Revista Técnica de Maquinaria y Obra Pública

Obras Urbanas

enero - febrero 2021
número 85

Drones | Estabilización Taludes | Construcción | Maquinaria

Ventajas técnico-económicas de las barreras flexibles de protección contra flujos de derrubios, en comparación con los métodos tradicionales

***Roberto J. Luis Fonseca**. Dr. Ing. Caminos, Canales y Puertos; GEOBRUGG*
***Rolando Romero Rojas.** Ingeniero Politécnico; GEOBRUGG*
***Gabriel von Rickenbach.** Ingeniero Mecánico; GEOBRUGG*
***Carles Raïmat Quintana**. Dr. Ing. Geólogo; GEOBRUGG*

1. Introducción

Sin duda los principales agentes de la erosión del suelo son el agua y el viento. Combinados, la erosión hídrica y eólica son responsables de aproximadamente el 84% de la extensión global de tierras degradadas, lo que hace que la erosión excesiva sea uno de los problemas ambientales más importantes en todo el mundo. Cada año, alrededor de 75 mil millones de toneladas de suelo se erosionan en la tierra, una tasa que es aproximadamente 13-40 veces más rápida que la progresión natural de la erosión. La presencia de agua como parte de estos fenómenos, provoca se desencadenen corrientes de arrastre de materiales y sedimentos que inciden en el aumento de la vulnerabilidad, en ocasiones provocan pérdidas en vidas humanas e infraestructuras.

El flujo de detritos es una combinación de eventos que se dan como consecuencia de inundaciones o de ocurrencia de fenómenos meteorológicos generalmente con períodos de retorno altos, por lo general suelen ser excepcionales, aunque en algunos lugares se da con relativa frecuencia. Consiste básicamente en el arrastre por un torrente de agua de materiales sueltos, granulares y tierra o lodo, restos de vegetación y en ocasiones troncos de árboles, a través de los cauces naturales del terreno [14]. Al igual que los desprendimientos de rocas, los flujos de detritos actúan de forma dinámica, pero a diferencia de los primeros el impacto de los materiales de arrastre no es puntual, sino distribuido. Además, habitualmente los eventos de desprendimiento de rocas suelen ser aislados, mientras que el flujo de detritos es un fenómeno recurrente que se desarrolla en varias oleadas.

Restauración Hidrológico-Forestal

Frenar o detener al máximo los procesos de erosión y pérdida de suelo es una de las finalidades de los proyectos y obras de Restauración Hidrológico Forestal (RHF), que las diversas administraciones realizan desde hace más de un siglo. Estos proyectos estudian y diseñan las actuaciones destinadas a la estabilización y corrección de lechos torrenciales y a conseguir los objetivos establecidos, con criterios de sostenibilidad, los planes de ordenación de cuenca que se centran, además, en la conservación del agua, suelo y vegetación como los recursos naturales básicos.

Las actuaciones de RHF se concretan en un conjunto de técnicas de ingeniería forestal de conservación de suelos, mejora de las masas forestales, realización obras de hidrotecnia de corrección y defensa de la red de drenaje,

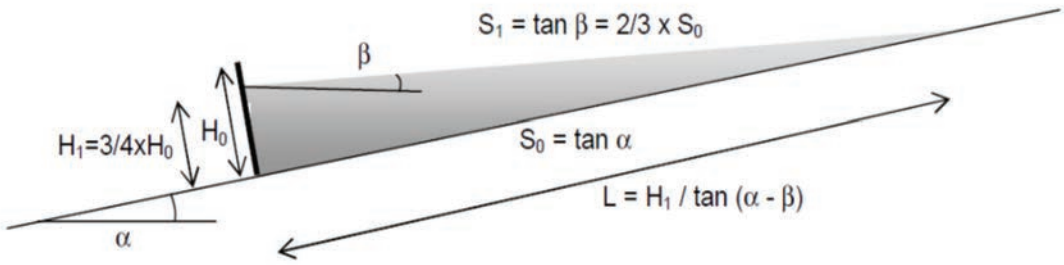


Figura 1. Material acumulado en el trasdós de un dique

conducentes a mitigar las consecuencias negativas de la dinámica torrencial y de sus manifestaciones (erosión, transporte y sedimentación), teniendo en cuenta además los efectos que dichas manifestaciones pueden tener sobre las propiedades, infraestructuras, y lo que es más importante, sobre las vidas humanas [4].

Entre el conjunto de acciones y técnicas que comprende la RHF, el presente se centra, en las obras destinadas a la corrección y estabilización de torrentes, que tienen como finalidad la regulación y control de la erosión hídrica y la defensa de los márgenes y del lecho en régimen torrencial, en las zonas de montaña y con ello evitar la incorporación masiva de materiales a las infraestructuras (embalses y pantanos, carreteras, etc.; prolongando su vida útil) y los núcleos de población.

De las acciones destinadas a la corrección y estabilización de torrentes, las estructuras transversales, principalmente en forma de diques, han tenido una amplia y adecuada implantación con la finalidad de:

- Detener el descenso progresivo del lecho.
- Disminuir la velocidad de las aguas y en consecuencia su capacidad de arrastre.
- Retener los sólidos hasta conseguir una pendiente de compensación menor que la del lecho natural.
- Conseguir con la zona de aterramiento la consolidación de los márgenes fluviales y torrenciales.

Técnicas de corrección y estabilización de torrentes

Los problemas científicos, técnicos o ambientales que presentan los procesos de erosión de las cuencas, no han sido estudiados por igual en todos los tiempos, ni tampoco han sido los mismos los medios disponibles ni las técnicas empleadas en su corrección. El fenómeno torrencial se caracteriza principalmente por la existencia de importantes caudales con contenido de sólidos y la presencia de crecidas repentinas y violentas.

Para dar respuesta a estos fenómenos de erosión, retención de sólidos (materiales en suspensión y en movimiento) y frenar las crecidas violentas, desde principios del siglo pasado, se han venido diseñando y realizando obras transversales (diques), construyéndose de forma consecutiva y transversalmente a lo largo del eje del torrente. Esto posibilita la creación de una cuña de sedimentos y materiales acumulados (Figura 1) que contribuye a la sedimentación de los materiales arrastrados y cambia la pendiente longitudinal del cauce, disminuyendo o incluso controlando que continúe su erosión [15].

