

SAGARPA



SECRETARÍA DE AGRICULTURA,
GANADERÍA, DESARROLLO RURAL,
PESCA Y ALIMENTACIÓN

**“SECRETARÍA DE AGRICULTURA,
GANADERÍA,
DESARROLLO RURAL,
PESCA Y ALIMENTACIÓN”**

Subsecretaría de Desarrollo Rural
Dirección General de Apoyos para el Desarrollo Rural

Presas de mampostería



MUNICIPIO: CHIAUTLA DE TAPIA
COMUNIDAD: TEPOXMATLA
OBRA: PRESA DE MAMPOSTERIA
18°21'10.16"N 98°43'56.14"O



Presas de mampostería



Definición

Las presas de mampostería son estructuras permanentes construidas con piedra, arena y cemento, ubicadas de forma transversal a la corriente dentro de un cauce o una cárcava, con el fin de reducir la velocidad del escurrimiento superficial, retener azolves y almacenar agua.

Su uso se recomienda en cárcavas de cualquier tamaño pero con profundidades mayores a 2 metros.

Objetivos

Reducir la velocidad de los escurrimientos en el cauce o en la cárcava con lo cual se propicia la sedimentación y retención de azolves y al tratarse de una estructura impermeable también sirve para el almacenamiento de agua.

Ventajas

- Es una estructura permanente.
- Presenta una alta durabilidad y eficiencia.
- Reduce la velocidad del escurrimiento.
- Retiene azolve y agua.
- Reduce la pendiente media de la cárcava.
- El agua almacenada puede tener diversos usos para las poblaciones rurales.

Desventajas

- Requiere conocimiento técnico para su diseño.
- Alto costo.
- Se requieren obras complementarias de control de azolves en cauces tributarios para evitar su rápido azolvamiento y la reducción de su vida útil.

Condiciones para establecer una presa de mampostería

Las presas de mampostería se deberán construir al final de una serie de estructuras de control de los escurrimientos y azolves, y en un sitio apropiado tratando de maximizar el vaso de almacenamiento y la vida útil de la presa, ya que de lo contrario se corre el riesgo de que se llene de azolve en muy poco tiempo.

Este tipo de presas pueden construirse en aquellas zonas donde pueda obtenerse piedra de buena calidad y apropiada para trabajos de albañilería; durante su construcción, es conveniente utilizar piedras lo más uniformes posibles, de tal manera que la cantidad de mortero necesario para juntarlas, sea mínimo y permita a su vez un mayor avance de obra por jornada de trabajo.

Para asegurar el éxito de la estructura, hay que darle especial atención a los empotramientos y a la longitud de la base, cuidando que éstos sean lo suficientemente grandes para asegurar la estabilidad de la presa.

También es importante considerar la profundidad del cauce o cárcava ya que a partir de ésta se determina la altura de la presa, el volumen de la obra y su costo. Por lo general, las presas de mampostería se construyen con la finalidad de cubrir la totalidad de la profundidad de la cárcava.

El diseño del vertedor también es de vital importancia, debido a que es la única forma de paso de los escurrimientos a través de la estructura.

Para realizar el diseño de una presa de mampostería se deben considerar los siguientes puntos:

- a. Determinar el sitio más adecuado para la construcción de la presa.
- b. Determinar la pendiente del cauce en el sitio seleccionado.
- c. Obtener en campo la sección transversal de la cárcava o del cauce en el sitio donde se desea construir la presa.
- d. Calcular los gastos de diseño utilizando el método simplificado de las huellas máximas.
- e. Estimar el escurrimiento máximo que tiene lugar en la sección transversal levantada a fin de diseñar la capacidad máxima del vertedor.
- f. Diseñar el vertedor a fin de satisfacer la capacidad de descarga del escurrimiento máximo.

La proporción del mortero debe ser 3:1 (arena : cemento).

g. Realizar el cálculo estructural de la presa, que constituye el análisis de cada fuerza que actúa sobre el muro y determina la estabilidad de la obra.

h. Considerar el diseño de un colchón hidráulico a fin de evitar que la fuerza de la caída del agua desalojada a través del vertedor origine la socavación del lecho aguas abajo y el deterioro de las paredes laterales que pongan en peligro la estabilidad de la estructura.

i. Considerar los empotramientos mínimos requeridos en ambos márgenes de la cárcava con el fin de evitar filtraciones que debiliten la seguridad de la obra.

j. Determinar los volúmenes de excavación y de obra que la construcción demande, de acuerdo con la dureza del suelo y las condiciones físicas del lecho del cauce o de la cárcava.

Diseño de la presa de mampostería

1. Gasto máximo en el cauce

Se realiza usando el método de las huellas máximas empleando la ecuación 1.

$$Q = A * v \quad (1)$$

donde:

Q = Escurrimiento máximo (m³/s)

A = Área hidráulica de la sección (m²)

v = Velocidad del flujo (m/s)

Área hidráulica. Se determina dibujando el perfil de la sección con los datos obtenidos en campo del levantamiento de la sección y el valor de la huella máxima de mojado de ambos márgenes del cauce, como se muestra en la Figura 1.

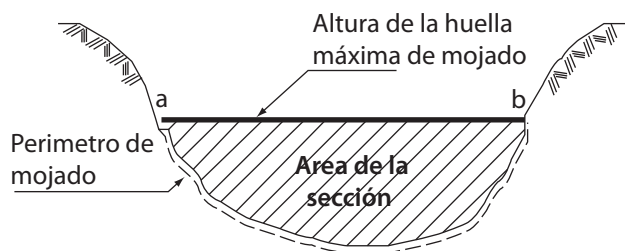


Figura 1. Elementos de una sección transversal

Velocidad del flujo. Para calcular la velocidad del flujo o de la corriente, se utiliza la fórmula de Manning (ecuación 2):

$$v = \frac{r^{2/3} s^{1/2}}{n} \quad (2)$$

donde:

v = Velocidad del flujo (m/s)

r = Radio hidráulico de la sección (m)

s = Pendiente de la sección (m/m)

n = Coeficiente de rugosidad (adim.)

