

TABLA DE CONTENIDO

CAPITULO 9	214
PROTECCIÓN CONTRA LA EROSIÓN	214
9.1 INTRODUCCION	214
9.2 MECANISMOS DE EROSION Y TIPOS DE FALLA DEL ENROCADO (RIP-RAP).....	214
9.2.1 Erosión de las partículas.....	215
9.2.2 Falla por deslizamiento.....	215
9.2.3 Falla por depresiones modificadas (modified slump).....	216
9.2.4 Falla por depresiones (slump).....	217
9.3 CLASIFICACIÓN DE LOS REVESTIMIENTOS	217
9.4 REVESTIMIENTOS RÍGIDOS	218
9.5 REVESTIMIENTOS FLEXIBLES	219
9.6 ENROCADO (RIP-RAP)	219
9.7 GAVIONES	221
9.7.1 Usos y Aplicaciones.....	222
9.8 PROCEDIMIENTO DE DISEÑO	223
9.9 ESFUERZO DE CORTE PERMISIBLE	224
9.10 DETERMINACIÓN DE LA PROFUNDIDAD NORMAL DE FLUJO	225
9.11 COEFICIENTES DE MANNING PARA REVESTIMIENTOS DE ROCA	225
9.12 DETERMINACIÓN DEL ESFUERZO DE CORTE EN EL CANAL	225
9.13 ESTABILIDAD DE LAS PENDIENTES LATERALES.....	226
9.14 FACTORES DE DISEÑO DE REVESTIMIENTOS DE ENROCADO	226
a.) Gradación y espesor del enrocado	226
b.) Diseño del filtro.....	227
9.15 PROTECCIÓN DE LAS CURVAS.....	227
9.16 BORDE LIBRE	228
9.17 PROCESO DE DISEÑO PASO A PASO.....	228
9.18 MÁXIMA DESCARGA APROXIMADA	229
9.19 PROTECCIÓN DE CANALES CON PENDIENTE PRONUNCIADA	229
9.19.1 Diseño del enrocado.....	230
9.19.2 Diseño de gaviones.....	230
9.19.3 Espesor del revestimiento	231
9.19.4 Gradación.....	232
9.20 EJEMPLOS DE APLICACIÓN	232
EJEMPLO 1	232
EJEMPLO 2	232
EJEMPLO 3	234
EJEMPLO 4	236
EJEMPLO 5	236
EJEMPLO 6	239
EJEMPLO 7	239
9.21 EJERCICIOS PROPUESTOS	240
9.22 BIBLIOGRAFIA	242

CAPITULO 9

PROTECCIÓN CONTRA LA EROSIÓN

9.1 INTRODUCCION

Uno de los riesgos de construir una carretera cercana a un río o a uno de los bordes de un canal es la erosión del terreno provocada por el flujo de agua. Si se quiere prevenir efectos de erosión, se debe anticipar la construcción de obras de protección en las márgenes de los ríos; la cantidad y el tipo de protección dependerán del lugar adecuado.

El presente capítulo esta destinado a proveer un conjunto de procedimientos, o una guía de diseño en lo que se refiere a obras de protección en canales, incluyendo esta, diseño de revestimientos con Rip Rap, protección en las curvas, y entre otros construcción de gaviones.

La estabilización de un canal es esencial para el diseño de cualquier estructura en un río. La identificación de la erosión en las márgenes de un canal y la subsecuente necesidad de la estabilización del canal son llevadas a cabo de mejor forma a través de observaciones. Se disponen de métodos analíticos para la evaluación en la estabilidad de canales; sin embargo, estos deben ser utilizados solo para confirmar las observaciones realizadas, o en casos donde los datos de observación son escasos.

Las observaciones proveen las ideas mas claras del potencial de erosión. Las observaciones pueden basarse en información de carácter histórico o en las condiciones del sitio. Fotografías aéreas, mapas antiguos, notas de inspecciones, archivos de diseño de puentes, datos de medición de caudales en el río, encuestas a pobladores del lugar, pueden proveer información de los cambios y comportamiento de los canales a través del tiempo.

Además, las condiciones actuales del sitio pueden ser utilizadas para evaluar la estabilidad del río. Aún así, cuando la información histórica indica que el canal ha sido relativamente estable en el pasado, las condiciones locales pueden indicar inestabilidades mas recientes.

Las relaciones hidráulicas para la evaluación de la estabilidad de canales están basadas en el análisis de los materiales del sitio, y la capacidad de estos para resistir las fuerzas erosivas producidas por una descarga de diseño dada.

9.2 MECANISMOS DE EROSION Y TIPOS DE FALLA DEL ENROCADO (RIP-RAP)

Previo al diseño de un esquema de estabilización del canal, es importante tener conocimiento de los mecanismos comunes de erosión y los tipos de falla del enrocado, las causas o el manejo de las fuerzas por detrás de los procesos de erosión. Un reconocimiento inadecuado de los procesos potenciales de erosión en un sitio en particular pueden llevar a la falla del revestimiento.

En la actualidad se han identificado muchas de las causas de la erosión y fallas del enrocado. Algunas de las más comunes son: la abrasión, flujo de agua, acción de remolinos, aceleración de flujo, flujo permanente, congelamientos, acciones humanas en las márgenes, hielo, precipitación, oleaje, erosión al pie del canal, y flujos subterráneos. Sin embargo, es más probable una combinación de mecanismos que causan la erosión de las márgenes y las fallas del enrocado; el

mecanismo o causa particular es usualmente difícil de determinar. Las fallas del Rip-Rap (Enrocado) se pueden clasificar de mejor forma por el tipo de falla. Blodgett ha identificado los tipos de fallas típicas del enrocado, como ser:

Erosión de la partícula.

Falla por deslizamiento (Translational slide).

Depresiones modificadas (Modified Slump)

Depresiones (Slump)

9.2.1 Erosión de las partículas

Es el mecanismo de erosión más frecuente, ocasionado cuando la fuerza tractiva ejercida por el flujo de agua, excede la capacidad de resistencia del material de las márgenes. Además, si las piedras desplazadas no son transportadas desde el área erosionada, se acumularán pequeños montones de roca a lo largo del lecho del canal. Estos montículos de piedras causan la concentración de flujo a lo largo de las márgenes, resultando una erosión que se va extendiendo sobre estas márgenes del río.

La erosión de partículas puede iniciarse por abrasión, repercusiones del flujo de agua, remolinos, aceleración local de flujo, congelamientos, hielo, o erosión al pie del canal. Las probables causas de la erosión por partículas son:

- El tamaño de las piedras no es lo suficientemente grande
- Algunas piedras removidas por acción de la abrasión
- Pendientes de las márgenes tan pronunciadas que el ángulo de reposo del Rip-Rap es fácilmente excedido.
- Gradación muy uniforme del enrocado.

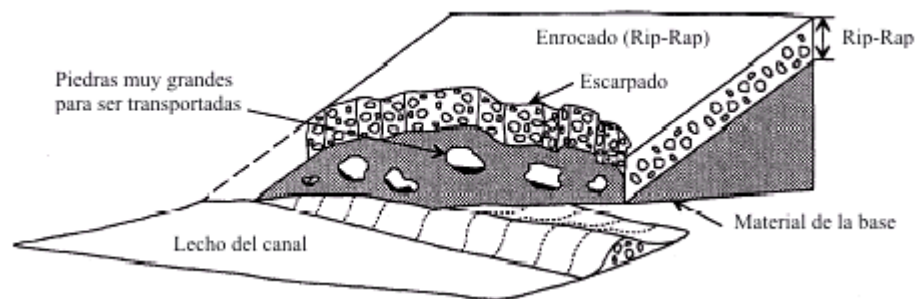


Figura 9.1 *Falla por erosión de partículas*

9.2.2 Falla por deslizamiento

Una falla por deslizamiento es una falla del enrocado causada por el movimiento de una masa de piedras respecto a un plano horizontal, separadas por una línea de falla. La fase inicial de la falla por deslizamiento comienza en roturas situadas en la parte superior de las márgenes del enrocado que se extienden paralelas al canal. Mientras el deslizamiento progresa, la parte inferior del enrocado se separa de la parte superior como un cuerpo homogéneo. Como resultado de esto,

aparecerá un bulto en la base de las márgenes si el lecho del canal no está socavado. El deslizamiento usualmente se inicia cuando el lecho del canal se socava y este material se acumula al pie de la capa de enrocado. Esto puede ser causado por la erosión de partículas del pie del material, o algún otro mecanismo el cuál causa desplazamiento al pie del material.