La justificación social y económica proviene de las inundaciones con sus secuelas que, aunque aleatorias, siempre presentan aspectos lamentables, de destrucción de cosechas, infraestructuras, e incluso la pérdida de vidas humanas, cuando las circunstancias están rodeadas de características más trágicas. La adopción de medidas de corrección hidrológico-forestal se debe justificar tanto técnica como económicamente. Como justificación técnica de este tipo de actuación se debe tener en cuenta que la corrección de un torrente está orientada a disminuir, anular o controlar los procesos de transporte de sólidos y erosión en el cauce y sus márgenes, evitando que, por este proceso se incorpore importante material sólido a las aguas circulantes [14]. La cuestión básica radica, en adoptar medidas para evitar que, el fenómeno del caudal sólido llegue a reducirse al mínimo o eliminarlo, por depósito y sedimentación de los sólidos incorporados. Por esta razón, así como para el control de desprendimientos e inestabilidad de los macizos adyacentes al eje de un torrente, la ejecución en el cauce de obras transversales al eje del torrente ofrece la solución más simple y efectiva. Los efectos de estas estructuras que cierran contienen, todo el perfil del cauce, hasta la altura del vertedero, son:

- Mientras el elemento de contención se encuentre sin aterrar, el efecto de presa hace que las aguas embalsadas frenen la velocidad de

Figura 2. Principales tipos de diques (hormigón, gaviones y barrera flexible)

llegada de detritos, por pérdida de la energía que mantenía su transporte, se depositan. Como resultado se produce la colmatación.

- Los depósitos que se originan van produciendo un aterramiento que levanta la rasante del cauce, hasta llegar a la pendiente de compensación, menor que la del cauce natural.

Como regla general se pueden utilizar todo tipo de estructuras y materiales, para construir estas obras transversales. Estableciendo una serie de estructuras transversales escalonadas, o bien una gran estructura que retenga un volumen mayor de detritos, siendo el factor decisivo la conformación topográfica, la efectividad y el factor económico. Los materiales y formas de estos diques, se puede decir, que si bien son muy diversos en cuanto a su función principal y a sus formas: de consolidación, retención, laminado de caudales, forma de arco, etc., son casi idénticos en cuanto a materiales empleados en su construcción: hormigón, mampostería hidráulica, gaviones, bloques de escolleras, todos ellas estructuras de carácter pétreo.

En los últimos años, estas obras rígidas o semirrígidas han sido reemplazadas por novedosos diques o barreras flexibles, con un enfoque sostenible y una respuesta tenso-deformacional a las solicitaciones dinámicas mucho más eficiente, a la par que respetuosa con el medio ambiente [7].

El objetivo de este trabajo es presentar un simple análisis comparativo entre tres tipos de solución presuntamente equivalentes *(Figura 2)*: la rígida (muro de hormigón), la semirrígida (muro de gaviones) y la flexible (barrera dinámica fabricada con anillos de alambre de acero de alta resistencia):

2. Estimación de las solicitaciones actuantes

Antes de realizar la comparación, parece atinado hacer una la evaluación de la combinación de cargas, a las cuales estará sometido el dique transversal, sea cual fuere su tipo. Esto permite evaluar desde el punto de vista técnico, cual es problema al que pretender dar solución.

Datos iniciales:

ancho superior en la sección trasversal: 30m
ancho inferior en la sección trasversal: 14m
altura necesaria de protección en la sección trasversal: 6m
densidad del flujo: 21kN/m³
tipo de sustrato: coluvial (suelo)
tipo de flujo estimado: granular
pendiente aguas arriba: 30°
clasificación de flujo: de canal (el material removido, es el que está previamente depositado en el lecho del barranco)

Determinación del caudal del flujo de detritos

Para la determinación del caudal se puede emplear la expresión de Mitzuyama [10], esta expresión permite obtener el valor del caudal máximo esperado en función del tipo de flujo (granular o lodoso), se utilizará la expresión para terreno granular, no solo porque se adecua más a lo observado sino porque se obtienen los valores mayores, lo cual sitúa el análisis en el lado de la seguridad.

$$Q_{P\ granular} = 0{,}135 \cdot v^{0{,}78} \qquad (1)$$

donde:
Q_P: caudal máximo del flujo de detritos, [m³/s]
v: volumen del material arrastrado, que se prevé acumular en el trasdós, [m³]
$Q_P = 35{,}5\ m^3/s$

El volumen v, se puede estimar a partir de las expresiones descritas en la *Figura 1*, sin embargo, se puede determinar con mayor grado de precisión a partir de la información topográfica en 3D [18] *(Figura 3)*. El caso de estudio el volumen máximo a acumular tras el dique es de 1.264m³, despreciando la posible influencia de la sección transversal del dique.

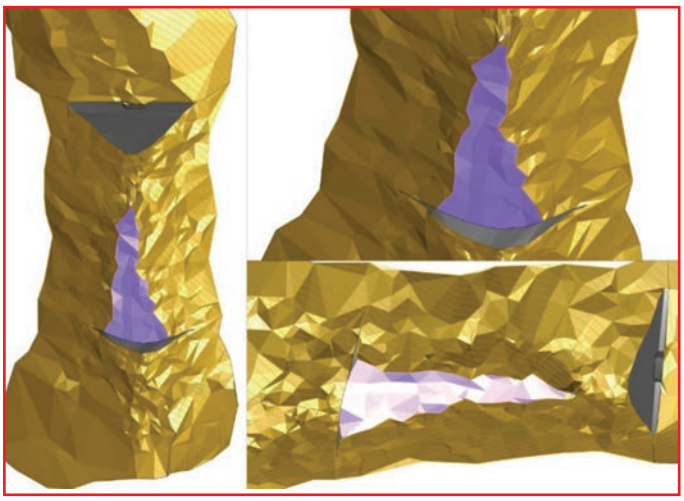


Figura 3. Determinación topográfica de los volúmenes acumulados [18]

Determinación de la velocidad del flujo

En general para estimar este parámetro se recurre a la expresión de Rickenmann [13] que propone una relación entre el caudal y la velocidad de este, a partir de la pendiente del curso.

$$v = 2{,}1 \cdot Q_P^{\,0{,}33} \cdot S_0^{\,0{,}33} \qquad (2)$$

donde:

v: velocidad, [m^3/s]

