



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERIA
CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



ESTRUCTURAS DE PENDIENTES FUERTES

Ing. Alejandro Zapata
chafazg@gmail.com



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERIA
CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



3	RAPIDAS¹
3.1	Descripción y ubicación
3.2	Transición de entrada
3.3	Sección de control
3.4	Canal de Rápida
3.5	Transición de salida
3.6	Diseño Hidráulico
3.7	Ejemplo de calculo

1. Textos base: "Obras de riego para zonas montañosas". P. Hoogendam – A. Bottega.2004 / "Irrigación".A. Rosell C.1993 / "Manual de riego por gravedad". W. Olarte.1987 / "Obras de captación, Canales y Modelos Hidráulicos". G. Sotelo A. 1996



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES

FACULTAD DE INGENIERIA

CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



RAPIDAS

Descripción y ubicación

Una rápida es un canal de gran pendiente que conecta dos tramos de un canal con pendiente suave entre los que existe un desnivel considerable en una longitud corta. Obliga a conducir el agua en ese tramo sobre pendientes pronunciadas y con altas velocidades. Cuando la longitud de la rápida es corta, se la denomina caída inclinada y su diseño hidráulico y estructural es el mismo que el de la rápida.

En los sistemas de riego de montaña el empleo de rápidas es común debido a que en muchos casos la topografía del terreno es más inclinada que la pendiente máxima que se le quiere dar a un tramo del canal. En esos casos debe pasarse el desnivel de forma súbita. Cuando el desnivel y la distancia son considerables, suelen usarse rápidas en vez de caídas.