Cualquier otro mecanismo que podría ocasionar que la resistencia al corte a lo largo de la interfase entre la capa del enrocado y el material de la base, sea reducida a un valor menor que el de la fuerza gravitacional también puede ocasionar fallas por deslizamiento. Se ha sugerido que la presencia de una capa de filtro puede proporcionar un plano de falla potencial para la falla por deslizamiento. Las probables causas de estas fallas son las siguientes:

- Las pendientes de las márgenes son muy pronunciadas.
- Presión de poros excesiva
- Pérdidas del material de fundación al pie del enrocado causadas por la erosión.

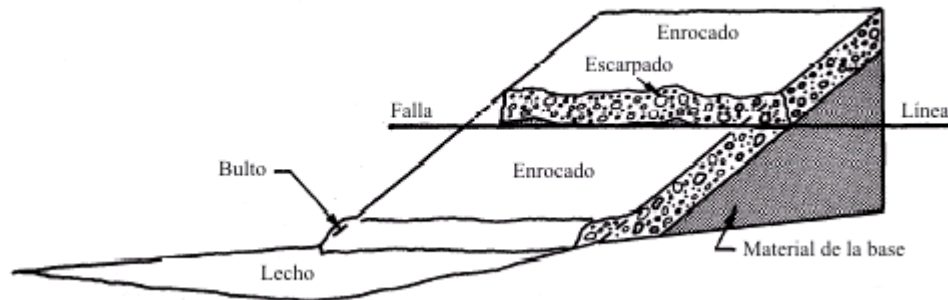


Figura 9.2 *Falla por deslizamiento*

9.2.3 Falla por depresiones modificadas (modified slump)

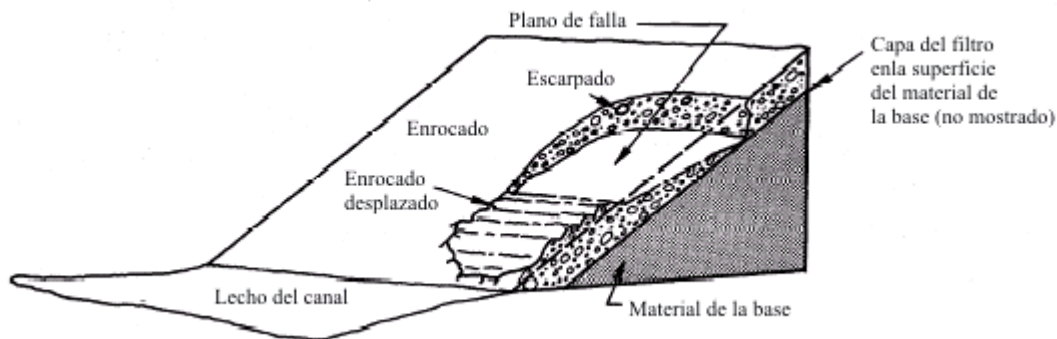


Figura 9.3 *Falla por depresiones modificadas (Modified slump)*

La falla del enrocado designada como “modificada”, es el movimiento de masas del material a lo largo de una superficie interna de deslizamiento dentro la capa del enrocado, el material subyacente que soporta al enrocado no falla. Este tipo de falla es similar en muchos aspectos a la

falla por deslizamiento, pero la geometría del enrocado dañado es similar en la forma a la fase inicial de la falla causada por erosión de partículas. Probables causas de este tipo de falla se citan a continuación:

- La pendiente de las márgenes es tan pronunciada que el enrocado esta reposando muy cerca al ángulo establecido de reposo, y cualquier desequilibrio o movimiento individual de piedras crea una situación de inestabilidad para las otras piedras en la capa del enrocado.
- El material crítico que soporta la pendiente superior del enrocado es removido por acción de asentamientos del enrocado sumergido, impactos, abrasión, erosión de partículas, o alguna otra fuerza.

9.2.4 Falla por depresiones (slump)

La falla por depresiones son movimientos rotacionales-gravitacionales del material a lo largo de la superficie de ruptura que tiene una curva cóncava ascendente. La causa de fallas por depresiones se relaciona con la falla de corte del material base subyacente que soporta el revestimiento de enrocado. La característica principal de este tipo de falla es el desplazamiento localizado del material de la base a lo largo de una superficie de deslizamiento, la cual usualmente es causada por exceso de presión de poros que reduce la fricción a lo largo de una línea de falla en el material de la base. Las causas probables para este tipo de falla son:

- Material de la base no homogéneo, con capas de material impermeable que actúan como una línea de falla cuando esta sujeto a presión excesiva de poros.
- Pendiente muy pronunciada del lado, y fuerzas gravitacionales que exceden las fuerzas de inercia del enrocado y el material de la base a lo largo de un plano de fricción.



Figura 9.4 Falla por depresiones (Slump)

9.3 CLASIFICACIÓN DE LOS REVESTIMIENTOS

Debido al gran número de materiales, actualmente disponibles, utilizados en la estabilización y protección de canales; sería útil clasificarlos en base a sus características y desempeño. Los revestimientos se clasifican como rígidos (por ejemplo el concreto) y flexibles (por ejemplo el enrocado). Además los revestimientos flexibles se dividen en temporales y permanentes. Los materiales de revestimiento pueden clasificarse en:

Revestimientos rígidos:

- Concreto vaciado en el lugar
- Concreto asfáltico puesto en el lugar
- Mampostería de piedra
- Suelo-cemento
- Combinación de mortero de cemento con piedra

Revestimientos flexibles:

- Permanentes
- Enrocado (Rip-Rap)
- Gaviones
- Revestimiento de vegetación
- Grava

Temporales

- Suelo desnudo
- Redes con paja
- Redes sintéticas
- Red de yute
- Manto de fibras de madera
- Fibra de vidrio

9.4 REVESTIMIENTOS RÍGIDOS

Los revestimientos rígidos son útiles en zonas dónde el flujo ejerce un esfuerzo de corte elevado, o en condiciones dónde no exista flujo uniforme tales como las transiciones o en dissipadores de energía. Este tipo de revestimiento es impermeable en áreas dónde existen pérdidas de agua o infiltraciones del canal.

A pesar de la naturaleza no erosionable de los revestimientos rígidos, han sido altamente susceptibles a fallar por inestabilidad estructural. Por ejemplo, los revestimientos de mampostería tienden a deteriorarse si la fundación es pobre. Una vez que los revestimientos rígidos se deterioran, tienden a ser destruidos por el flujo del canal.

La principal causa de inestabilidad estructural es la excesiva presión de poros, que pasa cuando los niveles de flujo en el canal descienden bruscamente. La inestabilidad de los lados del canal puede llevar a una presión elevada de poros y gradientes hidráulicos altos a lo largo de la superficie de los lados.

La construcción de revestimientos rígidos requiere equipos especializados y materiales costosos. Como consecuencia, el costo de canales revestidos rígidamente es alto. Los revestimientos prefabricados pueden ser alternativas más económicas si las distancias de transporte no son grandes.

9.5 REVESTIMIENTOS FLEXIBLES

El enrocado y la vegetación son revestimientos adecuados para condiciones hidráulicas similares a las requeridas en revestimientos rígidos. Debido a que los revestimientos flexibles son permeables, estos requieren de protección en el suelo subyacente para prevenir fallas. Por ejemplo, se utiliza una capa de filtro en el enrocado, para inhibir tubificaciones del suelo.



a.) Enrocado con grava



b.) Red de yute

Figura 9.5 Revestimientos flexibles

Los revestimientos vegetales y temporales son adecuados para condiciones hidráulicas donde exista flujo uniforme y esfuerzos de corte moderados. Los revestimientos temporales proporcionan protección contra la erosión hasta que se establezca la vegetación.