S_0: tangente de la pendiente del curso aguas arriba

v = 5,7 m/s

Presión cuasi estática esperada en el trasdós de la barrera

La presión estimada en el trasdós de la barrera es la suma de una componente dinámica que produce el primer contacto (impacto de la oleada contra el dique) a la cual que hay que sumar la carga estática de la acumulación del material, esto se puede determinar según Wendeler [17], siguiendo la siguiente expresión:

$$F_{TOTAL} = \tfrac{1}{2} \cdot \gamma \cdot g \cdot H_1^2 + C_w \cdot \gamma \cdot v^2 \cdot H_1 \qquad (3)$$

donde:

F_{TOTAL}: fuerza cuasi-estática en el trasdós [kN/m]

γ: densidad del flujo de detritos [kN/m^3]

H_1: altura del flujo [m]

v: velocidad [m^3/s]

g: aceleración de la gravedad [m/s^2]

C_W: coeficiente de impacto dinámico [0,7~1,0 flujo lodoso – 2,0 flujo granular]

F_{TOTAL} = 819,9 kN/m

Luego la presión cuasi-estática esperada sobre el trasdós del dique será el cociente de esta fuerza dividido por la altura del dique, es decir 136,64kN/m^2.

3. Alternativa 1. Dique semirrígido de gaviones

A continuación, se presenta un resumen del dimensionamiento tanto hidráulico como estructural del dique de gaviones realizado por Jamanca [6]. Este tipo de dique se trata de una estructura que está conformada por varias hiladas de gaviones, de acuerdo con la altura de protección requerida. En la *Figura 4* se muestra la geometría del dique diseñado. Para este tipo de estructura, resulta muy importante controlar el correcto empotramiento del dique de contención, tanto en los márgenes del barranco, como en el lecho, además hay que procurar la formación de un vertedero al centro, capaz de conducir el caudal máximo de diseño, previamente calculado.

El diseño del dique de gaviones [16] tiene por objeto conocer el dimensionamiento más adecuado de las cajas que forman el cuerpo de la obra y la estabilidad de estos, considerando básicamente lo siguiente:

- la geometría de la sección transversal en el barranco donde será emplazada la solución.
- la capacidad de almacenamiento asociado a su capacidad de retención y la geometría del cauce aguas arriba.
- el caudal del diseño que tiene el barranco para diseñar la capacidad máxima del vertedero.
- cimentación y empotramientos mínimo, requeridos en el fondo y los márgenes del barranco, para evitar filtraciones que debiliten la estabilidad.
- dimensiones de colchón de amortiguamiento aguas abajo del dique, a fin de evitar el golpe de la caída del agua sobre el lecho y que este genere socavación y pérdida de estabilidad. Así mismo redireccionar los flujos al centro de la estructura con el empleo de muros de encauzamiento tanto aguas arriba como aguas abajo.

Tras la evaluación hidráulica de la geometría del vertedero [1], del tanque o colchón amortiguador y de los muros de encauzamiento, se obtienen los siguientes valores:

Tipo de vertedero:	rectangular
Longitud:	15m
Altura:	1m

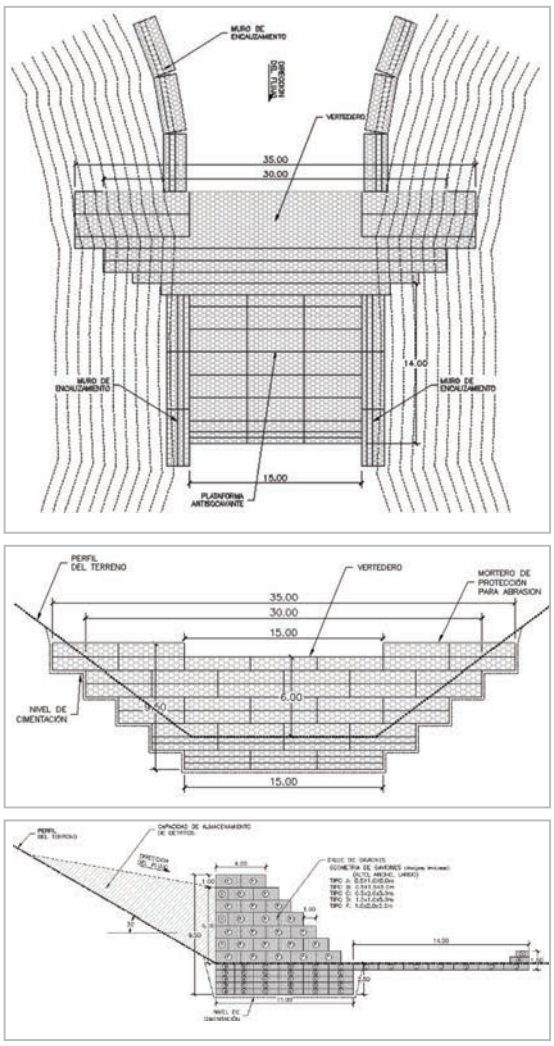


Figura 4. Vista en planta, sección transversal y longitudinal del dique de gaviones

Longitud de colchón:	4,05m	
Tirante al pie:	1,33m	
Conjugada menor:	0,18m	
Profundidad del remanso:	1,57m	
Longitud total de la fosa:	13m	
Longitud de socavación potencial:		2,02m
Altura de muros de encauzamiento:		3,0m

Resumen del procedimiento de diseño

El cálculo del dique de gaviones se realiza a partir de la sección crítica unitaria, luego las dimensiones están referidas a la unidad de ancho del muro. En este caso se ha considerado una sección inicial de relación altura total y ancho de 0,70. A partir de ahí se comienza a evaluar las estabilidades externas como internas y de forma iterativa alcanzar los factores de seguridad mínimos admisibles (Tabla 1). Bajo este concepto, los factores de seguridad obtenidos son los siguientes:

Criterio de estabilidad	Factor de seguridad obtenido	Factor de seguridad admisible	Aceptabilidad
Estabilidad deslizamiento	1,56	1,50	admisible
Estabilidad al vuelco	2,65	2,00	admisible
Evaluación de excentricidad	2,39	1/3 de la base	trabajo a comprensión
Capacidad admisible del terreno	-	1915 kN/m^2	-
Esfuerzos máximos en la cimentación	σ1 = 320,00 kN/m^2	1915 kN/m^2	admisible
	σ2 = 88,68 kN/m^2	1915 kN/m^2	admisible

Tabla 1. Factores de seguridad obtenidos

Considerando la geometría del cauce en base a los criterios de diseño, el volumen de almacenamiento-retención de esta estructura será aproximadamente de 988m^3.