Cada variable se calcula de la manera siguiente:

a. Radio hidráulico. Es la relación que existe entre el área hidráulica de la sección y el perímetro de mojado (ecuación 3).

$$r = \frac{A}{P} \quad (3)$$

donde:

r = Radio hidráulico (m)

A = Área de la sección (m²)

P = Perímetro de mojado (m)

El perímetro de mojado se determina de la Figura 1 y considera la línea de mojado (a-b) a través de las paredes del cauce.

b. Pendiente de la sección. Se determina la pendiente media de la parte del cauce o de la cárcava en donde se pretende ubicar la estructura y se expresa en metro/metro.

c. Coeficiente de rugosidad. Este valor está en función de las características de la cárcava tales como pedregosidad y vegetación.

2. Carga sobre la cresta del vertedor

La descarga de los vertedores de las presas de control se calcula mediante la ecuación 4:

$$Q = C_v * L * H_d^{3/2} \quad (4)$$

donde:

Q = Gasto de descarga (m³/s)

C_v = Coeficiente del vertedor (adim.)

L = Longitud efectiva del vertedor (m)

H_d = Carga sobre la cresta del vertedor (m)

La longitud efectiva del vertedor se considera de al menos un tercio del ancho del cauce o cárcava y el coeficiente del vertedor es de 1.45 ya que se trata de vertedores de cresta ancha y sección longitudinal rectangular.

Como se conoce el gasto máximo del cauce, la carga sobre la cresta del vertedor se despeja de la ecuación 4 dejándolo en función de la longitud efectiva del vertedor para su diseño, obteniéndose la ecuación 5.

$$H_d = \left[\frac{Q}{C_v * L} \right]^{2/3} \quad (5)$$

Diseño estructural

El diseño que se desarrolla a continuación se hizo considerando únicamente presas de tipo gravedad en las que todas las fuerzas que intervienen en la estabilidad de la obra son equilibradas por el propio peso de la estructura. En este método de diseño se busca que la resultante de las fuerzas actuantes quede dentro del tercio medio de la base de la presa, evitando con ello que se presenten tensiones.

Conviene mencionar que en el análisis de esfuerzos no se consideran los efectos de sismos, viento y presión de hielo, ya que se trata de obras de dimensiones muy reducidas y cuya falla no pone en peligro vidas humanas.

La Figura 2 muestra las diferentes fuerzas que actúan en una presa de gravedad.

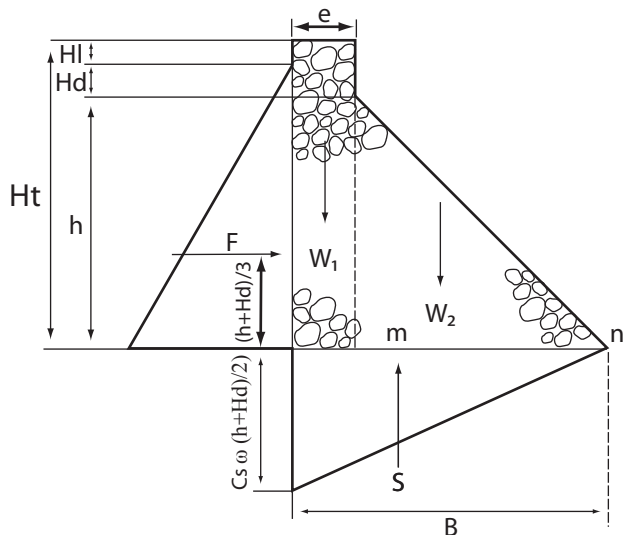


Figura 1. Fuerzas que actúan en una presa de gravedad

Definición de variables:

h = Altura efectiva de la presa (m)
Ht = Altura total de la presa (m)
B = Ancho de la base (m)
e = Ancho de la corona (m)
Hl = Bordo libre (m)
Hd = Carga sobre la cresta del vertedor (m)
F = Empuje hidrostático (kg)
W₁ = Peso de la sección rectangular de la cortina (kg)
W₂ = Peso de la sección triangular de la cortina (kg)
K = Coeficiente de subpresión (adim.)
γ = Peso específico de la mampostería (kg/m³)
ω = Peso específico del agua con sedimentos (kg/m³)
S = Subpresión (kg)

1. Cálculo del ancho de la corona "e". Para realizar este cálculo se deben analizar las fuerzas que actúan sobre la estructura mostrada en la Figura 3.

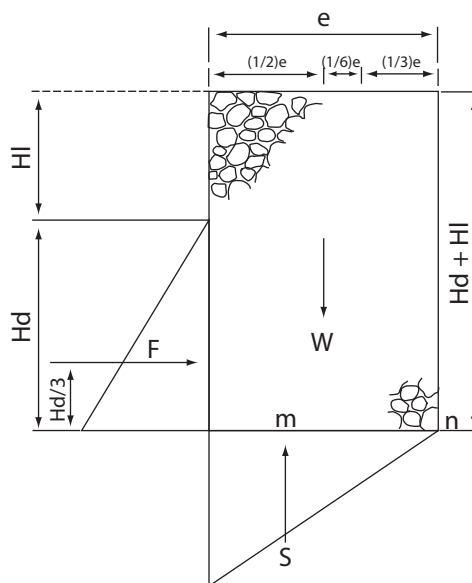


Figura 3. Diagrama de esfuerzos para determinar el ancho de corona

Obteniendo momentos con respecto a "n" se tiene:

Fuerza (kg)	Brazo (m)	Momento (kg-m)
$w = \gamma e (Hd + Hl)$	$-\frac{1}{6}e$	$-\frac{1}{6}e^2\gamma(Hd + Hl)$
$F = \frac{\omega (Hd)^2}{2}$	$\frac{1}{3}Hd$	$\frac{1}{3}\omega Hd^3$
$S = -\frac{K \omega Hd e}{2}$	$-\frac{1}{3}e$	$\frac{1}{6}K \omega Hd e^2$

$$\Sigma Mn = \frac{1}{6}K \omega Hd e^2 - \frac{1}{6}\gamma(Hd + Hl)e^2 + \frac{1}{6}\omega(Hd)^3$$

Para que la resultante pase por el tercio medio, $\Sigma Mn=0$, por lo tanto:

$$\frac{1}{6}K \omega Hd e^2 - \frac{1}{6}\gamma(Hd + Hl)e^2 + \frac{1}{6}\omega(Hd)^3 = 0$$

Simplificando y despejando "e":

$$e = \sqrt{\frac{\omega(Hd)^3}{\gamma(Hd+Hl) - K \omega Hd}} \quad (6)$$

donde:

e = Ancho de la corona (m)
ω = Peso específico del agua con sedimentos (kg/m³)
γ = Peso específico del material de la cortina (kg/m³)
Hd = Carga de trabajo del vertedor (m)

HI = Bordo libre (m)

K = Coeficiente de subpresión (adim.)

Los valores de K pueden variar de 0 a 1 (K=0 para roca, K=1/3 para arcilla, K=1/2 para textura franca y K=2/3 para arena).

2. Cálculo de la base de la presa "B". Con base en la Figura 1, se procede a obtener los momentos con respecto al punto "n". Las fuerzas que se consideran en el análisis son:

W_1 = Peso de la sección rectangular de la cortina (kg)

W_2 = Peso de la sección triangular de la cortina (kg)

F = Empuje del agua (kg)

S = Subpresión (kg)

Obteniendo momentos con respecto a "n" se tiene:

Fuerza (kg)	Brazo (m)	Momento (kg-m)
$F = \frac{\omega (h + Hd)^2}{2}$	$\frac{1}{3} (h + Hd)$	$\frac{1}{6} \omega (h + Hd)^3$
$W_1 = \gamma e Ht$	$-\frac{2}{3} B + \frac{1}{2} e$	$\frac{1}{2} e^2 \gamma Ht$ $-\frac{2}{3} e B \gamma Ht$ $\frac{2}{3} \gamma h B e$
$W_2 = \frac{\gamma h (B - e)}{2}$	$-\frac{1}{3} B + \frac{2}{3} e$	$-\frac{1}{6} \gamma h B^2$ $-\frac{1}{3} \gamma h e^2$
$S = -\frac{1}{2} K \omega (h + Hd) B$	$-\frac{2}{3} B$	$\frac{1}{6} K \omega (h + Hd) B^2$

Para tener la seguridad de que no se presenten tensiones, la resultante de las fuerzas debe pasar por el tercio medio de la base, siendo el límite cuando dicha resultante pasa por "n", con lo cual la suma de momentos con respecto al punto "n" deberá ser igual a cero, es decir, $\sum Mn=0$.

$$\begin{aligned} \sum Mn = & \frac{1}{6} K \omega (h + Hd) B^2 - \frac{1}{6} \gamma h B^2 + \frac{1}{2} e \gamma h B \\ & - \frac{2}{3} e \gamma Ht B + \frac{1}{2} e^2 \gamma Ht - \frac{1}{3} e^2 \gamma h \\ & + \frac{1}{6} \omega (h + Hd)^3 = 0 \end{aligned}$$

Realizando operaciones y agrupando se tiene:

$$\begin{aligned} K \omega (h + Hd) B^2 - \gamma h B^2 + 3e \gamma h B - 4e \gamma Ht B \\ + 3e^2 \gamma Ht - 2e^2 \gamma h + \omega (h + Hd)^3 \\ = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (K \omega (h + Hd) - \gamma h) B^2 + (\gamma e (3h - 4Ht)) B \\ + \gamma e^2 (3Ht - 2h) + \omega (h + Hd)^3 \\ = 0 \end{aligned}$$

Siendo esta última una ecuación cuadrática del tipo $ax^2+bx+c=0$, se puede encontrar el valor de "B" que la satisface por medio de la ecuación general:

$$B = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (7)$$

donde:

$$a = K \omega (h + Hd) - \gamma h$$

$$b = \gamma e (3h - 4Ht)$$

$$c = \gamma e^2 (3Ht - 2h) + \omega (h + Hd)^3$$

En las ecuaciones anteriores las variables B, a, b y c ya han sido definidas y para encontrar el valor de "B" es necesario haber calculado antes el valor de "e", por medio de la ecuación 6, obtener los valores de las variables a, b y c, y sustituirlos en la ecuación 7.

En el Anexo 1 se presentan los valores obtenidos para presas de hasta 6 m de altura efectiva (h), cargas sobre el vertedor (Hd) que varían de 0.2 hasta 1.0 m y Coeficientes de subpresión de 0, 1/3, 1/2, 2/3 y 1.

Una vez calculada la base, se puede utilizar el siguiente procedimiento para verificar la estabilidad de la presa y obtener una *economía técnica* en las dimensiones de la presa, analizando la Figura 4 y siguiendo el siguiente procedimiento.