9.6 ENROCADO (RIP-RAP)

El Rip-Rap ha sido descrito como una capa o superficie de roca, lanzada o colocada manualmente para prevenir la erosión, socavación o desgaste de una estructura o terraplén. Otros materiales como la roca son también descritos como Rip-Rap; por ejemplo, roca fragmentada o escombros de edificios, pedazos de concreto, y formas prefabricadas de concreto. Estos materiales similares a la roca pueden ser lanzados o colocados manualmente en un terraplén para formar un revestimiento flexible.

En el contexto de este capítulo, el Rip-Rap será definido como: “Un canal flexible o un revestimiento de márgenes de un canal conformado por una mezcla bien gradada de roca, pedazos de concreto u otro material usualmente lanzado o colocado manualmente, lo cual proporciona protección de los efectos de la erosión”

Como se menciono antes, el Rip-Rap es un revestimiento flexible. La flexibilidad de la masa del enrocado se debe a partículas individuales que actúan independientemente de dicha masa.

Para propósitos descriptivos el enrocado se subdivide por el método de colocado en: lanzado, manual, y en placas.

El **enrocado lanzado** son piedras gradadas colocadas en un talud preparado de tal manera que no de lugar a la segregación. Este tipo de enrocado forma una capa de piedras sueltas; estas piedras pueden ajustarse a movimientos del material de la base.

El colocado de este enrocado debe ser realizado por maquinaria pesada, tales como grúas, palas mecánicas, volquetas etc. Las piedras lanzadas de las volquetas hacia los taludes causan segregación de la roca por su tamaño, reduciendo su estabilidad. La efectividad del enrocado lanzado ha sido bien establecida cuando este es propiamente instalado, de un tamaño adecuado y una gradación adecuada. Entre las ventajas de este tipo de enrocado podemos citar:

- La capa de Rip-Rap es flexible, no se debilita o se ve perjudicada por movimientos menores de las márgenes causadas por asentamientos u otros ajustes de menor importancia.
- Los daños locales o pérdidas pueden ser reparadas colocando más roca
- El proceso constructivo no es complicado
- Cuando el enrocado esta expuesto al agua fresca, la vegetación crecerá ofreciendo un aspecto de mejor estética además de restablecer la rugosidad natural.
- El enrocado es reciclable y puede ser apilado para usos en el futuro.

Una de las desventajas del uso del revestimiento de enrocado lanzado es que son más sensibles a factores económicos locales que otros esquemas de revestimiento. Por ejemplo, el costo de transporte puede afectar significativamente a la economía de este tipo de revestimiento.

El **enrocado colocado manualmente**, son piedras puestas cuidadosamente a mano o por grúas que siguen un patrón definido; los espacios entre las piedras grandes son rellenados con piedras pequeñas quedando un superficie relativamente uniforme. La necesidad de trabar piedras manualmente, requiere que la piedra sea relativamente uniforme en tamaño y forma (cuadrada o rectangular). Las desventajas asociadas con el uso de este revestimiento son entre otras:

- La superficie trabada presenta un aspecto liso y reduce la turbulencia de flujo en el agua.
- El apoyo provisto por la trabazón de las piedras permite el uso del rip-rap colocado manualmente en márgenes con taludes pronunciados.
- El espesor de la capa de rip-rap colocado manualmente, es usualmente menor 15 a 30 cm que un revestimiento de rip-rap suelto, resultando un uso de menor cantidad de piedras.

Las desventajas asociadas al rip-rap colocado manualmente pueden ser:

- La construcción requiere de mucha mano de obra, resultando muy costosa.

- La trabazón de rocas en el revestimiento de rip-rap colocado manualmente tiene menor flexibilidad; como se mencionó anteriormente, un pequeño movimiento en el material de la base de las márgenes puede causar fallas de grandes segmentos del revestimiento.
- Por su naturaleza, el revestimiento de rip-rap colocado manualmente es más caro de reparar que los revestimientos de roca suelta.

El **enrocado colocado en placas** es similar en apariencia y comportamiento al rip-rap colocado manualmente, pero diferente en el método de colocado. Este tipo de revestimiento es colocado en la margen con un salto y luego es comprimido en el lugar usando una placa de acero, formando de esta manera, una superficie regular bien organizada. La experiencia indica que durante la operación de compresión, las piedras grandes son fracturadas, produciendo rocas de menor tamaño para rellenar los espacios en la capa del revestimiento.

Las ventajas y desventajas asociadas con el uso del rip-rap colocado en placas son similares a aquellas citadas anteriormente para el revestimiento de roca colocada manualmente. Como con el rip-rap colocado manualmente, las placas de roca permiten el uso de taludes pronunciados en las márgenes, y la reducción del espesor de la capa del rip-rap (15 a 30 cm. menor que el espesor de un revestimiento de roca suelta). La experiencia también indica que las placas de rip-rap también permiten el uso de piedras de tamaño más pequeño en comparación al rip-rap de roca suelta. Este tipo de revestimiento, al igual que el rip-rap colocado manualmente, es más rígido y menos flexible que el revestimiento de roca suelta, esto lo hace susceptible a fallas como resultado de asentamientos pequeños en la base de las márgenes. Sin embargo, el colocado del rip-rap en placas no es una labor intensiva como la del rip-rap colocado manualmente.

9.7 GAVIONES

Como revestimiento, los gaviones tienen flexibilidad limitada. Su flexibilidad aumenta con el hundimiento de la superficie de las márgenes, sin embargo, si ocurre un hundimiento excesivo la roca dentro de los gaviones se moverá, causando fallas (roturas) en las mallas de alambre.

Las características técnicas principales de una estructura en gaviones son:

Los gaviones son estructuras armadas, capaces de resistir todos los tipos de esfuerzos y, fundamentalmente, de trabajar bajo tracción. Consecuentemente, se consideran los gaviones no solo como un envoltorio, colocados uno al lado del otro, sino como un conjunto homogéneo y monolítico con las dimensiones necesarias para recibir las más equilibradas condiciones de resistencia.

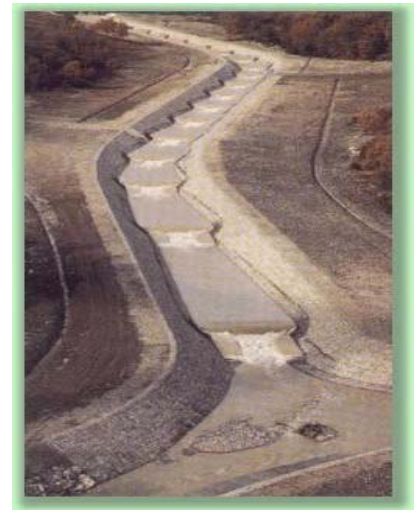
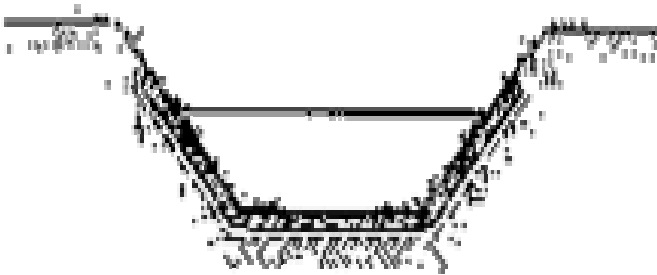
ESTRUCTURAS FLEXIBLES, Aptas para absorber esfuerzos imprevistos. Esta es una de las ventajas principales de los gaviones: las estructuras deformándose, no disminuyen su resistencia, porque se adaptan a los movimientos del terreno, descargando en él las fuerzas a que están sujetas.

ESTRUCTURAS DRENANTES, Capaces de drenar el agua de infiltración de los terrenos, eliminando uno de los principales factores de inestabilidad. Se obtiene así el beneficio de los terrenos, mejorando sus características físicas y mecánicas.