A continuación, se observan los componentes individuales del gavión, así como el sistema de encofrados metálicos *(Figura 5)* que se suele emplear para garantizar la uniformidad de la cara exterior, en el proceso de instalación en obra *(Figura 6)*.

Figura 5. Materiales componentes (malla y piedras) y encofrado para gaviones

Figura 6. Fabricación de un dique de gaviones y estado final del mismo

Ítem	Descripción	Unidades	Cantidad
1	TRABAJO PRELIMINAR		
1.01	Movilización y desmovilización de personal y equipos	PA	1,00
1.02	Excavación en material no clasificado	m^3	1.337,80
1.03	Eliminación de material	m^3	1.337,80
1.04	Topografía, trazo y replanteo	m^2	595,00
2	CONSTRUCCIÓN		
2.01	Suministro de gavión caja 10x12cm PVC ø 3,70mm 0,5x1,0x5,0m	ud.	9,00
2.02	Suministro de gavión caja 10x12cm PVC ø 3,70mm 0,5x1,5x5,0m	ud.	43,00
2.03	Suministro de gavión caja 10x12cm PVC ø 3,70mm 0,5x2,0x5,0m	ud.	95,00
2.04	Suministro de gavión caja 10x12cm PVC ø 3,70mm 1,0x1,0x5,0m	ud.	24,00
2.05	Suministro de gavión caja 10x12cm PVC ø 3,70mm 1,0x1,5x5,0m	ud.	6,00
2.06	Suministro de gavión caja 10x12cm PVC ø 3,70mm 1,0x2,0x5,0m	ud.	130,00
2.07	Suministro de piedra (canto rodado 6 a 8")	m^3	2.123,75
2.08	Encofrado	m^2	715,50
2.09	Hormigón para controlar abrasión en gaviones	m^3	28,00

Tabla 2. Unidades de obra para la ejecución de un dique de gaviones

Mediciones y valoración económica

A partir de las dimensiones antes propuestas se obtienen las siguientes mediciones *(Tabla 2)*, que resumen los trabajos a ejecutar en obra:

A partir de las unidades aquí descritas, conociendo los precios unitarios y rendimientos, se puede hacer una estimación, tanto del coste índice, como de la duración temporal de las actividades necesarias para la fabricación del dique *(Tabla 3)*. Esta estimación persigue un único fin, poder hacer una comparación relativa entre soluciones, todas basadas en condiciones y parámetros análogos, sin incluir: costes operativos, financieros y legales, impuestos u obligaciones, permisos, posibles regulaciones ambientales y gastos generales asociados. Los precios unitarios se obtuvieron de la base de datos disponible en el mercado [3] para proyectos similares y consideran los costos del material, instalación y equipos hasta 2020.

4. Alternativa 2. Dique rígido de hormigón armado

Al igual que los diques de gaviones esta estructura trabaja a peso propio. Para poder efectuar el diseño de un dique de hormigón armado se requiere de un conocimiento previo de las condiciones del sitio en relación con la topografía, geología, hidrología y mecánica de suelos, fundamentalmente en la etapa que se ha dado en llamar estudios previos, algunos de ellos determinados en el epígrafe 2, donde a partir de estas condiciones iniciales calculan las solicitaciones de diseño [9]. Se debe cumplir la condición de que la resultante de todas las fuerzas, sobre un plano de corte horizontal cualquiera, debe cortar a dicho plano dentro del tercio medio, a dique lleno y a dique vacío.

El muro diseñado ha de ser además seguro al deslizamiento, el factor de seguridad contra el deslizamiento FSD mayor de 1,5. De igualmente se ha de chequea a vuelco y capacidad admisible mayor a 2 [5]. Los esfuerzos en todos los puntos de la estructura deben ser menores que los máximos esfuerzos permisibles especificados y para las condiciones más desfavorables de cargas [12].

Resumen del procedimiento de diseño

A partir de los datos definidos en el punto 2 y considerando el procedimiento de dimensionamiento propuesto [6], se procede al hacer una descomposición de fuerzas cuasi-estáticas actuante en el trasdós del muro (3). Esta fuerza, se divide en dos componentes, ya que el punto de aplicación difiere y resulta importante a la hora de evaluar los momentos.

$$F_{TOTAL} = F_1 + F_2 = 819{,}9 \text{ kN/m}$$

$$F_{1/m} = \tfrac{1}{2} \cdot \gamma \cdot g \cdot H_1^2 = 208{,}6 \text{kN/m}$$
(componente estática)

$$F_{2/m} = C_w \cdot \gamma \cdot v^2 \cdot H_1 = 611{,}3 \text{kN/m}$$
(componente dinámica)

Para considerar el valor total de cada componente de la fuerza, debe evaluarse la presión en la sección transversal efectiva al centro del dique (11m x 5,1m).

$$F_1 = 3{,}5 t/m^2 \cdot 56{,}1 m^2 = 196{,}4t$$
$$F_2 = 10{,}2 t/m^2 \cdot 56{,}1 m^2 = 572{,}2t$$

Ítem	Descripción	Ejecución, [días]	Presupuesto, [€]
1	Dique de gaviones	46	197.715

Tabla 3. Presupuesto y duración de obra de un dique de gaviones

Con estos valores, junto a sus respectivas ubicaciones, que se presentan a continuación:

Ubicación de F_1 (y_1) : H/3 = 2,2m
Ubicación de F_2 (y_2) : H/2 = 3,3m

Se puede obtener la solicitación de momento a vuelco respecto al punto de evaluación:

Momento actuante 1 (M_1) : $F_1 \cdot y_1$ = 432,1t.m
Momento actuante 2 (M_2) : $F_2 \cdot y_2$ = 1.888,3t.m

Para la evaluación de la estabilidad del dique se tiene que calcular las fuerzas y momentos resistentes, los cuales son producidos por los pesos propio de los elementos, en este caso de la zapata, la pantalla, y contrafuertes. El relleno entre contrafuertes se desprecia, en tanto el dique estará vacío ante el primer impacto, luego el trasdós este relleno, se convertirá en una fuerza estabilizadora. En la *Figura 7* se muestran los diferentes cuerpos que componen la sección del dique y sus dimensiones:

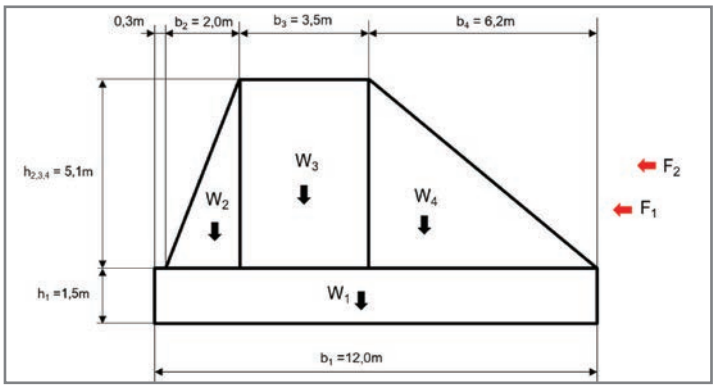


Figura 7. Dimensiones del dique de hormigón

Donde bi es la base y hi la altura del elemento, Se es la longitud de sección efectiva y Sc es el ancho total que cubrirá el contrafuerte (80cm por unidad, espaciados a 1,4m).

El peso propio de los elementos se determina como sigue:

zapata	(W_1)	$h_1 \cdot S_e \cdot b_1 \cdot \gamma_h$	=	475,2t
cara dique	(W_2)	$0,5 \cdot h_2 \cdot S_e \cdot b_2 \cdot \gamma_h$	=	134,6t
pantalla	(W_3)	$h_3 \cdot S_e \cdot b_3 \cdot \gamma_h$	=	471,2t
contrafuerte	(W_4)	$0,5 \cdot h_4 \cdot S_c \cdot b_4 \cdot \gamma_h$	=	182,1t

Las ubicaciones con respecto al origen de coordenadas serán las siguientes:

W_1	(X_1)	: $b_1/2$	=	6,00 m
W_2	(X_2)	: $0,3+2/3 \cdot b_2$	=	1,63 m
W_3	(X_3)	: $0,3+b_2+b_3/2$	=	4,05 m
W_4	(X_4)	: $0,3+b_2+b_3+b_4/3$	=	7,87 m

Con lo que, los momentos resistentes M_{Ri} se obtienen del producto de $W_i \cdot X_i$

M_{R1}	$W_1 \cdot X_1$ =	2.851,2 t.m
M_{R2}	$W_2 \cdot X_2$ =	219,9 t.m
M_{R3}	$W_3 \cdot X_3$ =	1.908,5 t.m
M_{R4}	$W_4 \cdot X_4$ =	1.432,8 t.m

A continuación, se procede a calcular los factores de seguridad a la estabilidad *(Tabla 4)* tanto a deslizamiento como por vuelco.

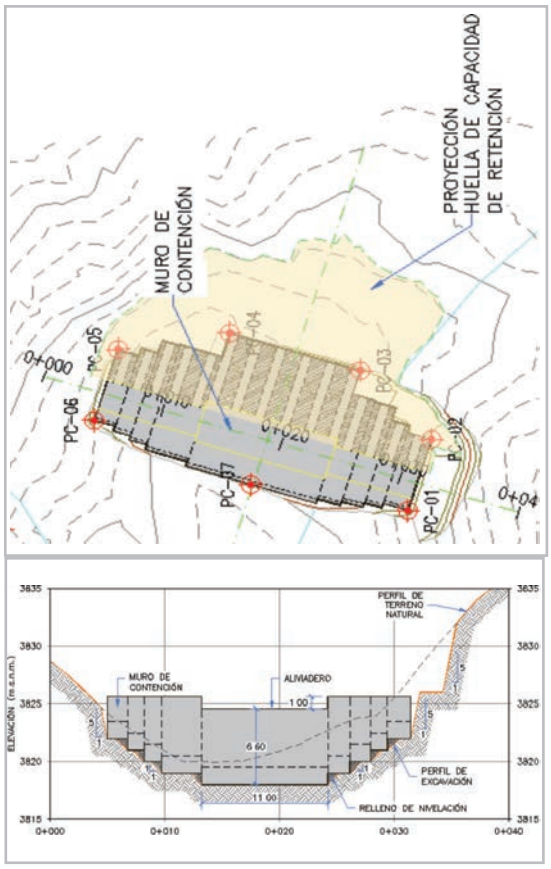
$FS_D = \Sigma W_i / \Sigma F_i$ = 1.263,1 / 768,6 = 1,64 > 1,50 [admisible]
$FS_V = \Sigma M_{Ri} / \Sigma M_i$ = 6.412,4 / 2.320,4 = 2,76 > 2 [admisible]

Criterio de estabilidad	Factor de seguridad obtenido	Factor de seguridad admisible	Aceptabilidad
Estabilidad deslizamiento	1,64	1,50	admisible
Estabilidad al vuelco	2,76	2,00	admisible

Tabla 4. Factores de seguridad obtenidos

En relación con el diseño estructural, (cuantía de acero) el cada uno de los elementos componentes del dique, se atiende a lo diseñado y propuesto por Jamanca en [6]. En la *Figura 8* se puede apreciar una vista en planta, así como y las secciones longitudinal y transversal de la solución.

Considerando la geometría del cauce en base a los criterios de diseño, el volumen de almacenamiento-retención de esta estructura será aproximadamente de 1.120m^3.



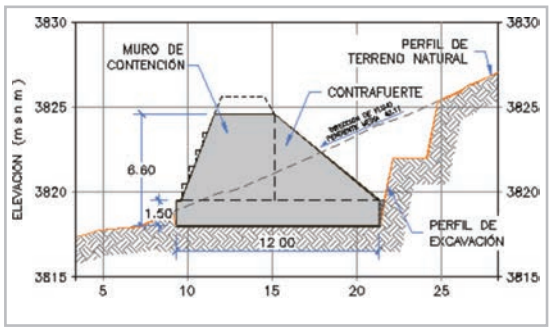


Figura 8. Vista en planta, sección transversal y longitudinal del dique de hormigón armado

A continuación *(Figuras 9 y 10)* se pueden apreciar algunos pasos del proceso constructivo de un dique de hormigón armado, hasta su terminación definitiva.