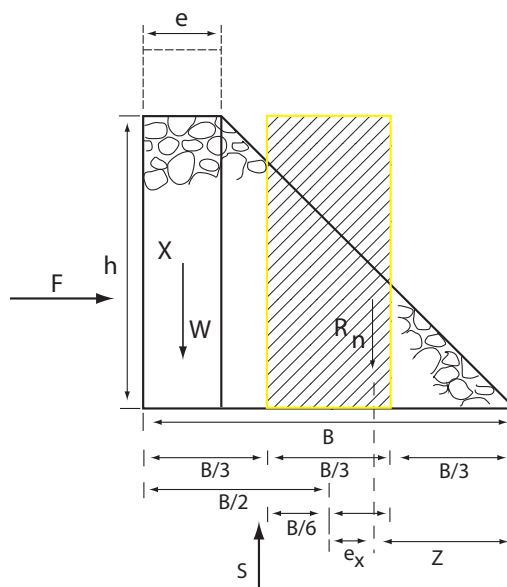




Figura 4. Fuerzas y dimensiones de una presa de mampostería

Donde:

F = Fuerza de empuje (kg)
h = Altura efectiva de la presa (m)
B = Base de la presa (m)
e = Ancho de la corona (m)
S = Subpresión (kg)
x = Centroide (m)
W = Peso de la presa (kg)
R_n = Resultante normal
ex = excentricidad (m)
z = Brazo de palanca (m)

Con base en la Figura 4, se puede construir el siguiente cuadro:

Centros de gravedad y área			
Figura	Centro de gravedad (X)	Área (A)	Producto XA
	$\frac{e}{2}$	$e * h$	$\frac{e^2 h}{2}$
	$\frac{(B - e)}{3} + e$	$(B - e) * \left(\frac{h}{2}\right)$	$\left[\frac{(B - e)}{3} + e\right] * \left[(B - e) * \left(\frac{h}{2}\right)\right]$
		$\sum A$	$\sum XA$

A partir de los datos del cuadro anterior y la Figura 2, se pueden obtener las siguientes relaciones:

Centro de gravedad de la presa (X):

$$X = \frac{\sum XA}{\sum X}$$

Peso de la presa de mampostería (W):

$$W = \gamma * \sum A$$

Fuerza de empuje de los sedimentos (F):

$$F = \gamma_{az} * \left(\frac{h^2}{2}\right)$$

γ_{az} = Peso específico del azolve (kg/m³). Puede variar de 1,100 a 1,400 kg/m³.

Subpresión del agua (S):

$$S = \frac{K \gamma_a h B}{2}$$

donde:

γ_a = Peso específico del agua = 1,000 kg/m³.

La resultante normal se calcula a partir de:

$$R_n = W - S$$

Y el espaciamiento z se calcula con la fórmula:

$$z = \frac{W(B - X) - F\left(\frac{h}{3}\right) - S\left(2\frac{B}{3}\right)}{R_n}$$

Conociendo z se puede calcular la excentricidad (e_x) utilizando la siguiente relación:

$$e_x = \frac{B}{2} - z$$

Para finalmente calcular un factor de seguridad R a través de la relación:

$$R = 600 * \left(\frac{e_x}{B}\right)$$

Este procedimiento se realiza por tanteos en donde se afina el valor de la base (B) calculada previamente, hasta obtener una R que se aproxime a 90%. Si la R es mayor que 90%, es necesario aumentar el tamaño de la base y desarrollar nuevamente los cálculos anteriores; si la R es menor de 90%, hay que reducir el tamaño de la base.

3. Empotramiento o anclado de la estructura. Su finalidad es impedir que el agua flanquee la estructura y origine socavaciones en los flancos que pueden producir brechas en los taludes de las cárcavas.

La "cimentación" debe estar situada a una mayor profundidad que la superficie del "delantal" sobre todo cuando el agua que pasa sobre el vertedor origina una caída sobre su parte posterior, la cual tiende a socavar el fondo de la cárcava y minar al mismo tiempo la base de la estructura y pone en riesgo su estabilidad.

En taludes y fondos, el empotramiento generalmente es de 0.50 m de ancho y de 0.50 m de profundidad pero puede aumentar hasta 1.00 m en aquellos casos en que el suelo sea de textura demasiado gruesa y en donde existen muchas grietas en los taludes, lo que indica que se trata de suelos más propensos a erosionarse.

4. Diseño del colchón amortiguador. Como diseño del colchón amortiguador se entiende el encontrar su longitud y profundidad, de tal modo que en su interior se produzca un salto hidráulico que disipe la energía del agua al caer de la cresta del vertedor al piso de la cárcava. Con un colchón adecuado se evita la socavación aguas abajo de la estructura. La Figura 5 muestra las variables que intervienen en el diseño del colchón hidráulico.

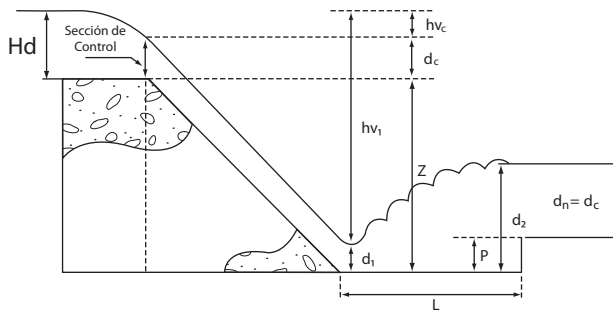


Figura 5. Variables que intervienen en el diseño de un colchón hidráulico

Para proceder al diseño del colchón hidráulico se debe tener en cuenta la Ley de Conservación de Energía (Bernoulli). Si se observa la Figura 5, se tiene:

$$z + d_c + hv_c = d_1 + hv_1 \quad (8)$$

donde:

z = Diferencia de nivel entre la cresta vertedora y el piso del colchón.

d_c = Tirante crítico, nivel del agua sobre la cresta vertedora.

hv_c = Carga de velocidad al presentarse el tirante crítico.

d_1 = Tirante en la sección más contraída de la vena líquida.

hv_1 = Carga de velocidad en el lugar donde se presenta d_1 .

Para resolver la ecuación se debe encontrar el tirante d_1 que la satisfaga por medio de tanteos. Con el fin de encontrar una solución aplicable a todas las cortinas, se consideró que z = altura efectiva de la presa, es decir, $z = h$, y además se utilizó el concepto de gasto unitario (q) que es el gasto que pasa por una longitud de un metro de vertedor.