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES

FACULTAD DE INGENIERIA

CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

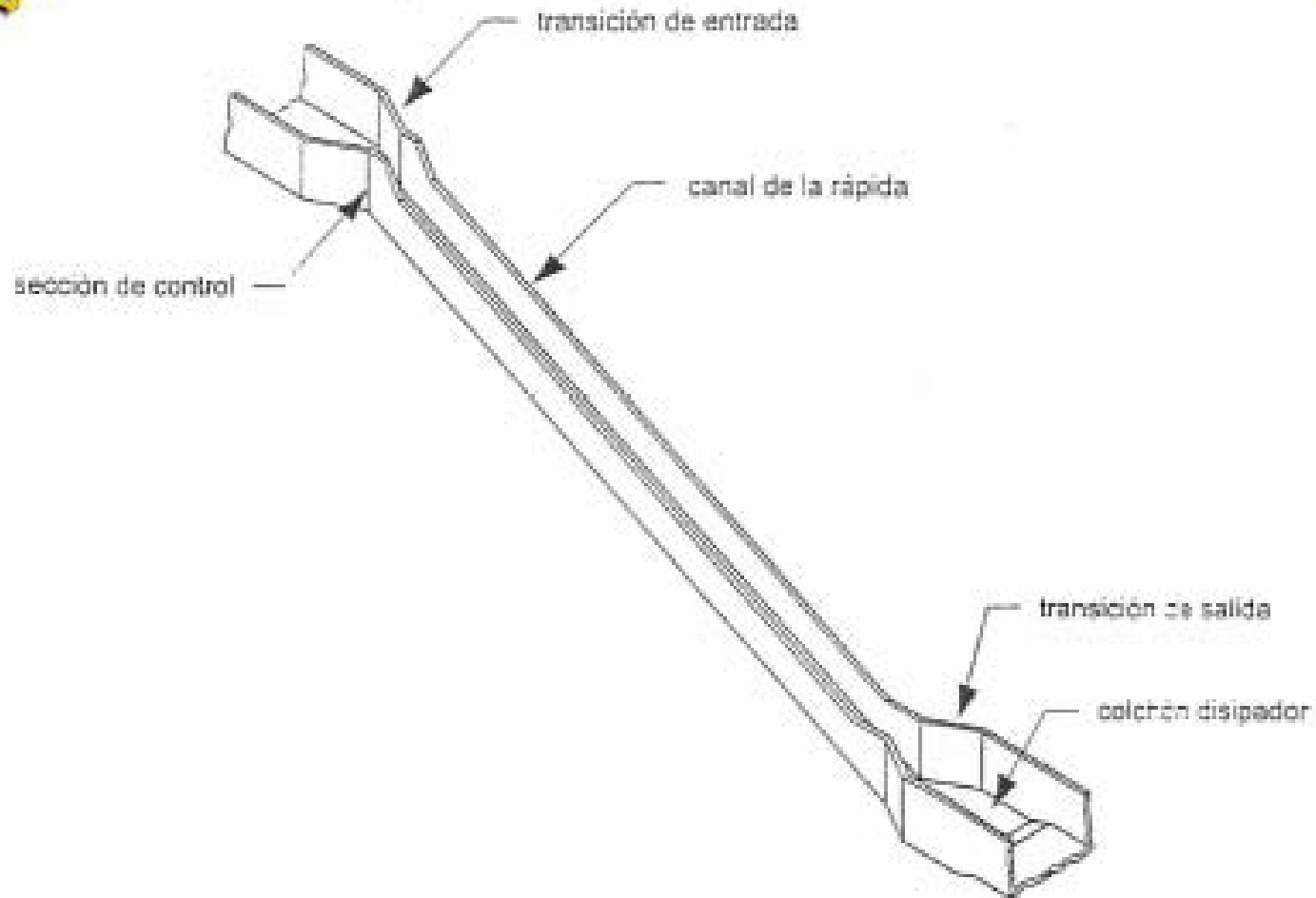


Las rápidas son muy comunes al inicio de canales secundarios que se alimentan del canal principal que sigue una curva de nivel superior. También se usan en combinación con aliviaderos, para llevar la demasía de agua por un ducto controlado hacia un dren natural. En la zona de riego se pueden usar en toda situación donde se necesita pasar un desnivel extendido.

Una ventaja de las rápidas es que es posible ajustar su pendiente a la pendiente natural del terreno y por ende requieren menos movimiento de tierra que por ejemplo una serie de caídas verticales. Su principal desventaja es que conducen el agua a gran velocidad lo que desgasta más rápidamente la solera e impide operaciones de derivación.



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERIA
CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL





UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES

FACULTAD DE INGENIERIA

CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



1. Transición de entrada

Es la estructura que de forma gradual cambia la sección del canal para hacerla coincidir con las dimensiones de la sección de control, evitando la formación de remolinos y flujo inestable en el canal. Su necesidad es especialmente importante en canales de tierra.

2. Sección de control

Es la sección donde la conducción aumenta bruscamente su pendiente. Aquí las condiciones del flujo son las del régimen crítico. Mediante la sección de control, se intenta disminuir las altas velocidades en la entrada a la rápida producidas por el abatimiento de la superficie del agua y lograr que el efecto del remanso sea el mínimo posible. Sirve también para darle al flujo un ingreso adecuado a la rápida, con un flujo simétrico respecto del eje para evitar salpicaduras, oleaje e inclusive un salto de agua fuera del cauce.



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES

FACULTAD DE INGENIERIA

CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



En la sección del cambio de pendiente se verifica:

$$y_n + \frac{v_n^2}{2 \cdot g} = y_c + \frac{v_c^2}{2 \cdot g} + h_f$$

y_n = tirante normal en el canal de entrada [m]

v_n = velocidad normal en el canal de entrada [m/s]

y_c = tirante crítico [m]

v_c = velocidad crítica [m/s]

g = aceleración de la gravedad [m/s²]

h_f = pérdida de carga por abatimiento de la superficie del agua [m]

La forma más común de lograr las condiciones adecuadas de flujo es mediante el estrechamiento del ancho del canal, haciendo que h_f sea cero. La otra alternativa es sobreelevar el fondo del canal con un escalón de altura igual a h_f o combinar ambas soluciones. Se recomienda el estrechamiento de la sección del canal en lugar de una sobreelevación, para así tener una rápida de sección más angosta que la sección del canal y por lo tanto más barata. La ventaja de la conducción a régimen supercrítico debe traducirse en una economía del volumen de obras, más aun porque la rápida exige un incremento en la calidad del revestimiento.