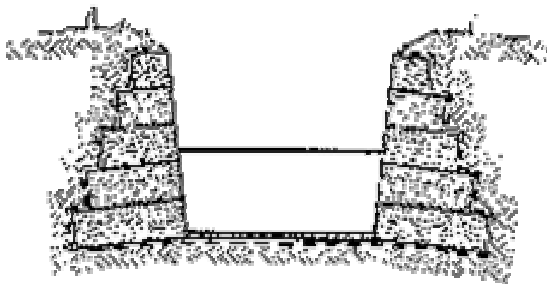
ESTRUCTURAS ECOLÓGICAS, No causan daños al medio ambiente. Su capacidad de drenaje contribuye para la estabilidad del suelo y favorece el crecimiento de vegetación típica de la región, manteniendo inclusive el equilibrio del ecosistema local.

9.7.1 Usos y Aplicaciones

Los gaviones y colchonetas encuentran un vasto empleo en los canales y en los cursos de aguas canalizados, sea para revestimiento tanto de las márgenes como del lecho. Tales obras pueden ser ejecutadas en seco o con la presencia del agua, pueden ser también estabilizadas e impermeabilizadas con resina o masilla de bitumen hidráulico o con argamasa de arena y cemento.



a) Canalización función de protección



b.) Canalización función sostenimiento

Figura 9.6 Aplicación de gaviones y colchones en canalizaciones

Los revestimientos en colchones y gaviones ofrecen una segura y confiable protección contra la erosión provocada por el oleaje y las corrientes fluviales. Permite sensibles reducciones del tamaño de las piedras y del espesor del revestimiento en comparación con otros métodos. Son principalmente usados como protección del paramento aguas arriba de presas, playas y orillas de canales y ríos navegables.

Constituyen la mejor solución técnica y económica para la corrección y sistematización de ríos y obras de toma. En la sistematización de cursos de agua pueden ser utilizados para control de erosión en protecciones longitudinales de márgenes como obras transversales tales como espigones y diques.

Las estructuras para defensa y conservación de márgenes contra la acción erosiva de las aguas se dividen en dos tipos:

Obras leves, en las cuales los colchones actúan como revestimiento (Figura 9.7 izquierda)

Obras macizas, en las cuales los gaviones actúan también como una obra de contención. (Figura 9.7 derecha)



Figura 9.7 *Uso de gaviones y colchones en la protección de márgenes*

9.8 PROCEDIMIENTO DE DISEÑO

Esta sección describe el procedimiento de diseño para revestimientos flexibles de canales. Cuando el enrocado es utilizado en pendientes pronunciadas, el procedimiento de diseño debe tomar en cuenta fuerzas adicionales actuando en el revestimiento. El diseño que involucra el enrocado debe ser verificado y comparado con los resultados obtenidos en el proceso de diseño de canales con pendiente pronunciada. Los resultados más conservadores, por ejemplo el mayor tamaño de enrocado, deben ser utilizados para el diseño. Otros tipos de revestimientos presentados en este capítulo son aplicables a la mayoría de pendientes, en donde el esfuerzo de corte permisible no se excede.

El procedimiento básico de diseño para revestimientos flexibles en canales es muy simple. Involucra tan solo dos cálculos y varias comparaciones del rendimiento del revestimiento. Los cálculos incluyen la determinación de la profundidad de flujo uniforme en el canal, conocida como la profundidad normal, y la determinación del esfuerzo de corte en la profundidad máxima de flujo. En este capítulo se provee de un nomograma para determinar la profundidad normal en canales trapezoidales.

La comparación básica requerida en el proceso de diseño, es la que se hace entre el esfuerzo de corte calculado con el esfuerzo de corte permisible. Los valores del esfuerzo de corte permisible para una variedad de revestimientos se encuentran en una tabla y dos gráficas proporcionadas en este capítulo. Si el esfuerzo de corte permisible es mayor al calculado, el revestimiento será

adecuado. Si el revestimiento no es adecuado, deberá tomarse en cuenta otro tipo de material que tenga un esfuerzo de corte mayor al anterior, y se repetirán los cálculos para la profundidad normal y el esfuerzo de corte.

Los canales revestidos con grava o enrocado en pendientes laterales mayores a 1:3 deben ser diseñados utilizando el procedimiento para canales con pendientes laterales pronunciadas. Este tipo de pendientes son permitidas en un canal si existen condiciones de suelo cohesivo.

9.9 ESFUERZO DE CORTE PERMISIBLE

El esfuerzo de corte permisible, τ_p , indica la fuerza requerida para iniciar el movimiento del material de revestimiento. Previo al movimiento del revestimiento, el suelo de fundación está relativamente protegido. Por tanto el esfuerzo de corte permisible no afectado significativamente por la erosión del suelo de fundación.

Categoría del revestimiento	Tipo de Revestimiento	Esfuerzo unitario de corte permisible	
		lb/pie ²	N/m ²
Temporales	Redes de yute	0.45	21.5
	Fibra de vidrio:		
	Simple	0.60	28.7
	Doble	0.85	40.7
	Redes con paja	1.45	69.4
	Capa de fibras de madera	1.55	74.2
	Capas sintéticas	2.00	95.8
Enrocado con grava	25 mm	0.33	15.8
	50 mm	0.67	31.6
Enrocado	150 mm	2.00	95.8
	300 mm	4.00	191.5
Suelo desnudo	No cohesivo	Vea Gráfica 1	
	Cohesivo	Vea Gráfica 2	

Tabla 9.1 Esfuerzos permisibles de corte para diferentes revestimientos

Los valores para el esfuerzo de corte permisible para revestimientos se basan en investigaciones de campo y ensayos de laboratorio. La tabla 9.1 muestra valores del esfuerzo de corte permisible para revestimientos manufacturados y enrocados. El esfuerzo de corte permisible para suelos no cohesivos está en función del diámetro medio del material del canal, como se muestra en la gráfica 1 del anexo 9-1. Para tamaños mayores de piedra y roca que no son mostrados en la gráfica 1, el esfuerzo de corte permisible está definido por la siguiente ecuación:

$$\tau_p = 628.3 \cdot D_{50} \quad (9-1)$$

Dónde:

D_{50} es el tamaño medio en metros del enrocado.

Para materiales cohesivos la variación en el esfuerzo de corte permisible está gobernada por muchas de las propiedades del suelo. El índice de plasticidad de suelos cohesivos proporciona

una buena guía para determinar el esfuerzo de corte permisible, como se muestra en la gráfica 2 del anexo 9-1.

9.10 DETERMINACIÓN DE LA PROFUNDIDAD NORMAL DE FLUJO

La condición de flujo uniforme en un canal con una descarga conocida esta definida por la ecuación de Manning. La solución gráfica de esta ecuación se encuentra en el nomograma de la gráfica 3 del anexo 9-1.

9.11 COEFICIENTES DE MANNING PARA REVESTIMIENTOS DE ROCA

La tabla 9.2 proporciona valores recomendados del coeficiente de rugosidad de Manning para materiales de revestimientos flexibles de canales. La rugosidad del canal será mayor para profundidades pequeñas de flujo, y mayor para tirantes elevados. El rango de profundidades comprendido entre 150 mm a 600 mm es típico para canales de drenaje en carreteras.

Categoría del revestimiento	Tipo de Revestimiento	Valores de n		
		Rangos de profundidad		
		0 – 150 mm	150 – 600 mm	> 600 mm
Rígidos	Concreto	0.015	0.013	0.013
	Enrocado combinado con cemento	0.040	0.030	0.028
	Mampostería de piedra	0.042	0.032	0.030
	Suelo-cemento	0.025	0.022	0.020
	Asfalto	0.018	0.016	0.016
No revestido	Suelo desnudo	0.023	0.020	0.020
	Corte en rocas	0.045	0.035	0.025
Temporales	Red de yute	0.028	0.022	0.019
	Fibra de vidrio	0.028	0.021	0.019
	Redes con paja	0.065	0.033	0.025
	Fibras de madera	0.066	0.035	0.028
	Sintéticos	0.036	0.025	0.021
Enrocado con grava	25 mm D ₅₀	0.044	0.033	0.030
	50 mm D ₅₀	0.066	0.041	0.034
Enrocado	150 mm D ₅₀	0.104	2.00	0.035
	300 mm D ₅₀	----	4.00	0.040

Tabla 9.2 Valores del coeficiente de Manning en canales revestidos de roca

9.12 DETERMINACIÓN DEL ESFUERZO DE CORTE EN EL CANAL

Como se mencionó anteriormente, según la teoría de la fuerza tractiva, el esfuerzo de corte en el revestimiento del canal con una profundidad máxima, τ_d , es calculada utilizando la siguiente ecuación:

$$\tau_d = \gamma \cdot d \cdot S \quad (9-2)$$

Dónde:

γ = peso unitario del agua (9810 N/m³)

d = profundidad de flujo en metros.