Considerando lo anterior, las variables involucradas se determinan por medio de las siguientes fórmulas:

$$q = \frac{Q}{Bv} \quad (9)$$

donde:

q = Gasto unitario (m^3/s) / m

Q = Gasto total en el vertedor (m^3/s)

Bv = Longitud de la cresta vertedora (m)

Cálculo del tirante crítico (d_c):

$$d_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} \quad (10)$$

donde:

g = Aceleración de la gravedad = 9.81 m/s^2

La carga de velocidad crítica se calcula con la siguiente ecuación:

$$hv_c = \frac{\left(\frac{q}{d_c}\right)^2}{2g} \quad (11)$$

Y hv_1 se calcula como:

$$hv_1 = \frac{v_1^2}{2g} \quad (12)$$

donde:

$$v_1 = \frac{q}{d_1} \quad (13)$$

Y d_1 se calcula por tanteos.

Una vez calculados z , d_c y hvc , se le dan valores a d_1 , se obtiene el valor de hv_1 y se sustituyen valores en la ecuación 8 para ver si ésta se cumple. Generalmente se requieren varios tanteos para que la diferencia sea mínima y se toma como d_1 el valor obtenido al final.

Una vez obtenido el tirante d_1 que se conoce como "conjugado menor" se calcula el conjugado mayor d_2 , que es la altura de la superficie libre del agua al final del salto hidráulico.

$$d_2 = -\frac{d_1}{2} + \sqrt{\left(\frac{d_1^2}{4}\right) + \left(\frac{2v_1^2 d_1}{g}\right)} \quad (14)$$

Para que el salto se presente en el interior del colchón hidráulico y no en áreas desprotegidas donde causaría daños al cauce, se debe cumplir con las siguientes condiciones (SARH, 1987):

$$L = 5(d_2 - d_1) \quad (15)$$

$$P = d_2 - d_c \quad (16)$$

donde:

L = Longitud del colchón hidráulico (m)

P = Profundidad del colchón hidráulico (m)

Debido al costo de una excavación para darle profundidad al colchón hidráulico es preferible interpretar a P como la altura del dentellón final.

Para fines de elaboración de proyectos ejecutivos, se sugiere que la longitud del tanque dissipador (L) sea igual a la longitud del salto (L_s) multiplicada por un factor de 1.20 y la longitud del salto calculada como 7 veces la diferencia entre los tirantes conjugados, quedando de la siguiente manera (Normas técnicas complementarias del Distrito Federal)²:

$$L_s = 7(d_2 - d_1)$$

$$L_t = 1.20 * L_s$$

<http://cgsservicios.df.gob.mx/prontuario/vigente/747.htm> (2009)

Otros autores indican que la longitud del delantal deberá ser de aproximadamente el doble de la altura efectiva de la presa (Colegio de Postgraduados, 1991).

Finalmente, para tener la seguridad de que el salto sea estable, el número de Froude (Fr) deberá tener un valor entre 4.5 y 9, es decir:

$$4.5 < Fr < 9$$

$$Fr = \frac{v_1}{\sqrt{g d_1}} \quad (17)$$

La relación entre el número de Froude, el tirante conjugado mayor, la longitud del salto hidráulico y los tipos de salto se muestra en la Figura 6.

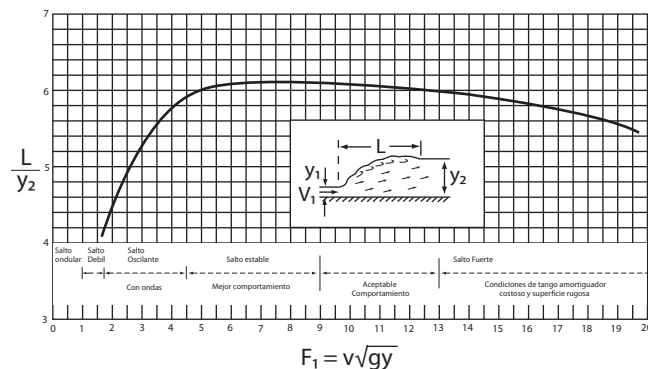


Figura 6. Longitud del salto en canales con poca pendiente

Como se habrá notado, el cálculo de un solo colchón hidráulico es bastante laborioso, pudiendo resultar al final de los cálculos que el salto no es estable, por tal razón en el Anexo 2 se presentan los resultados de dimensiones de presas de mampostería con diferentes cargas sobre el vertedor.

Ejemplo de aplicación

Se considera la sección transversal de un cauce que se muestra en la Figura 7, con un ancho de 13.40 m, una profundidad máxima de 5.63 m y una altura de huella máxima de 0.50 m.

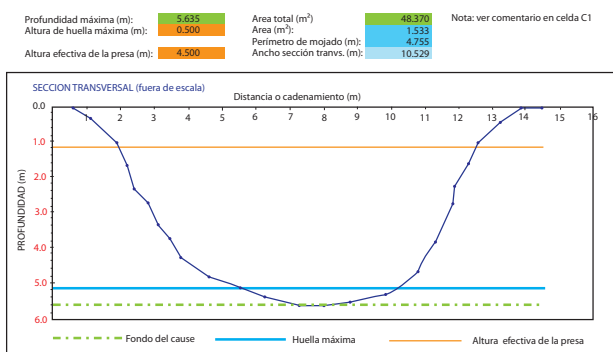


Figura 7. Sección transversal

Además la siguiente información:

Datos a la altura de la huella máxima:

Área hidráulica de la sección: $A = 1.533 \text{ m}^2$

Perímetro de mojado: $P = 4.755 \text{ m}$

Pendiente de la sección: $s = 0.010 \text{ m/m}$ (1%)

Coefficiente de rugosidad de Manning: $n = 0.030$ (marga con cantos rodados)