Figura 9. Encofrado y acero de refuerzo para un dique de hormigón armado

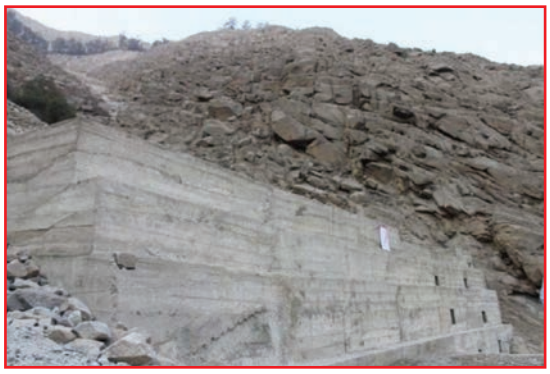


Figura 10. Fabricación de un dique de hormigón armado en Chosica. Perú

Mediciones y valoración económica

A partir de las dimensiones antes propuestas se obtienen las siguientes mediciones (Tabla 5), que resumen los trabajos a ejecutar en obra:

Tabla 5. Unidades de obra para la ejecución de un dique de hormigón armado

Item	Descripción	Unidades	Cantidad
1	TRABAJO PRELIMINAR		
1.01	Movilización y desmovilización de personal y equipos	PA	1,00
1.02	Excavación en material no clasificado	m^3	1.100,24
1.03	Relleno y compactación con material propio	m^3	129,70
1.04	Eliminación de material	m^3	980,54
1.05	Topografía, trazo y replanteo	m^2	745,60
2	CONSTRUCCIÓN		
2.01	Encofrado y desencofrado	m^2	910,66
2.02	Acero de refuerzo f'y = 4.200 kg/cm^2	kg	86.456,52
2.03	Hormigón f'c = 280 kg/cm^2	m^3	1.002,07

Al igual que con el dique de gaviones partir de las unidades descritas, conociendo los precios unitarios y rendimientos, se puede hacer una estimación, tanto del coste índice, como de la duración temporal de las actividades necesarias para la fabricación del dique *(Tabla 6)*. Esta estimación persigue un único fin, poder hacer una valoración relativa entre soluciones, todas basadas en condiciones y parámetros análogos, sin incluir: costes operativos, financieros y legales, impuestos u obligaciones, permisos, posibles regulaciones ambientales y gastos generales asociados. Los precios unitarios se obtuvieron de la base de datos disponible en el mercado para proyectos similares y consideran los costos del material, instalación y equipos [3].

Item	Descripción	Ejecución, [días]	Presupuesto, [€]
2	Dique de hormigón armado	60	343.918

Tabla 6. Presupuesto y duración de obra de un dique de hormigón armado

5. Alternativa 3. Dique flexible de anillos de acero [UX Geobrugg]

Resumen del procedimiento de diseño

Los sistemas de barreras de protección contra flujos de detritos, inicialmente basados en las barreras de protección contra desprendimientos de Geobrugg, cuentan con marcado CE y están certificados siguiendo el documento normativo europeo EAD-340020-00-0106 "Flexible kits for retaining debris flows and shallow landslides" de junio de 2016 [2].

Estos diques son permeables por construcción, la solicitación combinada de cargas del fluido en este caso granular, impacta sobre la membrana y como consecuencia se produce la retención de los sólidos de mayor tamaño y la decantación de materiales finos, así como la salida del agua. Las solicitaciones cuasi-estáticas, se transmiten de la red anular a los cables de soporte y de ellos al interior de terreno estable mediante anclajes flexibles de cable [8]. Como se trata de sistemas dinámicos, la efectividad de este se basa en la elongación controlada del conjunto, para ello se disponen elementos de frenado en forma de tubos anulares que permiten la elongación segura de los cables durante el proceso de intercepción del fluido. La red de anillos Rocco® es de tipo ASM 4:1 tiene, además de la facultad probada para absorber impactos puntuales [11], la capacidad ideal para detener impactos de carga distribuidas y en oleadas, como las que genera un flujo de detritos *(Figura 11)*. En el caso de un flujo granular, se da la particularidad que el frente está compuesto en general por bloques de mayor tamaño.

Para la ubicación del dique las condicionantes son mucho menos restrictivas que para los muros antes expuestos. La inclinación debería ser la menor posible para reducir la velocidad de impacto y ampliar la capacidad de retención. Simplemente el emplazamiento debería estar accesible para asegurar una inspección inmediata y una limpieza si fuera necesaria y que su función así lo previese. La zona de cimentación de los anclajes de la barrera tiene que ser suficientemente estable para soportar las cargas transmitidas; normalmente no hay que tomar medidas de protección adicionales. A continuación, se muestra una vista en planta, una sección en la dirección del cauce y otra perpendicular al mismo *(Figura 12)*.

En este caso el dimensionamiento es relativamente sencillo, ya que Geobrugg dispone de un sistema estandarizado de barreras, para dar solución a diferentes requerimientos de carga cuasi-estática. La presión cuasi-estática sobre el trasdós del dique ha sido calculada en el epígrafe (2) es decir 136,64kN/m^2. Luego parece atinado proponer como solución, para este caso una barrera Geobrugg UX-180 de 6m de altura con una capacidad de hacer frente a cargas cuasi-estáticas de 180kN/m^2.

Los diques flexibles han de ser comprobados con regularidad, limpiadas y reparadas si fuera necesario inmediatamente después de un acontecimiento (si fuese el caso). La limpieza de una

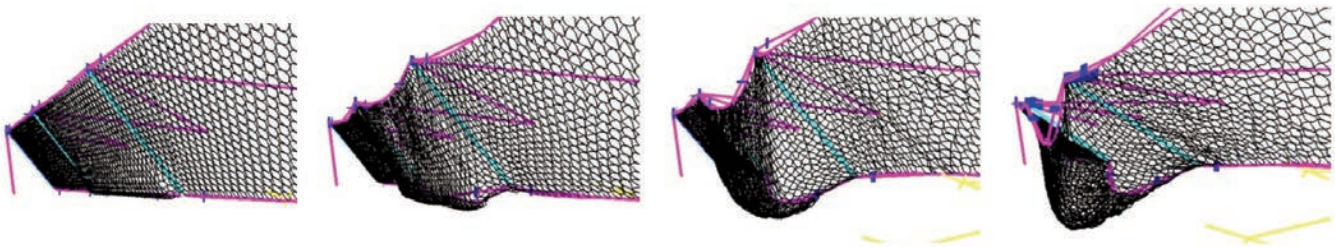


Figura 11. Simulación del impacto empleado elementos finitos mediante el programa Faro