S = Pendiente del canal.

El flujo alrededor de una curva en un canal provoca esfuerzos de corte mayores en la parte inferior y en las márgenes del canal. Para curvaturas, el esfuerzo de corte máximo está definido por la siguiente ecuación:

$$\tau_b = K_b \cdot \tau_d \quad (9-3)$$

Dónde el valor de K_b puede ser hallado, utilizando la gráfica 4 del anexo 9-1. En la gráfica 4, el radio de curvatura del canal, R_c , y el ancho de la base, B , determinan la magnitud del factor K_b . La longitud de protección, L_p , requerida aguas debajo de una curvatura es calculada utilizando la gráfica 5 del anexo 9-1. La longitud de protección está en función de la rugosidad del material de revestimiento en la curvatura (n_b) y la profundidad de flujo.

9.13 ESTABILIDAD DE LAS PENDIENTES LATERALES

Los canales revestidos de grava o enrocado, que tienen pendientes laterales mayores a 1:3 pueden llegar a ser inestables. A medida que el ángulo de los lados del canal se aproxima al ángulo de reposo del material de revestimiento, este se vuelve menos estable. Sin embargo, el esfuerzo de corte en los lados del canal es menor que el esfuerzo de corte en el fondo. La estabilidad de las pendientes laterales del canal está en función a la inclinación que esta tenga y al ángulo de reposo del material de revestimiento.

El ángulo de reposo, θ , para formas y tamaños diferentes de roca puede ser hallado en la gráfica 6 del anexo 9-1. La relación del esfuerzo de corte en los lados y el fondo del canal, K_1 , puede ser encontrada utilizando la gráfica 7 del anexo 9-1, de la misma manera en la gráfica 8 se puede hallar el índice de fuerza tractiva, K_2 . El tamaño adecuado de roca (diámetro medio de gradación, D_{50}) para las pendientes laterales es calculado utilizando la siguiente ecuación:

$$(D_{50})_{lados} = \frac{K_1}{K_2} \cdot (D_{50})_{fondo} \quad (9-4)$$

9.14 FACTORES DE DISEÑO DE REVESTIMIENTOS DE ENROCADO

Para el diseño de enrocado es necesario tomar en cuenta dos consideraciones adicionales:

La gradación y espesor de la capa del enrocado.

Uso del material del filtro colocado bajo el enrocado.

a.) Gradación y espesor del enrocado

La gradación del enrocado sigue el patrón de una curva de distribución. La mayoría de las gradaciones del enrocado caerán en el rango de D_{100}/D_{50} y D_{50}/D_{20} entre 0.0 a 1.5 lo cual es aceptable. El criterio más importante es la distribución apropiada de los tamaños en la gradación de manera que los intersticios formados por piedras de gran tamaño sean rellenados con piedras

de menor tamaño a manera de trabazón, previniendo así, la formación de espacios abiertos. En general, el enrocado construido con piedras angulares tiene mejor desempeño. Las piedras redondeadas son aceptables como parte del enrocado si estas no son colocadas en las pendientes laterales mayores a 1:3. El espesor del revestimiento de enrocado debe ser igual al diámetro de la roca más grande en la gradación. Para la mayoría de las gradaciones, el espesor llegaría a ser 1.5 a 3 veces el diámetro medio del enrocado.

b.) Diseño del filtro

Tradicionalmente, una capa de filtro comprendida de material granular bien gradado es colocada entre la base del suelo y el revestimiento de enrocado o gaviones. El objetivo es de asegurar una permeabilidad suficiente para permitir que las filtraciones tomen lugar fuera del suelo de fundación al mismo tiempo que se minimizan los espacios en el filtro para prevenir que el material del lecho se desplace a otro lugar.

En la práctica actual de ingeniería, la capa de filtro granular es comúnmente reemplazada por un filtro geotextil, el cuál desempeña esencialmente las mismas funciones. Los requerimientos específicos para cada tipo de área del filtro son:

Filtro granular

$$\frac{D_{15}(\text{filtro})}{D_{85}(\text{suelo})} < 5 < \frac{D_{15}(\text{filtro})}{D_{15}(\text{suelo})} < 40 \quad (9-5)$$

$$\frac{D_{50}(\text{filtro})}{D_{50}(\text{suelo})} < 40 \quad (\text{U.S. Army Corps. Of Engineers, 1955}) \quad (9-6)$$

9.15 PROTECCIÓN DE LAS CURVAS

El flujo a través de una curvatura en un canal abierto, induce a fuerzas centrífugas debido al cambio de su dirección. Esto lleva a una sobre elevación de la superficie de agua. El tirante es más elevado en la parte externa de la curvatura que en la interna. Esta sobre elevación esta definida como:

$$\Delta d = \frac{v^2 \cdot T}{g \cdot R_c} \quad (9-7)$$

Dónde:

v: Velocidad media en el canal.

T: Ancho del espejo de agua.

Rc: Radio de curvatura.

El flujo a través de una curvatura impone esfuerzos de corte mayores en la parte mas baja del canal y en las márgenes. La naturaleza del esfuerzo de corte inducida por una curva será discutida

con mayor detalle en la sección de fuerza tractiva. El incremento de esfuerzo requiere condiciones adicionales de diseño dentro y aguas debajo de la curvatura.

9.16 BORDE LIBRE

El borde libre de un canal es la distancia vertical desde la superficie del agua a la parte superior del canal en la condición de diseño. Un borde libre mínimo debe ser suficiente para prevenir oleaje o fluctuaciones en la superficie del agua en los lados del canal. En canales situados al lado de caminos el borde libre será de 0.15 m., y para canales temporales, el borde libre en menor.

Los canales con pendiente pronunciada deben tener una altura del borde libre igual a la profundidad de flujo. Esto permite las grandes variaciones de flujo que ocurren en los canales con pendiente pronunciada, causadas por olas, impactos u obstrucciones. El revestimiento debe de extenderse hasta la parte superior del borde libre.

9.17 PROCESO DE DISEÑO PASO A PASO

1. Seleccione un revestimiento flexible y determine el esfuerzo de corte permisible, τ_p (ver tabla 9.1).
2. Estime la profundidad de flujo para el revestimiento, la forma del canal, pendiente y descarga de diseño.
3. Determine el valor del coeficiente de Manning para la profundidad de flujo estimada, utilizando la tabla 9.2.
4. Calcule la profundidad de flujo, d , en el canal. (gráfica 3 para canales trapezoidales)
5. Compare la profundidad de flujo calculada, d , con la estimada, d_i . Si d esta fuera del rango para revestimientos flexibles, repita desde el paso 2 hasta el paso 4.
6. Calcule el esfuerzo de corte, τ_d . Si $\tau_d > \tau_p$, el revestimiento no es aceptable, repita desde el paso 1 hasta el paso 5.
7. Para las curvas en los canales:

$\tau_b = K_b \cdot \tau_d$, Si $\tau_b > \tau_p$, el revestimiento no es adecuado, repita desde el paso 1 hasta el paso 7.

8. Calcule la sobre elevación. $\Delta d = \frac{v^2 \cdot T}{g \cdot R_c}$

9. Calcule la longitud de protección, L_p , aguas abajo de la curvatura. (gráfica 5 del anexo 9-1)

10. Para el enrocado o revestimientos de grava en pendientes laterales pronunciadas (mayores a 1:3):

Determine el ángulo de reposo para el tamaño y forma de la roca, utilice la gráfica 6 del anexo 8-1.

Determine K_1 de la gráfica 7 del anexo 9-1.

Determine K_2 de la gráfica 8 del anexo 9-1.