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES

FACULTAD DE INGENIERIA

CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



3. Canal de la rápida

Es el tramo comprendido entre la sección de control y el colchón disipador. La pendiente de sus tramos se adecua a las condiciones topográficas del terreno, pero evitando reducciones de la pendiente. El régimen de flujo en la rápida es supercrítico y la superficie del agua sigue una curva que se acerca asintóticamente al tirante normal.

Se recomienda seguir una alineación recta en planta y utilizar canales prismáticos de secciones rectangulares, dado que el flujo a altas velocidades es muy sensible a todo cambio de sección y de dirección. El flujo es especialmente inestable cuando el régimen es cercano al crítico o sea para los valores del número de Froude entre 1 y 1.5.

Cuando en la alineación horizontal no es posible seguir una alineación recta se pueden adoptar las siguientes soluciones prácticas:



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES

FACULTAD DE INGENIERIA

CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



- Construir una cámara de disipación en el punto de cambio de dirección, desde la cual se inicia otro tramo de la rápida.
- Reemplazar el canal en el tramo correspondiente por una sección cerrada que trabajará como tubería de presión.

Cuando en la alineación vertical del canal de la rápida se presentan cambios de pendiente, de una más suave a otra más pronunciada, la unión entre los dos tramos debe hacerse con una curva vertical de enlace para evitar la separación entre el flujo y el cauce, lo que podría hacer saltar el agua fuera del canal y producir erosiones. La curva debe construirse de tal forma que siga la trayectoria parabólica del agua (Krochin, 1978), dada por la ecuación:

$$y = L \cdot \tan \alpha + \frac{g \cdot L^2}{2 \cdot v^2 \cdot \cos^2 \alpha},$$

y = altura de la solera respecto de nivel del punto de partida de la curva vertical [m]

L = longitud horizontal de la curva vertical [m]

Para determinar el bordo libre de una rápida debe considerarse:

- Que el flujo incorpora burbujas de aire en directa relación a su velocidad. A medida que el aire es incorporado dentro del agua, la mezcla aumenta de volumen. La sección mojada del flujo aireado es mayor y por tanto se requiere una mayor altura de las paredes del canal que para el flujo no-aireado. Para compensar este aumento de volumen se recomienda multiplicar el valor de la rugosidad de Manning n por un coeficiente α , *que está en función de la pendiente según la siguiente tabla propuesta por Nichiporovich (Krochin, 1978):*

Coeficientes de corrección del n de Manning

Pendiente	Coeficiente α
10% a 20%	1.33
20% a 40%	2.00
Mayor a 40%	3.33

Que el flujo que escurre por la rápida es supercrítico con un tirante pequeño. Ante la aparición de algún obstáculo, por ejemplo de una piedra caída en el canal de la rápida. el flujo se convierte bruscamente y durante un pequeño tramo en subcrítico con un tirante mucho mayor.

4. Colchón dissipador

Se ubica en el extremo inferior del canal de la rápida. Es la estructura que absorbe el exceso de energía cinética generada en la rápida mediante la reducción de la velocidad del agua en una poza de dissipación.

En el colchón, el régimen del flujo pasa de supercrítico a subcrítico mediante un resalto hidráulico. La salida del colchón debe ser una rampa con una pendiente de entre 2:1 o más tendida para permitir la auto limpieza del colchón. Esto evita la acumulación de arena, grava, ramas y desechos.

