 0,060 para el tramo 1 y de 0,045 para el tramo 2.

TABLA 2.- Ejemplo de cálculo de la velocidad y el gasto del flujo en una sección hidráulica

Sección Hidráulica N°1					$\bar{S} = 0,0010$; $\bar{S}^{1/2} = 0,0316$	
Tramo	A_h m ²	R_h m	n	$R_h^{2/3}$	V m/s	Q m ³ /s
j	A_{hj}	R_{hj}	n_j	$R_{hj}^{2/3}$	$V_j = \frac{\bar{S}^{1/2}}{n_j} R_{hj}^{2/3}$	$Q_j = A_{hj} V_j$
1	158,81	3,88	0,060	2,47	1,30	206,45
2	484,23	9,27	0,045	4,41	3,10	1 501,11
Gasto total (Q_{tot}), m³/s					$\Sigma Q_j =$	1 708,56

D.3. 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, que establece:

$$Q_j = A_{hj} V_j$$

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)

Los gastos parciales se suman para obtener el gasto total de la sección hidráulica analizada, es decir:

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

Donde:

Q_{tot} = Gasto total en la sección hidráulica, (m^3/s)

Q_j = Gasto parcial en cada tramo j considerado, (m^3/s)

M = Número de tramos de la sección hidráulica

En la Tabla 2 se muestra el cálculo de las velocidades y los gastos para la sección hidráulica mostrada en la Figura 1 de este Manual.

D.4. SELECCIÓN DEL GASTO MÁXIMO OBSERVADO

Los gastos totales calculados para cada sección hidráulica, correspondientes a la creciete máxima de que se tenga noticia, nunca deben promediarse ni forzarse para que coincidan, sino que ha de elegirse 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 creciete 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 velocidades 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 calculo 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}), teórico de diseño (Q_{TDI}) y complementarios (Q_{500} y Q_{1000}), que corresponden a los gastos máximos 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 esa 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. a D.3. de este Manual, se calcula el gasto total que corresponda a dicho nivel. Si el gasto calculado no es lo suficientemente cercano al que se pasa, se repite el proceso proponiendo otros niveles del agua, hasta que, a juicio del ingeniero especialista, ambos gastos sean lo suficientemente aproximados. Se consideran como nivel del agua, tirantes, gastos y velocidades en cada tramo de la sección, correspondientes al gasto pasado por ella, los determinados en el último tanteo.

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 Cláusula C.3. de la Norma N·PRY·CAR·1·06·005, *Análisis Hidráulico*.

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 sigue:

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 Inciso C.2.7. de la Norma N·PRY·CAR·1·06·002, *Trabajos de Campo* para la creciete máxima de que se tenga noticia, en la gráfica de gastos máximos-periodos de retorno que se refiere en el Inciso D.2.4. del Manual M·PRY·CAR·1·06·003, *Procesamiento de Información*, así como en la Fracción D.3. y en los Incisos E.1.4., E.2.9. y E.3.11. 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 fórmula:

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

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 (Q_{MOC}), 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 aumentará considerablemente la seguridad de la estructura.

G.3. Si el gasto de diseño (Q_{DI}) seleccionado como se indica en la Fracción anterior no es el gasto teórico de diseño (Q_{TDI}), 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.