Calcule el D_{50} requerido para las pendientes laterales. $(D_{50})_{lados} = \frac{K_1}{K_2} \cdot (D_{50})_{fondo}$

Para el enrocado en pendientes mayores al 10% el procedimiento de diseño es el mostrado en el acápite 9.8. Utilice cualquiera que produzca el mayor tamaño de enrocado.

9.18 MÁXIMA DESCARGA APROXIMADA

En muchos casos, el ingeniero a cargo del diseño necesitará conocer simplemente la máxima descarga que el canal pueda conducir, teniendo como datos el esfuerzo de corte permisible y la profundidad de flujo correspondiente. Conociendo la máxima descarga que un revestimiento puede soportar, el diseñador puede determinar la máxima longitud de revestimiento para un canal, basado en la hidrología del lugar. Esta información puede ser de importancia en la evaluación económica de los diferentes tipos de revestimiento además de que se puede determinar el espacio para una toma. El proceso para hallar la máxima descarga esta descrito a continuación:

1. Determine la profundidad de flujo permisible en el canal, utilizando el esfuerzo de corte permisible (tabla 9.1, gráfica 1 ó gráfica 2 del anexo 9-1). Verifique que esta profundidad no exceda la profundidad (incluyendo el borde libre) proporcionada en la sección típica.

$$d = \frac{\tau_p}{\gamma \cdot S} \quad (9-8)$$

2. Determine el área y radio hidráulico correspondiente a la profundidad de flujo.
3. Encuentre el coeficiente de Manning de la tabla 9.2.
4. Resuelva la ecuación de Manning para determinar la máxima descarga en el canal.

9.19 PROTECCIÓN DE CANALES CON PENDIENTE PRONUNCIADA

Los canales con pendiente pronunciada, definidos como aquellos canales cuya pendiente es superior al 10%, son requeridos a veces para conducir el agua desde una cierta elevación a otra de un nivel significativamente baja. En el caso de condiciones bajas de flujo, un revestimiento temporal será suficiente para controlar cualquier mecanismo de erosión en el suelo, hasta que la vegetación se establezca. Sin embargo, en situaciones moderadas de flujo, habrá la necesidad de una medida de control permanente de la erosión tal como el revestimiento de roca.

Los revestimientos flexibles permanentes (por ejemplo el revestimiento de roca) pueden ser capaces de solucionar la mayoría de los problemas en dónde la vegetación no es suficiente; raramente serán requeridos revestimientos rígidos o tuberías de drenaje.

Los materiales comúnmente utilizados para un revestimiento flexible permanente, a lo largo de pendientes pronunciadas, son el enrocado y los gaviones. Generalmente, los bloques de concreto prefabricados tienden a ser más costosos que un revestimiento de rocas.

Con un revestimiento flexible como el de enrocado, gaviones o bloques de concreto, se deben tomar en cuenta factores adicionales cuando se compara la fuerza tractiva del diseño con la resistencia del revestimiento. En el diseño de canales con pendiente pronunciada, no se define un solo valor de esfuerzo de corte permisible para los tres tipos de revestimiento.

Los factores físicos a ser considerados son el tamaño y la forma del material que conforman el lecho, la pendiente de los lados y la geometría del canal. Sin embargo, con el enrocado y los gaviones, se han llevado a cabo varios ensayos hidráulicos y evaluaciones en la gradación del material normalmente utilizada en el proceso de diseño. Una comparación del espesor relativo de la capa del enrocado con el colchón formado por gaviones, fue una vez investigada para indicar que el espesor más pequeño (2 a 3 veces) del colchón conformado por gaviones puede ser utilizado bajo condiciones hidráulicas idénticas.

9.19.1 Diseño del enrocado

Investigaciones en el uso del enrocado en pendientes pronunciadas han llevado a ecuaciones complejas, las cuales no tienen valor práctico en el diseño. Para simplificar el diseño, se han elaborado gráficas (ver anexos) basadas en extensos ensayos hidráulicos. Estas gráficas pueden ser utilizadas para pendientes del lecho que varían entre 10 y 25% y un ancho de la base que incrementa cada 0.5m, desde 0 hasta 1.5 m. Para valores intermedios comprendidos entre esos límites puede utilizarse la interpolación lineal. Este proceso de diseño es ilustrado en los ejemplos del presente capítulo.

Para prevenir la falla del enrocado producida por el fenómeno de tubificación, es necesario diseñar una capa de filtro conformado por material granular o geosintético de un peso apropiado.

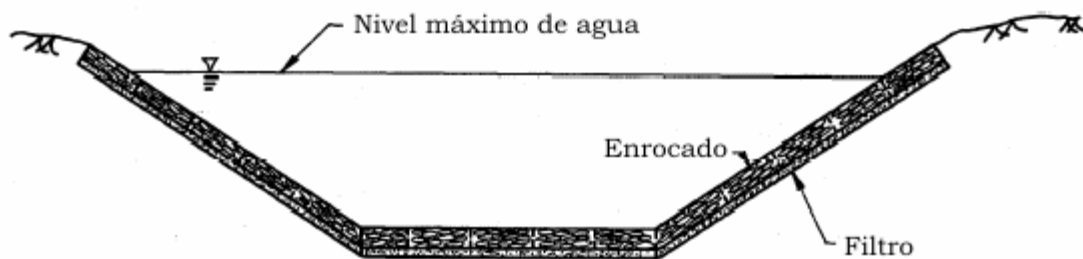


Figura 9.8 Componentes de un revestimiento con enrocado

9.19.2 Diseño de gaviones

Los gaviones son rocas colocadas dentro de mallas de alambre, formando cuerpos macizos de geometría uniforme. Las estructuras conformadas por gaviones pueden soportar descargas mayores que un canal revestido por enrocado.

Los gaviones son comúnmente utilizados como estructuras de caída para el control de flujo y la disipación de energía. Un cambio en la pendiente de pronunciada a suave, colocando estructuras de caída en intervalos a lo largo del tramo del canal, modifica una pendiente constantemente pronunciada en series de pendientes suaves y caídas verticales. Con estas estructuras se evita que las velocidades alcancen valores erosivos.

Un modo de falla probable es el deslizamiento de las rocas dentro la estructura del gavión. Otro tipo de falla es la socavación bajo y detrás de los gaviones. Se deben tomar en cuenta ambos tipos de falla en el diseño para asegurar una estructura funcional. Para este objetivo, se han preparado

gráficas (ver anexos) como guía en la selección del tamaño de la roca y una evaluación del espesor de la estructura.

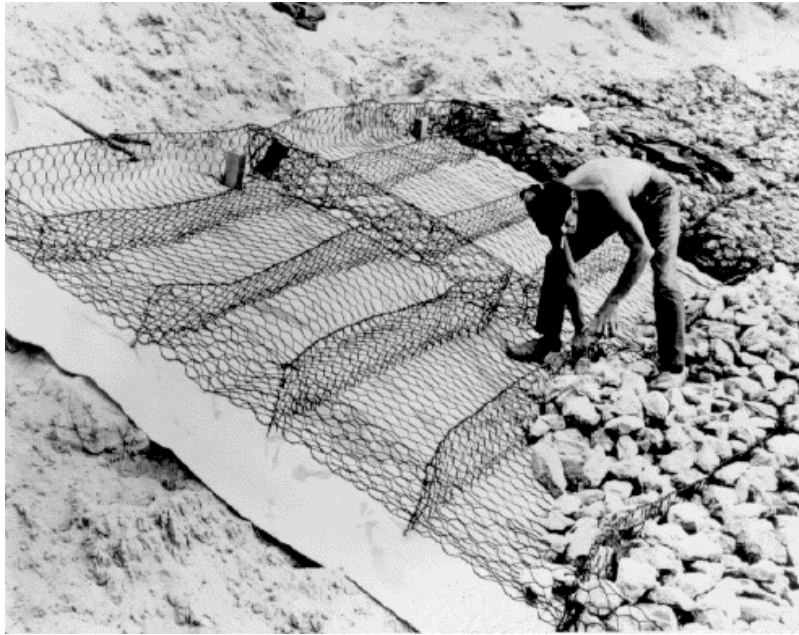


Figura 9.9 Puesta en obra del revestimiento con gaviones (Cortesía de Gaviones Maccaferri)

La hidráulica en estructuras de gaviones ha sido investigada por Chen & Cotton en 1988. Para complementar el diseño, las gráficas mostradas en el anexo 9-2 han sido elaboradas en función a la descarga, profundidad de flujo y la pendiente del lecho. Los anchos del lecho considerados van de 0 a 1.5 m. y las pendientes del lecho varían entre 10 y 25% con inclinaciones de los lados fijadas en 3:1.