5. Transición de salida

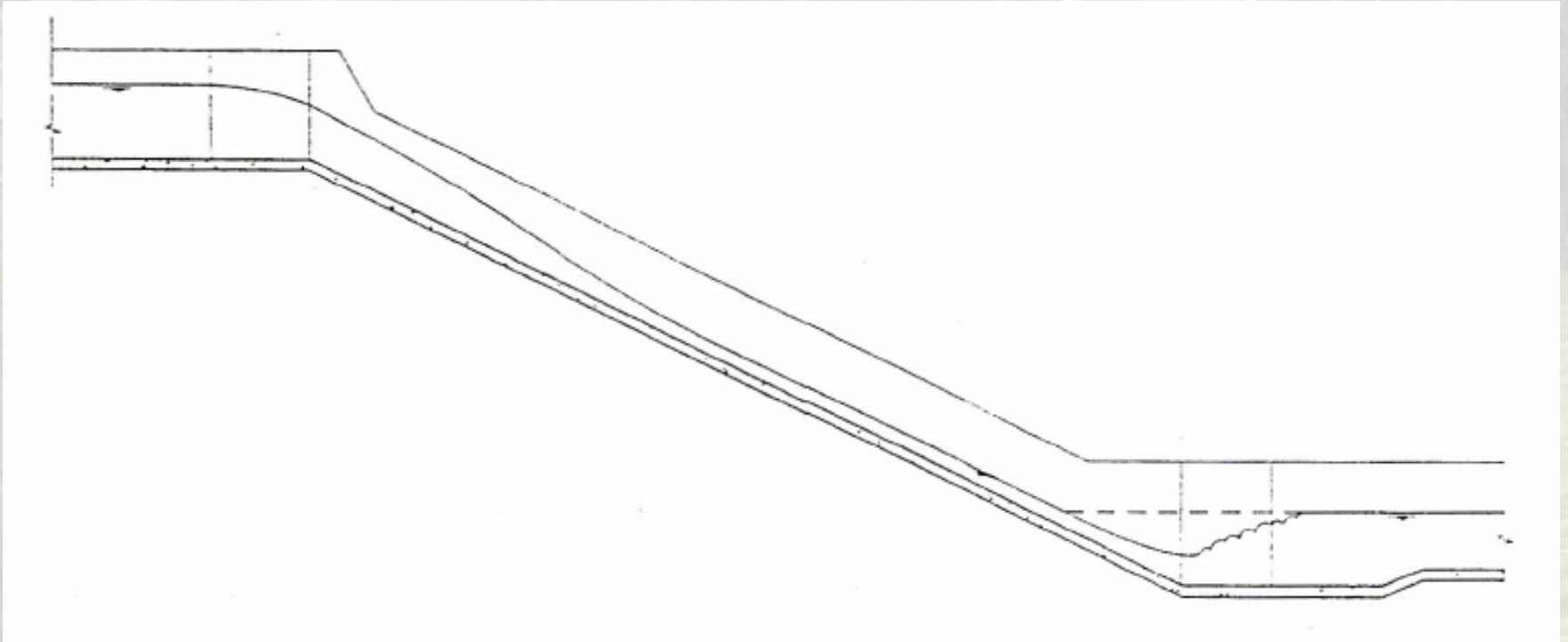
Cambia en forma gradual la sección del colchón dissipador para hacerla coincidir con las dimensiones del canal de salida. Conviene incluir la transición en el mismo colchón para incrementar los efectos de la dissipación mediante su ensanchamiento y ayudar a conseguir un tirante conjugado de menor elevación.

Diseño hidráulico

Los datos básicos para el cálculo de la rápida son:

- El caudal Q [m^3/s].
- El coeficiente de rugosidad de Manning del canal n .
- La pendiente del canal de entrada S_{canal} [m/m].
- El ancho b del canal (se supone sección rectangular) [m].
- El desnivel Δz [m], la longitud L [m] y la pendiente de la rápida S_o [m/m].

Esquema del flujo en una rápida



I. Se calcula el ancho B de la sección de control. Cerca del sitio de cambio de pendiente donde el flujo pasa de subcrítico a crítico. se verifica la condición:

$$y_n + \frac{v^2}{2g} = y_c + \frac{v_c^2}{2g}$$

despreciando pérdida de carga entre una sección y otra.