Coefficiente del vertedor: $C_v = 1.45$

Peso específico de la mampostería: $\gamma = 2,400 \text{ kg/m}^3$

Peso específico del agua con sedimentos: $\omega = 1,200 \text{ kg/m}^3$

Peso específico del azolve: $\gamma_{az} = 1,350 \text{ kg/m}^3$

Peso específico del agua: $\gamma_a = 1,000 \text{ kg/m}^3$

Bordo libre del vertedor: $H_l = 0.20 \text{ m}$

Coefficiente de subpresión: $K = 0.50$ (franco)

Altura efectiva de la presa: $h = 4.50 \text{ m}$

1. Cálculo del escurrimiento máximo

$$Q = A * v$$

Cálculo del radio hidráulico

$$r = \frac{A}{P} = \frac{1.533}{4.755} = 0.32 \text{ m}$$

Cálculo de la velocidad

$$v = \frac{r^{2/3} s^{1/2}}{n} = \frac{(0.32)^{2/3} (0.010)^{1/2}}{0.030} = 1.57 \text{ m/s}$$

$$Q = A * v = 1.533 * 1.57 = 2.40 \text{ m}^3/\text{s}$$

2. Carga sobre la cresta del vertedor

Longitud del vertedor: $L = 3.50 \text{ m}$

$$H_d = \left[\frac{Q}{C_v * L} \right]^{2/3} = \left[\frac{2.40}{1.45 * 3.50} \right]^{2/3} = 0.61 \text{ m}$$

$$H_d = 0.60 \text{ m (redondeada)}$$

3. Cálculo del ancho de la corona "e"

$$e = \sqrt{\frac{\omega (H_d)^3}{\gamma (H_d + H_l) - K \omega H_d}}$$

$$e = \sqrt{\frac{1200 * (0.60)^3}{(2400 * (0.60 + 0.20)) - (0.50 * 1200 * 0.60)}}$$

$$e = 0.41 \text{ m}$$

Redondeando el valor de e tenemos:

$$e = 0.40 \text{ m}$$

4. Cálculo de la base de la presa "B"

Altura total de la presa: $H_t = h + H_d + H_l$

$$H_t = 4.50 + 0.60 + 0.20 = 5.30 \text{ m}$$

Cálculo de las variables a, b y c:

$$a = K \omega (h + Hd) - \gamma h$$

$$a = (0.50 * 1200 * (4.5 + 0.60)) - (2400 * 2400)$$

$$a = -7,740$$

$$b = \gamma e (3h - 4Ht)$$

$$b = 2400 * 0.50 * ((3 * 4.5) - (4 * 5.30))$$

$$b = -7,533$$

$$c = \gamma e^2 (3Ht - 2h) + \omega (h + Hd)^3$$

$$c = 2400 * 0.50^2 ((3 * 5.30) - (2 * 4.5)) + (1200 * (4.5 + 0.60)^3)$$

$$c = 161,933$$

Cálculo de B:

$$B = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

$$B = \frac{-(-7533) \pm \sqrt{(-7533)^2 - 4(-7740 * 161933)}}{2 * (-7740)}$$

$$B = 4.11 \text{ m (preliminar)}$$

5. Análisis de la estabilidad de la presa

Con la información obtenida, se calcula:

El centro de gravedad de la presa:

$$X = \frac{\sum XA}{\sum X} = \frac{14.02}{10.15} = 1.38 \text{ m}$$

El peso de la presa de mampostería (W):

$$W = \gamma * \sum A = 2400 * 10.15 = 24,354 \text{ kg}$$

La fuerza de empuje de los sedimentos (F):

$$F = \gamma_{az} * \left(\frac{h^2}{2} \right) = 1350 * \left(\frac{(4.50)^2}{2} \right)$$

$$F = 13,669 \text{ kg}$$

La subpresión del agua (S):

$$S = \frac{K \gamma_a h B}{2} = \frac{0.50 * 1000 * 4.5 * 4.11}{2}$$

$$S = 4,624 \text{ kg}$$

La resultante normal (Rn):

$$R_n = W - S = 24,354 - 4,624 = 19,730 \text{ kg}$$

Y el espaciamiento z:

$$z = \frac{W(B - X) - F \left(\frac{h}{3} \right) - S \left(2 \frac{B}{3} \right)}{R_n}$$

$$z = \frac{24,354(4.11 - 1.38) - 13,669 \left(\frac{4.5}{3} \right) - 4,624 \left(2 \frac{4.11}{3} \right)}{19,730}$$

$$z = 1.69 \text{ m}$$

Conociendo z calculamos la excentricidad (e_x):

$$e_x = \frac{B}{2} - z = \frac{4.11}{2} - 1.69 = 0.37 \text{ m}$$

Y se obtiene un valor de R de:

$$R = 600 * \left(\frac{e_x}{B} \right) = 600 * \left(\frac{0.37}{4.11} \right) = 53.8\%$$

Dado que R es menor del 90%, se propone un valor de B ajustado y se calcula nuevamente el valor de R logrando un valor de B = 3.87 m y una R de 90.9%. El valor final de B se ajusta a 3.86 m con una R de 92.6%, con lo cual la base de la presa se ajusta a un valor técnicamente económico y dentro de los límites de seguridad de la presa.