Los gaviones utilizados como revestimiento para canales requieren de un filtro de material granular adecuadamente gradado o un geosintético de peso apropiado, para prevenir fallas por tubificación en el material de fundación.

El diseño del filtro es exactamente igual al de un canal con pendiente moderada, la única diferencia radica en una condición adicional: Espesor del filtro $\geq 1 \times D_{100}$ (filtro) o 150 mm. de espesor mínimo, elegir el mayor.

9.19.3 Espesor del revestimiento

El espesor mínimo de estructuras de gavión o enrocado debe ser del tamaño de la piedra más grande a ser utilizada. Para la mayoría de las rocas utilizadas en revestimientos de canales, el criterio se traducirá en lo siguiente:

$$\text{Espesor del revestimiento} = (2 \text{ a } 3) \times D_{50} \quad (9-9)$$

9.19.4 Gradación

Las piedras que conforman el enrocado o gavión deben ser adecuadamente gradadas, reuniendo los siguientes requerimientos:

$$3 > D_{100}/D_{50} > 1.5 \quad (9-10)$$

$$3 > D_{50}/D_{20} > 1.5 \quad (9-11)$$

Este criterio permitirá formar una estructura o capa compacta bien gradada. Un requerimiento específico para estructuras de gavión consiste en que la roca más grande no debe ser menor que 2/3 del espesor del gavión, ni la piedra más pequeña ser menor que las aberturas de la malla de alambre.

9.20 EJEMPLOS DE APLICACIÓN

EJEMPLO 1

Verificar si es factible, desde el punto de vista hidráulico, utilizar una red con paja como un revestimiento temporal para un canal de sección trapezoidal con un ancho de fondo de 1.22 m, con taludes laterales de 1V:3H, una pendiente de 0.005 m/m y que conduce un caudal de 0.566 m³/s. Determinar la profundidad de flujo en el canal.

Solución:

De la tabla 9.1, el esfuerzo de corte permisible es 21.5 N/m². Utilizando la tabla 9.2, el coeficiente de Manning es 0.022 (asumiendo una profundidad de flujo entre 0.15 a 0.60 m.)

Ingresando en la gráfica 3 del anexo 8-1, para S = 0.005:

$$Q_n = 0.012$$

$$B = 1.22$$

$$d/B = 0.22$$

$$d = 0.268 \text{ m.}$$

La profundidad de flujo esta comprendida en el rango de 0.15 a 0.60 m. por lo tanto el valor asumido de Manning es correcto.

Utilizando la ecuación 8-2, el esfuerzo de corte en el lecho del canal a una profundidad máxima es:

$$\tau_d = \gamma \cdot d \cdot S = 9810 \cdot 0.268 \cdot 0.005 = 13.1 \text{ N/m}^2$$

Comparando el esfuerzo de corte calculado, 13.1 N/m², con el esfuerzo permisible de corte permisible, 21.5 N/m² se observa que la red de yute es un revestimiento aceptable del canal.

EJEMPLO 2

Determine un revestimiento adecuado para el siguiente canal de sección trapezoidal:

$$\begin{aligned}Q &= 0.45 \text{ m}^3/\text{s} \\S &= 0.03 \text{ m/m} \\B &= 1.22 \\Z &= 3\end{aligned}$$

Solución:

Prueba N°1

Seleccionamos de la red de yute como revestimiento inicial del canal. El esfuerzo permisible de corte (tabla 8.1) y el valor de Manning (tabla 8.2) son:

$$\begin{aligned}\tau_p &= 21.5 \text{ N/m}^2 \\n &= 0.022 \text{ (asumiendo una profundidad en un rango de 0.15 a 0.60 m)}.\end{aligned}$$

Utilizando la gráfica 3 del anexo 9-1 determinamos la profundidad de flujo. Dados $S = 0.03$, $Qn=0.010$, y $B = 1.22 \text{ m}$ entonces:

$$\begin{aligned}d/B &= 0.12 \\d &= 0.146 \text{ m}.\end{aligned}$$

Luego el esfuerzo de corte a una profundidad máxima (utilizando la ecuación 9-2) es:

$$\tau_d = 9810 \times 0.146 \times 0.03 = 43.0 \text{ N/m}^2$$

El esfuerzo de corte calculado de 43.0 N/m^2 es mayor que el esfuerzo de corte permisible, 21.5 N/m^2 ; por lo tanto la red de yute no es un revestimiento adecuado.

Prueba N° 2

El siguiente revestimiento elegido es de capas de fibras de madera, porque el esfuerzo de corte permisible de este revestimiento excede al esfuerzo de corte calculado en la Prueba N° 1. El esfuerzo de corte permisible de la tabla 9.1 y el valor del coeficiente de Manning de la tabla 9.2 para fibras de madera, son correspondientemente:

$$\begin{aligned}\tau_p &= 74.2 \text{ N/m}^2 \\n &= 0.035 \text{ (asumiendo una profundidad en un rango de 0.15 a 0.60 m)}.\end{aligned}$$

Utilizando la gráfica 3 del anexo 9-1 determinamos la profundidad de flujo. Dados $S = 0.03$, $Qn=0.0158$, $B = 1.22 \text{ m}$ y $Z = 3$ entonces:

$$\begin{aligned}d/B &= 0.15 \\d &= 0.183 \text{ m}.\end{aligned}$$

El tirante se encuentra dentro del rango establecido anteriormente, por lo tanto el valor del coeficiente de Manning es correcto.

Luego el esfuerzo de corte a una profundidad máxima (utilizando la ecuación 9-2) es:

$$\tau_d = 9810 \times 0.183 \times 0.03 = 53.8 \text{ N/m}^2$$

El esfuerzo de corte calculado de 53.80 N/m^2 es menor que el esfuerzo de corte permisible, 74.2 N/m^2 ; por lo tanto la capa con fibras de madera es un revestimiento adecuado.

EJEMPLO 3

Encuentre un revestimiento adecuado para un canal de sección trapezoidal (utilizar datos del ejemplo 3) situado al lado de una carretera si el canal tiene una curva en su en su recorrido.

Dados:

Una curvatura del canal de 45°

$R_c = 6.1 \text{ m}$.

Encuentre:

El revestimiento del canal requerido para la curva y la ubicación del mismo en el canal.
La sobre elevación de la superficie del agua en la curva.

Solución:

Prueba N° 1

De los resultados del ejemplo 2, el esfuerzo de corte del tramo recto aguas arriba de la curva es,

$$\tau_d = 53.8 \text{ N/m}^2$$

Un revestimiento de fibras de madera fue utilizado para estabilizar el canal.

El esfuerzo de corte en la curva esta definido por la ecuación 8-3. El valor de K_b en la ecuación 8-3 puede ser hallado utilizando la gráfica 4 del anexo 8-1, dados $R_c/B = 5$,

$$K_b = 1.6$$

El esfuerzo de corte en la curva es,

$$\tau_b = 1.6 \times 53.8 = 86.1 \text{ N/m}^2$$

El esfuerzo de corte calculado en la curva es mayor al esfuerzo de corte permisible para el revestimiento de fibras de madera (74.2 N/m^2). Por lo tanto es necesario utilizar otro revestimiento para la curva del canal.

Prueba N° 2

Seleccionamos la capa sintética como nuevo material de revestimiento para la curva, porque su esfuerzo permisible de corte, 95.8 N/m^2 (ver tabla 9.1), es mayor al esfuerzo de corte calculado en la prueba N° 1. El coeficiente de Manning es 0.025 para una profundidad de flujo comprendida en el rango de 0.15 a 0.60 m.

Ingresando en la gráfica 3 del anexo 9-1, dados $S = 0.03$, $Q_n = 0.011$ y $B = 1.22 \text{ m}$, entonces:

$$d/B = 0.13$$

$$d = 0.159 \text{ m.}$$

El tirante se encuentra dentro del rango establecido anteriormente, por lo tanto el valor del coeficiente de Manning es correcto.