Se calcula el tirante normal del canal de entrada y_n ; *por iteraciones hasta que se cumpla la condición*

$$A \cdot R^{2/3} = \frac{Q \cdot n}{\sqrt{S_{\text{canal}}}}$$

A = área hidráulica [m²]: $A = b \cdot y_n$

R = radio hidráulico [m]: $R = \frac{b \cdot y_n}{b + 2 \cdot y_n}$

Q = caudal [m³/s]

n = rugosidad del canal de entrada

S_{canal} = pendiente del canal de entrada [m/m]

La velocidad se calcula con El tirante crítico se

$$v = \frac{Q}{y_n \cdot b}$$

calcula con la expresión La velocidad crítica se

$$y_c = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{B^2 \cdot g}}$$

calcula con la expresión

$$v_c = \sqrt{y_c \cdot g}$$

2. Se calcula la longitud de la transición entre la sección del canal y la sección de control:

$$L_{te} = \frac{b - B}{2 \cdot \tan(22.5^\circ)}$$

b = ancho del canal de entrada [m]

B = ancho de la sección de control [m]

3. Se determinan los tirantes a lo largo de la rápida, mediante las ecuaciones del flujo no uniforme. Tratándose de una curva de remanso tipo S_2 , se recomienda el método numérico de tramos fijos con la asistencia de una planilla de cálculo, con tantas filas como tramos en que se desee dividir la longitud de la rápida (Villón, 1995). El método es más exacto cuanto mayor sea el número de tramos en que se divida la longitud de la rápida, dando valores al tirante desconocido y_2 en cada sección hasta que se satisfaga la igualdad:

$$S_0 \cdot \Delta x + E_1 = E_2 + \bar{S}_E \cdot \Delta x \quad (10.3)$$

S_0 = pendiente del fondo del canal de la rápida [m/m]

Δx = distancia [m] desde la sección de características conocidas hasta la sección donde se quiere conocer el tirante y_2 · Δx es positivo si el cálculo se efectúa hacia aguas abajo

E = energía del flujo en una determinada sección [m]

$$E = y + \frac{v^2}{2 \cdot g} = y + \frac{Q^2}{2 \cdot g \cdot A^2} = y + \frac{Q^2}{2 \cdot g \cdot B^2 \cdot y^2}$$

\bar{S}_E = promedio de energía entre dos secciones contiguas [m]; $\bar{S}_E = \frac{S_{E1} + S_{E2}}{2}$

$$S_E = \left(\frac{v \cdot n}{R^{2/3}} \right)^2 = \left(\frac{Q \cdot n}{A \cdot \left(\frac{A}{P} \right)^{2/3}} \right)^2 = Q^2 \cdot n^2 \cdot \left(\frac{(B + 2y)^2}{(B \cdot y)^5} \right)^2$$



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERIA
CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



5. Se calcula la profundidad del colchón dissipador. Hay la necesidad de elevar la solera cuando el tirante conjugado a la salida de la rápida, luego del resalto hidráulico, es superior al tirante normal del canal de salida. Para asegurar que el colchón dissipador tenga la profundidad suficiente. se calcula con la expresión:

$$e = 1.15 \cdot y_2 - y_n$$

y_2 = tirante conjugado del tirante y_1 a la salida de la rápida [m]

$$y_2 = -\frac{y_1}{2} + \sqrt{\frac{2Q^2}{g \cdot y_1 \cdot B_s^2} + \frac{y_1^2}{4}}$$

y_n = tirante normal del canal de salida [m]

B_d = ancho del colchón dissipador [m]

6. Se determina la longitud del colchón disipador. Para este cálculo se considera que la disipación del exceso de energía cinética se producirá exclusivamente por la formación de un resalto hidráulico, por lo que se recomienda usar la fórmula de Sieñchin:

$$L_p = K \cdot (y_2 - y_1)$$

L_p = longitud del colchón disipador [m]

K = coeficiente de sección, igual a 5 para secciones rectangulares

7. Se calcula la transición de salida, que conviene ubicarla entre la salida de la rápida y la entrada al canal inferior. El ensanchamiento de la sección disminuye la velocidad del flujo que sale de la rápida y colabora con la disminución del tirante conjugado. Puede usarse la misma fórmula para la transición de entrada.

Ejemplo de cálculo

Sea un canal de H°C° de 1.00 m de base y paredes verticales que conduce 500 l/s con una pendiente de 0.003 m/m y que debe enfrentar una ladera con una rápida de 73.45 m de longitud hasta el tramo inferior del canal salida con iguales características al de entrada, pero ubicado 14.629 m más abajo.