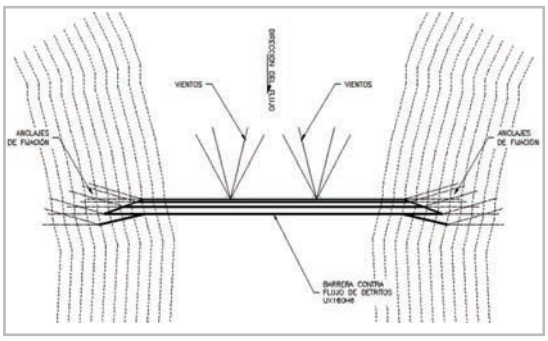
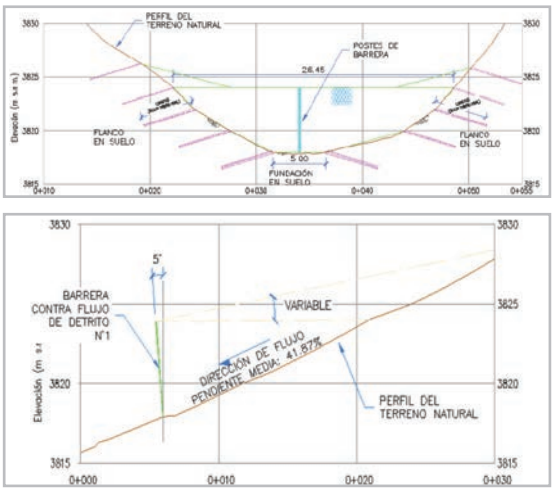


Figura 12. Vista en planta, sección transversal y longitudinal del dique de hormigón armado



barrera es fácilmente practicable, siendo el mayor condicionante la accesibilidad, como regla general las barreras utilizadas como diques de control hidrológico no se limpian [7], en caso de colmatación la solución más efectiva es proceder con una alineación adicional. En caso de que se empleen como elemento de protección en las inmediaciones de una infraestructura, habrá accesos y se podrá vaciar de forma segura y con garantía de accesos. En cualquier caso, los elementos de freno que han trabajado (deformación plástica) deben ser reemplazados. Este es el único elemento que habitualmente hay que sustituir después de acontecimientos de máxima solicitación.

Mediciones y valoración económica

A partir de las dimensiones antes propuestas se obtienen las siguientes mediciones *(Tabla 7)*, que resumen los trabajos a ejecutar en obra:

A partir de las unidades descritas, se hace una estimación de los precios por el fabricante *(Tabla 8)* con la finalidad, de establecer la comparación entre soluciones, todas basadas en condiciones y parámetros análogos, sin incluir: costes operativos, financieros y legales, impuestos u obligaciones, permisos, posibles regulaciones ambientales y gastos generales asociados.

Item	Descripción	Ejecución, [días]	Presupuesto, [€]
3	Dique flexible Geobrugg UX-180H6	30	166.250

Tabla 8. Presupuesto y duración de obra de un dique flexible

A continuación *(Figuras 13-17)* se presentan un conjunto de fotografías que describe el proceso constructivo de un dique flexible a partir de la instación de sistema Geobrugg UX-180H6.

6. Análisis comparativo

Consideraciones de carácter económico

Es en cualquier caso sumamente importante a la hora de decidir cuál de las alternativas es la más eficiente seguir criterios de carácter técnico-económico, no siempre la solución más económica es la más efectiva desde el punto de vista técnico, a continuación, se presenta una Tabla (9) resumen de las tres alternativas estudiadas objeto de

Item	Descripción	Unidades	Cantidad
1	TRABAJO PRELIMINAR		
1.01	Movilización y desmovilización de personal y equipos	PA	1,00
1.02	Topografía, trazo y replanteo	m^2	745,60
1.03	Accesos para trabajos verticales y líneas de vida	ud.	2,00
2	CONSTRUCCIÓN		
2.01	Encofrado y desencofrado bases postes	m^2	8,00
2.02	Perforación para anclajes y micropilotes	m	85
2.03	Colocación de barras y anclajes flexibles e inyección	m	85
2.04	Colación de bases y montaje de los postes	ud.	2
2.04	Cableado perimetral	m	200
2.04	Colocación y extensión de la red Rocco®	m^2	135
2.04	Montaje de malla secundaria	m^2	135
2.04	Elementos de protección contra abrasión	ud.	20

Tabla 7. Unidades de obra para la ejecución de un dique flexible

Figura 13. Replanteo y líneas de vida

Figura 14. Perforación y ejecución de las bases

Figura 15. Comprobación de anclajes, colocación de postes y cableado

Figura 16. Extensión de la red de anillos Rocco® y revisión final

Figura 17. Estado final

comparación en este trabajo. En ella, se resume no solo el coste directo básico, sino que se añade la duración de los trabajos como un elemento adicional a considerar. Es bien sabido que este tipo de soluciones generalmente se ejecutan en régimen de emergencia luego, el plazo es sin lugar a duda unos de los paramentos más importante a considerar.

Aunque la diferencia no es significativa, debido a la ligereza de la solución flexible, es más eficiente en cuanto a la capacidad de retención de materiales en su trasdós ya que la propia solución no ocupa espacio, las otras dos alternativas son masivas ya que necesitan peso y volumen para trabajar a gravedad, y ello implica espacio.

Tal y como se observa el dique flexible es la alternativa sin ninguna duda más económica, siendo los gaviones un 20% más costosa y el muro de hormigón armado más del doble.

Tanto la solución de gaviones con de hormigón requieren imprescindiblemente la ejecución de caminos de acceso (no considerados en la comparativa), que además de ser muy costosos desde el punto de vista económico, en general tienen un elevado coste ambiental, pocas veces considerado. Las soluciones flexibles son nada intrusivas sean cuales fueren los medios de transporte a utilizar, solo hay que trasladar el material y los equipos de perforación ligeros al emplazamiento.

El material pétreo adecuado para la fabricación de los gaviones es generalmente deficitario, su transporte hasta obra no está incluido, en general se suele usar material local, que en la mayoría de casos, no garantiza los requerimientos de drenaje (25% porosidad).