Con estos resultados, las dimensiones finales de la presa son:

Altura total de la presa: Ht = 5.30 m

Altura efectiva de la presa: h = 4.50 m

Ancho de la corona: e = 0.40 m

Carga sobre la cresta del vertedor: Hd = 0.60 m

Bordo libre: Hl = 0.20 m

Base de la presa: B = 3.86 m

6. Diseño del colchón hidráulico

Datos disponibles:

Altura efectiva de la presa: h = 4.50 m

Escurrimiento máximo: Q = 2.40 m³/s

Diferencia entre la cresta vertedora y la superficie del colchón: z = 4.50 m

Longitud de la cresta vertedora: Bv = 3.50 m

Cálculos realizados:

Cálculo del gasto unitario (q):

$$q = \frac{Q}{Bv} = \frac{2.40}{3.50} = 0.686 \text{ m}^3/\text{s} / \text{m}$$

Cálculo del tirante crítico (d_c):

$$d_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} = \sqrt[3]{\frac{0.686^2}{9.81}} = 0.363 \text{ m}$$

Cálculo de la carga de velocidad al presentarse el tirante crítico ($h v_c$):

$$h v_c = \frac{\left(\frac{q}{d_c} \right)^2}{2g} = \frac{\left(\frac{0.686}{0.363} \right)^2}{2 * 9.81} = 0.545 \text{ m}$$



Cálculo de $z+d_c+hv_c$:

$$z + d_c + hv_c = 4.50 + 0.363 + 0.545$$

$$z + d_c + hv_c = 5.409 \text{ m}$$

El valor del conjugado menor (d_1) obtenido por tanteos para establecer la igualdad $z+d_c+hv_c=d_1+hv_1$ es:

$$d_1 = 0.067$$

con: $v_1=10.242 \text{ m}$ y $h v_1=5.346 \text{ m}$, obteniendo un valor de:

$$d_1+h v_1=0.067+5.346=5.413 \text{ m}$$

Y una diferencia de: -0.004 m con respecto a: $z+d_c+hv_c$ por lo que se acepta el valor de d_1 .

El valor del conjugado mayor (d_2) obtenido es de: 1.164 m , lo que finalmente arroja un valor de longitud del colchón hidráulico de: $L = 5.48 \text{ m}$ y una profundidad del colchón hidráulico de: $P = 0.80 \text{ m}$.

Estos datos permiten calcular un número de Froude (Fr) de 12.633 lo que indica que no se cumple la condición: $4.5 < Fr < 9$, por lo que se espera un salto fuerte con aceptable comportamiento.

Considerando el criterio de las Normas técnicas complementarias del D.F. (2009), se obtiene una longitud del salto: $L_s = 7.68 \text{ m}$ y una longitud del tanque amortiguador: $L_t = 9.21 \text{ m}$, lo que permite asegurar que el salto ocurra dentro del colchón hidráulico y además cubre el criterio sugerido

por el Colegio de Postgraduados (1991) que considera un delantal de 9.00 m de longitud para una presa de mampostería con una altura efectiva de 4.50 m .

Bibliografía

SARH. 1987. Curso sobre conservación y manejo de suelos con problemas de erosión hídrica.

SARH. Colegio de Postgraduados. 1991. Manual de conservación del suelo y del agua. Montecillo, Estado de México. México. 581 pp.

SEMARNAT-CONAFOR. 2007. Protección, restauración y conservación de suelos forestales. Manual de Obras y Prácticas. Tercera edición. Jalisco, México.

Páginas electrónicas consultadas:

<http://cgsservicios.df.gob.mx/prontuario/vigente/747.htm>.

Elaboró:

Roberto López Martínez (rlopezm@colpos.mx)

José Luis Oropeza Mota (oropeza@colpos.mx)

Especialidad de Hidrociencias del Colegio de Postgraduados, Montecillos, Estado de México. 2009.

Anexo 1

Tabla 1. Dimensiones de Base y Corona si se considera nula la subpresión ($C_s=0$)

Carga sobre vertedor (m)	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00
Altura total del vertedor (m)	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00	1.10	1.20
Ancho de la Corona (m)	0.30	0.30	0.30	0.30	0.40	0.50	0.50	0.60	0.70
Altura efectiva (m)	Ancho de Base (m)								
0.50	0.40	0.45	0.50	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.90
1.00	0.70	0.80	0.90	0.95	1.00	1.00	1.10	1.15	1.20
1.50	1.10	1.15	1.25	1.35	1.35	1.40	1.45	1.50	1.55
2.00	1.50	1.60	1.60	1.70	1.80	1.80	1.90	1.90	1.90
2.50	1.80	1.90	2.00	2.10	2.20	2.20	2.20	2.30	2.30
3.00	2.20	2.30	2.40	2.50	2.50	2.50	2.60	2.70	2.70
3.50	2.50	2.60	2.70	2.90	2.90	2.90	3.00	3.00	3.00
4.00	2.90	3.00	3.10	3.20	3.20	3.30	3.30	3.40	3.40
4.50	3.30	3.40	3.50	3.50	3.60	3.60	3.70	3.70	3.80
5.00	3.60	3.70	3.80	3.90	3.90	4.00	4.00	4.10	4.10
5.50	4.00	4.10	4.20	4.30	4.30	4.40	4.40	4.50	4.50
6.00	4.10	4.40	4.50	4.60	4.70	4.70	4.80	4.80	4.90

Tabla 1. Dimensiones de Base y Corona considerando un coeficiente de subpresión $C_s=1/3$

Carga sobre vertedor (m)	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00
Altura total del vertedor (m)	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00	1.10	1.20
Ancho de la Corona (m)	0.30	0.30	0.30	0.35	0.40	0.50	0.55	0.65	0.70
Altura efectiva (m)	Ancho de Base (m)								
0.50	0.45	0.50	0.55	0.60	0.70	0.75	0.80	0.90	0.95
1.00	0.80	0.85	0.95	1.00	1.10	1.10	1.20	1.25	1.30
1.50	1.15	1.25	1.35	1.45	1.50	1.50	1.60	1.60	1.70
2.00	1.55	1.65	1.80	1.85	1.90	1.95	2.00	2.00	2.10
2.50	1.95	2.05	2.20	2.25	2.30	2.35	2.40	2.45	2.50
3.00	2.35	2.45	2.60	2.65	2.70	2.75	2.80	2.85	2.90
3.50	2.75	2.85	3.00	3.05	3.10	3.15	3.20	3.25	3.30
4.00	3.15	3.25	3.35	3.45	3.50	3.55	3.60	3.65	3.70
4.50	3.55	3.65	3.75	3.85	3.90	3.95	4.00	4.05	4.15
5.00	3.95	4.05	4.15	4.25	4.30	4.35	4.40	4.45	4.65
5.50	4.30	4.45	4.55	4.65	4.70	4.75	4.80	4.85	4.90
6.00	4.70	4.80	4.95	5.00	5.10	5.15	5.20	5.25	5.35