1. Calculamos el valor del tirante normal y_n en el canal de entrada por tanteos hasta que se cumpla la igualdad,

$$A \cdot R^{2/3} = \frac{Q \cdot n}{\sqrt{S}} = \frac{0.5 \times 0.02}{\sqrt{0.003}} = 0.1826 \text{ m.}$$

de donde resulta que y_n es igual a 0.4698 m.

Su carga de velocidad es

$$h_v = \frac{Q^2}{b^2 \cdot y_n^2 \cdot 2 \cdot g} = \frac{0.5^2}{1.00^2 \times 0.4698^2 \times 2 \times 9.81} = 0.0577 \text{ m}$$

La energía del flujo en el canal superior es entonces:

$$E = y_n + h_v = 0.4698 + 0.0577 = 0.5275 \text{ m}$$

El ancho de la sección de control se obtiene por tanteos, dándole valores a B hasta que se cumpla la igualdad:

$$0.5275 = \sqrt[3]{\frac{0.5^2}{B^2 \times 9.81}} + \frac{0.5^2}{B^2 \times 9.81 \times \left(\frac{0.5^2}{B^2 \times 9.81}\right)^{2/3}}$$

de donde resulta que B es 0.765 m, ancho que también se adopta para la solera de la rápida. El tirante crítico que se presenta en la sección de control es

$$y_c = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{B^2 \cdot g}} = \sqrt[3]{\frac{0.5^2}{0.765^2 \times 9.81}} = 0.3518 \text{ m}$$

la velocidad crítica alcanza a

$$v_c = \sqrt{y_c \cdot g} = \sqrt{0.3518 \times 9.81} = 1.8577 \text{ m/s.}$$

2. La longitud de la transición de entrada será:

$$L_{Te} = \frac{T_1 - b}{2 \cdot \tan(22.5^\circ)} = \frac{1.000 - 0.765}{0.8284} = 0.28 \text{ m,}$$

que se redondea a 0.30 m.

3. Cálculo de tirantes con la ayuda de una planilla, sobre la base de un número de tramos igual a 10. Conocidas las características hidráulicas en la sección de control y la longitud del tramo Δx , en la fila 0 para un y conocido (igual al tirante crítico calculado en el paso 1), se calculan los valores de las siguientes columnas. Las tres últimas columnas no se pueden calcular para la primera fila porque a ese punto no se pueden obtener promedios. A partir de la segunda fila, para un y supuesto se calculan los valores de las columnas siguientes, y se ajusta por tanteos el valor de y hasta que se satisfaga en grado aceptable la igualdad entre el valor $E + S_{\text{Emed}} \Delta x$ de una fila y el valor $E + S_0 \cdot \Delta x$ de la fila anterior.

Planilla de calculo de los tirantes para el ejemplo desarrollado

TRAMO	x	Δx	S_0	y	v	E	$E + S_0 \Delta x$	S_E	$S_{E \text{ med}}$	$S_{E \text{ med}} \Delta x$	$E + S_{E \text{ med}} \Delta x$
0	0,0000	7,3450	0,1992	0,3518	1,8578	0,5277	1,9906	0,00650			
1	7,3450	7,3450	0,1992	0,1253	5,2162	1,5121	2,9750	0,12410	0,06530	0,4796	1,9917
2	14,6900	7,3450	0,1992	0,1113	5,8724	1,8689	3,3318	0,17747	0,15078	1,1075	2,9764
3	22,0350	7,3450	0,1992	0,1082	6,0406	1,9680	3,4309	0,19336	0,18541	1,3619	3,3298
4	29,3800	7,3450	0,1992	0,1074	6,0856	1,9950	3,4579	0,19777	0,19556	1,4364	3,4314
5	36,7250	7,3450	0,1992	0,1072	6,0970	2,0018	3,4647	0,19889	0,19833	1,4567	3,4586
6	44,0700	7,3450	0,1992	0,1072	6,0970	2,0018	3,4647	0,19889	0,19889	1,4609	3,4627
7	51,4150	7,3450	0,1992	0,1072	6,0970	2,0018	3,4647	0,19889	0,19889	1,4609	3,4627
8	58,7600	7,3450	0,1992	0,1072	6,0970	2,0018	3,4647	0,19889	0,19889	1,4609	3,4627
9	66,1050	7,3450	0,1992	0,1072	6,0970	2,0018	3,4647	0,19889	0,19889	1,4609	3,4627
10	73,4500	7,3450	0,1992	0,1072	6,0970	2,0018	3,4647	0,19889	0,19889	1,4609	3,4627

Nótese que casi a la mitad de la rápida, el tirante ya es el normal y constante hasta el final. así como la velocidad del flujo.