En relación con la duración de los trabajos (ejecución material), es evidente que las soluciones flexibles son muy rápidas de ejecutar, en relación con un dique de hormigón los valores rondan la mitad de tiempo y los gaviones demoran alrededor de 50% más.

Durante la ejecución de los diques tanto rígidos como semirrígidos es también necesario un control

Opción	Descripción	Capacidad de retención, [m^3]	Duración de la obra, [días]	Valoración económica, [€]
1	Dique semirrígido de gaviones	988	46	343.918
2	Dique rígido de hormigón armado	1.120	60	197.715
3	Dique flexible Geobrugg UX-180H6	1.264	30	166.250

Tabla 9. Elementos por comparar

topográfico continuo, para garantizar la correcta puesta en obra y velar por los resultados estéticos, mientras que en las barreras flexibles este trabajo se reduce al correcto replanteo inicial de los puntos de anclaje, sin necesidad de dar continuidad a la tarea, durante la instalación.

Consideraciones de interés técnico

Las soluciones rígidas y semirrígidas presentan una serie de inconvenientes de carácter técnico que repercuten además en el proceso de selección y que se ha de considera en función de las condiciones existente en el emplazamiento:

- posible pérdida de estabilidad debido a asientos diferenciales, en los casos donde no hay garantía de que el lecho de cimentación sea estable en toda su longitud, esto se pudiese controlar si se consigue desplantar la cimentación sobre la roca limpia, pero en múltiples ocasiones esto no es factible, de forma adicional se puede intentar paliar el problema, garantizando la adecuada compactación de la superficie en la que se pretende establecer la cimentación, sin embargo en ocasiones es difícil conseguir buenos resultados, debido a la imposibilidad de llevar a lugar equipos de compactación adecuados y a la imposibilidad de dar garantía a la impermeabilidad.

- rotura debido al impacto de bloques de gran entidad, mala respuesta ante solicitaciones dinámicas, la respuesta ante impacto de bloques en el trasdós de los muros tanto de gaviones como de hormigón es muy limitada, basan su efectividad en el trabajo por gravedad, por ende son pesados, en múltiples ocasiones el impacto de las primera oleadas causa desperfectos en la superficie del dique, poniendo a veces la descubierto el acero de refuerzo en el hormigón, o sencillamente rompiendo los alambre de los gaviones, haciendo que los alambres de las cajas se rompan, en todo caso quitando capacidad de la soluciones.

- incremento en las tensiones cuasi-estáticas en el trasdós del muro debido a la dificultad del drenaje. A pesar de que los gaviones son presuntamente permeables, en raras ocasiones se consigue los valores de porosidad adecuados, luego se suelen generar presiones adicionales, en el trasdós debido a que no se libera la presión hidrostática. En el caso de los muros de hormigón el drenaje está presumiblemente garantizado por diseño, pero en muchos casos, no funciona de forma adecuada.

- socavación trasera -en la cimentación del trasdós por acción de limpieza de los flujos posibles hiper-concentrados previos.

- socavación lateral –erosión en las márgenes laterales

- socavación anterior –erosión en el pie intradós, posible vuelco invertido, en todas las soluciones hay que velar por este problema. Sin embargo, esta preocupación, deja de tener sentido en las soluciones flexibles, en las que como concepto la cimentación no está presente, por ende, no existe este peligro.

- pérdidas de capacidad por abrasión en la coronación (casos de soluciones escalonadas en las que está previsto el sobre paso) importante en hormigón (el acero de refuerzo queda al descubierto) extremadamente crítico en muros de gaviones de acero normal.

- Las soluciones rígidas y semirrígidas presuponen que para la ejecución de la cimentación se produzca la excavación de material, cuyos restos de alguna forma suelen permanecer de forma inestable en las inmediaciones.

7. Referencias

[1] Camargo, J. (2001) Manual de gaviones. Series del Instituto de Ingeniería UNAM. México.

[2] EOTA (2016) Flexible kits for retaining debris flows and shallow landslides. EAD-340020-00-0106

[3] Generador de precios de la construcción. Perú. CYPE Ingenieros, S.A.

[4] Gómez. J.A. (2011) Criterios técnicos para el control de cárcavas, diseño de muros de retención y revegetación de paisajes. Junta de Andalucía. Sevilla.

[5] Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (2012). Presas de hormigón.

[6] Jamanca, E. (2020) Diseño y Estimación de presupuestos de soluciones tradicionales para Quebradas. Facultad de Ingeniería Civil. UNI Lima

[7] Luis, R., (2010) Aplicación de membranas flexibles para la prevención de riesgos naturales. Ropero Editores, S.L. Madrid.

[8] Luis, R., Prieto, J., Raïmat, C., y Sanz, A. (2011) Efecto negativo del empleo de redes ASM de anillos de alambre de acero en la estabilización de taludes. Ingeopres 184. Madrid

[9] Mendoza, M, (1992) Nociones de Geotecnia. Manual de Ingeniería de Ríos, Comisión Nacional del Agua, México

[10] Mitzuyama (1992), Prediction of debris flow peak discharge, Interpraevent, Bern, Bd. 4, 99-108

[11] Muraishi, H., Sano, S. (1997) Full scale rockfall testing of ring net barrier and component. Japón

[12] Reglamento Nacional de Construcciones NTE E.030 diseño.

[13] Rickenmann D. (1999), Empirical relationships for debris flows, Natural Hazards, 19(1), 47-77

[14] Rocha, A. (2011). Los embalses laterales y sus aspectos sedimentológicos, aplicación al reservorio de Palo Redondo. IV Congreso Internacional HIDRO. Obras de Saneamiento, Hidráulica, Hidrología y Medio Ambiente. Lima: Instituto de la Construcción y Gerencia (ICG).

[15] Roth, A., Wartmann, S. (2003) Protection system against Debris Flow. Designa concept. Suiza

[16] Secretaría de Obras Públicas (1974) Gaviones Metálicos. Departamento de Antioquía, Colombia.

[17] Wendeler, C. (2016) Debris-Flow Protection System for Mountain Torrents. WSL. Suiza

[18] Raïmat, C. (2017) Dinámica y peligrosidad de las corrientes de derrubios: Aplicaciones en el Barranco de Erill. Pirineo Catalán. UPC. Barcelona

www.geobrugg.com