Anexo 2

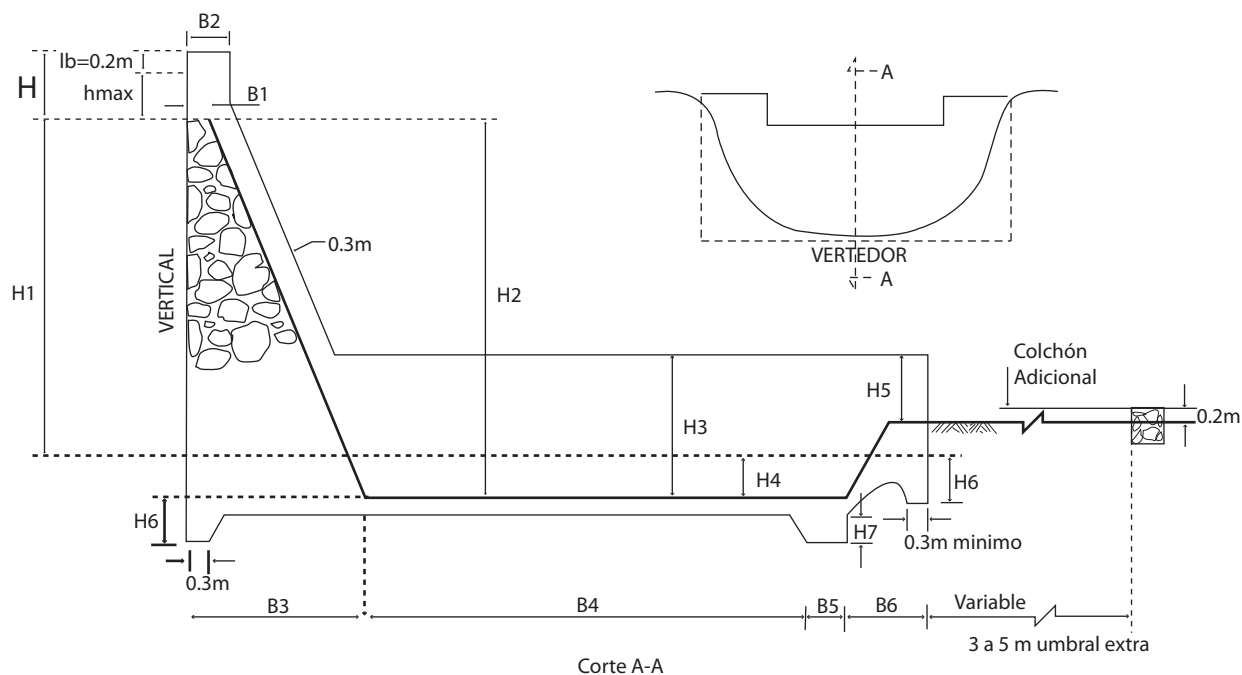


Figura 8. Dimensiones de la cortina de mampostería

Concepto	Carga sobre el vertedor															
	h máx. = 0.30 m				h máx. = 0.80 m				h máx. = 1.30 m				h máx. = 1.80 m			
H	0.50	0.50	0.50	0.50	1.00	1.00	1.00	1.00	1.50	1.50	1.50	1.50	2.00	2.00	2.00	2.00
H1	2.00	3.00	4.00	5.00	2.00	3.00	4.00	5.00	2.00	3.00	4.00	5.00	2.00	3.00	4.00	5.00
H2	3.30	3.40	4.50	4.60	2.30	3.40	4.50	5.60	2.30	3.40	4.50	5.60	2.40	3.50	4.60	5.70
H3	1.30	1.40	2.00	2.10	1.30	1.40	2.00	2.10	1.80	1.90	2.50	2.60	1.90	2.00	2.60	2.70
H4	0.30	0.40	0.50	0.60	0.30	0.40	0.50	0.60	0.40	0.40	0.50	0.60	0.40	0.50	0.60	0.70
H5	0.50	0.50	1.00	1.00	0.50	0.50	1.00	1.00	1.00	1.00	1.50	1.50	1.00	1.00	1.50	1.50
B1	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
B2	0.50	0.50	0.50	0.60	0.50	0.50	0.50	0.60	0.50	0.50	0.50	0.60	0.50	0.50	0.50	0.60
B3	1.40	1.80	2.20	2.60	1.40	1.80	2.20	2.60	1.60	2.00	2.40	2.80	1.60	2.00	2.40	2.80
B4	2.00	3.00	4.00	5.00	2.50	3.80	5.00	6.50	3.00	4.50	6.00	7.50	3.50	5.25	7.00	9.00
B5	0.30	0.40	0.50	0.60	0.30	0.40	0.50	0.60	0.30	0.40	0.50	0.60	0.40	0.50	0.60	0.70
B6	0.60	0.80	1.00	1.20	0.60	0.80	1.00	1.20	0.60	0.80	1.00	1.20	0.60	0.80	1.00	1.20
H6	0.60	0.60	0.70	0.70	0.60	0.60	0.70	0.70	0.70	0.70	0.80	0.80	0.70	0.70	0.80	0.80
H7	0.30	0.30	0.40	0.40	0.30	0.30	0.40	0.40	0.40	0.40	0.50	0.50	0.40	0.40	0.50	0.50

La dimensión B2 se puede variar de acuerdo al criterio técnico.

Las profundidades de la cimentación (H6 y H7) dependen de las condiciones del material que se encuentre en el sitio de la obra.