Cálculo de bordo libre y altura total de la pared

y	BI	h
0.352	0.651	1.003
0.125	0.679	0.804
0.111	0.683	0.794
0.108	0.684	0.792
0.107	0.684	0.791
0.107	0.684	0.791
0.107	0.684	0.791
0.107	0.684	0.791
0.107	0.684	0.791
0.107	0.684	0.791

Aquí se aprecia que es conveniente mantener una altura de 0.80 a partir del final del primer tramo. en el que la altura puede rebajar linealmente de 1.00 m a 0.80 m. la transición de salida se calcula igual que la de entrada. Como los valores son idénticos, la longitud de transición de salida será $L = 0.30$ m.

5. Para el cálculo de la profundidad y longitud del colchón dissipador se determina el tirante conjugado luego de la transición:

$$y_2 = -\frac{y_1}{2} + \sqrt{\frac{2 \cdot Q^2}{g \cdot y_1 \cdot B^2} + \frac{y_1^2}{4}} =$$
$$= -\frac{0.1072}{2} + \sqrt{\frac{2 \times 0.5^2}{9.81 \times 0.1072 \times 1.00^2} + \frac{0.1072^2}{4}} = 0.6380 \text{ m}$$

Con ese valor se calcula la profundidad del colchón:

$$e = 1.15 \cdot y_2 - y_n = 1.15 \times 0.6380 - 0.4698 = 0.2639 \text{ m, que se redondea a 0.3 m.}$$

6. La longitud del colchón será:

$$L = 5 \cdot (y_2 - y_1) = 5 \times (0.638 - 0.1072) = 2.654 \text{ m,}$$

que puede redondearse a 2.7 m

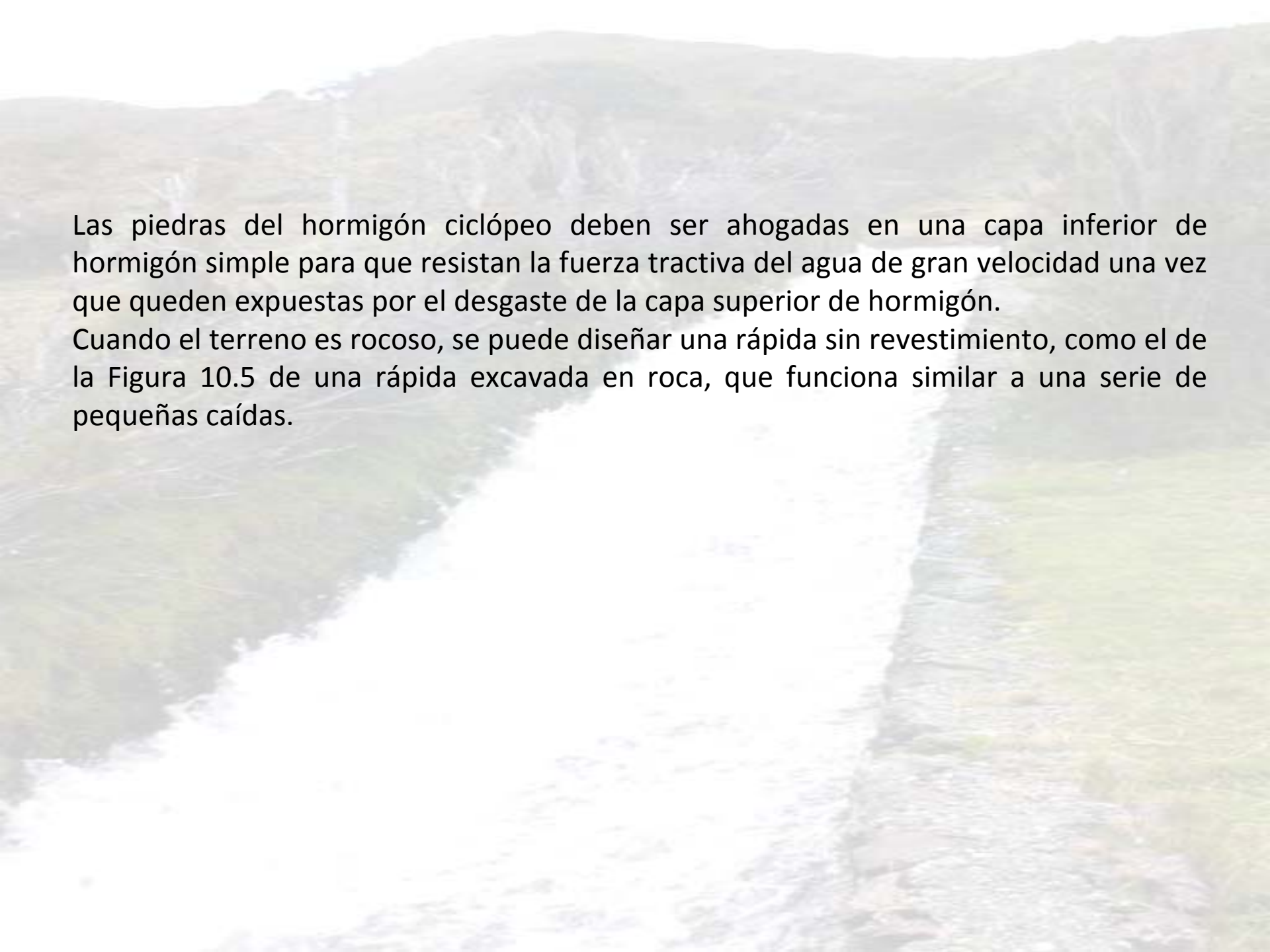
Aspectos constructivos

A diferencia de las caídas verticales, en las caídas inclinadas y en las rápidas, la solera no está sometida a empuje de tierras debido a que su inclinación normalmente concuerda con la inclinación natural del terreno o con su talud en reposo. Esto significa menores exigencias para el revestimiento, cuyo espesor debe determinarse únicamente para resistir los efectos erosivos del flujo a gran velocidad, considerando además, la carga de material sólido arrastrado por el agua, incluyendo piedras que puedan ingresar al canal desde las laderas.

La Tabla 10.3 aglutina recomendaciones para espesores y tipos de revestimiento, de acuerdo a la velocidad en el canal de la rápida:

Tabla 10.3: Recomendaciones sobre materiales y espesores en rápidas

Velocidad	Material	Espesor	Especificaciones complementarias
Hasta 3 m/s	Mampostería u H°C°	Mayor a 30 cm	Mortero de cemento aglutinador con relación 1:5. La superficie húmeda afinada con una capa de 3 cm de mortero de cemento 1:3
Hasta 6 m/s	Hormigón simple	10 a 15 cm	Resistencia característica a la compresión 250 kg/cm ² a los 28 días



Las piedras del hormigón ciclópeo deben ser ahogadas en una capa inferior de hormigón simple para que resistan la fuerza tractiva del agua de gran velocidad una vez que queden expuestas por el desgaste de la capa superior de hormigón.

Cuando el terreno es rocoso, se puede diseñar una rápida sin revestimiento, como el de la Figura 10.5 de una rápida excavada en roca, que funciona similar a una serie de pequeñas caídas.

Situaciones que conviene evitar

- Un flujo supercrítico es particularmente sensible a los cambios de dirección. Una curva antes o dentro de una rápida provoca sobreelevaciones del nivel del agua en el borde exterior, además de oleaje y salpicaduras. Nótese la marca que ha dejado el agua en la curva en el ingreso a una rápida y el oleaje provocado por la curva en medio de otra.