El esfuerzo de corte es:

$$\tau_d = 9810 \times 0.159 \times 0.03 = 46.8 \text{ N/m}^2$$

Luego, el esfuerzo de corte en la curva del canal, definido por la ecuación 9-3, es:

$$\tau_b = 1.6 \times 46.8 = 74.9 \text{ N/m}^2$$

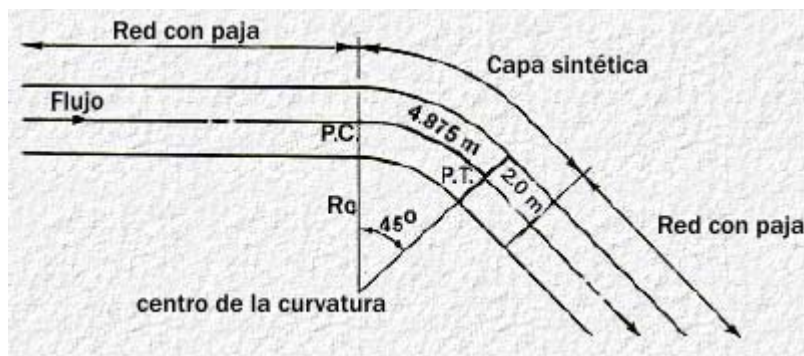
El esfuerzo de corte en la curva del canal es menor que el esfuerzo de corte permisible para una capa sintética de 95.8 N/m^2 . Por lo tanto, la capa sintética es un revestimiento adecuado para la curva del canal.

La capa sintética debe extenderse a través de la curva y una cierta distancia aguas abajo. Esta distancia puede ser encontrada utilizando la gráfica 5 del anexo 9-1, dados $n_b = 0.025$, $R = 0.12 \text{ m}$ (de la gráfica 9 del anexo 9-1, para $d/B = 0.13$ y $Z = 3$).

$$L_p/R = 16.97$$

$$L_p = 2.0 \text{ m}$$

La longitud total de revestimiento de capa sintética resulta de la suma de la longitud en la curva más la longitud requerida para la protección aguas abajo. La siguiente figura muestra la ubicación requerida para el revestimiento.



La sobre elevación de la superficie del agua es calculada mediante la ecuación 9-7. Para utilizar esta ecuación, previamente debemos calcular el ancho del espejo de agua y el área transversal:

$$T = B + 2Zd = 1.22 + 2 \times 3 \times 0.158 = 2.16 \text{ m.}$$

$$A = Bd + Zd^2 = 1.22 \times 0.158 + 3 \times 0.158^2 = 0.268 \text{ m}^2$$

La velocidad en el canal es calculada mediante la ecuación de continuidad:

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{0.45}{0.268} = 1.68 \text{ m/s.}$$

Resolviendo la ecuación 9-7, dados $V = 1.68 \text{ m/s}$, $T = 2.16 \text{ m}$, y $R_c = 6.1 \text{ m}$:

$$\Delta d = \frac{v^2 \cdot T}{g \cdot R_c} = \frac{1.68^2 \times 2.16}{9.81 \times 6.1} = 0.10 \text{ m.}$$

El Borde libre en la curva del canal debe ser al menos 0.10 metros para acomodarse a la sobre elevación de la superficie del agua.

EJEMPLO 4

Debido a la reducción del ancho en un drenaje carretero, las pendientes laterales de dicho canal deben alcanzar un valor de 1V:2H. Un revestimiento de grava de 51 mm. ha sido dispuesto para proteger el lecho canal. Determine el tamaño medio de grava, necesario para proteger las márgenes del canal.

Datos:

Grava muy redondeada

Canal de sección trapezoidal

$Z = 2$

$B = 1.07 \text{ m}$.

Profundidad de flujo, $d = 0.213 \text{ m}$.

Solución:

Dado un $D_{50} = 0.051 \text{ m}$, utilizando la gráfica 6 del anexo 8-1, el ángulo de reposo será $\theta = 36^\circ$.

Calculando la relación $B/d = 5.0$ e ingresando a la gráfica 7 del anexo 8-1, determinamos el factor $K_1 = 0.79$.

Ingresando en la gráfica 8 del anexo 8-1, dados $Z = 2$ y $\theta = 36^\circ$, el factor de fuerza tractiva es $K_2 = 0.65$.

Con la ayuda de la ecuación 8-4, calculamos el tamaño medio de las rocas necesario para los lados del canal:

$$(D_{50})_{\text{lados}} = \frac{K_1}{K_2} \cdot (D_{50})_{\text{fondo}} = \frac{0.79}{0.65} \cdot (0.051) = 0.062 \text{ m.}$$

EJEMPLO 5

Determine la gradación correcta para una capa de filtro.

Datos:

Gradación del enrocado:

$$D_{85} = 0.40 \text{ m.}$$

$$D_{50} = 0.20 \text{ m.}$$

$$D_{15} = 0.10 \text{ m.}$$

Gradación del suelo (lecho):

$$D_{85} = 1.5 \text{ mm} = 0.0049 \text{ pies.}$$

$$D_{50} = 0.5 \text{ mm} = 0.0016 \text{ pies.}$$

$$D_{15} = 0.167 \text{ mm.} = 0.00055 \text{ pies.}$$

Solución:

$$\frac{D_{15}}{D_{85}} = \frac{0.10}{0.0015} = 67 > 5, \text{ No cumple.}$$

$$\frac{D_{15}}{D_{15}} = \frac{0.10}{0.0017} = 60 > 40, \text{ no cumple.}$$

$$\frac{D_{50}}{D_{50}} = \frac{0.2}{0.005} = 40, \text{ No es menor a 40.}$$

Debido a que la relación entre el enrocado y el suelo no reúnen los criterios dimensionales recomendados, será necesario colocar una capa de filtro. Primero, determine las dimensiones requeridas del filtro con respecto al material que conforma el lecho.

$$\frac{D_{50}(\text{filtro})}{D_{50}(\text{suelo})} < 40, \text{ entonces } D_{50} \text{ filtro} < 40 \times 0.5 \text{ mm.} = 20 \text{ mm.}$$

$$\frac{D_{15}(\text{filtro})}{D_{15}(\text{lecho})} < 40, \text{ entonces } D_{15} \text{ filtro} < 40 \times 0.167 \text{ mm} = 6.7 \text{ mm.}$$

$$\frac{D_{15}(\text{filtro})}{D_{85}(\text{lecho})} < 5, \text{ entonces } D_{15} \text{ filtro} > 5 \times 1.5 \text{ mm.} = 7.3 \text{ mm.}$$

$$\frac{D_{15}(\text{filtro})}{D_{15}(\text{lecho})} > 5, \text{ entonces } D_{15} \text{ filtro} > 5 \times 0.167 \text{ mm.} = 0.84 \text{ mm.}$$

Por lo tanto, con respecto al material del lecho, el filtro debe satisfacer:

$$D_{50}(\text{filtro}) < 20 \text{ mm.}$$

$$0.84 \text{ mm.} < D_{15}(\text{filtro}) < 6.7 \text{ mm.}$$

Como segundo paso, determine las dimensiones requeridas del filtro con respecto al enrocado:

$$\frac{D_{50}(\text{riprap})}{D_{50}(\text{filtro})} < 40, \text{ entonces, } D_{50}(\text{filtro}) > \frac{0.20}{40} = 5.0 \text{ mm.}$$

$$\frac{D_{15}(\text{riprap})}{D_{15}(\text{filtro})} < 40, \text{ entonces, } D_{15}(\text{filtro}) > \frac{0.10}{40} = 2.5 \text{ mm.}$$

$$\frac{D_{15}(\text{riprap})}{D_{85}(\text{filtro})} < 5, \text{ entonces, } D_{85}(\text{filtro}) > \frac{0.10}{5} = 20 \text{ mm.}$$

$$\frac{D_{15}(\text{riprap})}{D_{15}(\text{filtro})} > 5, \text{ entonces, } D_{15}(\text{filtro}) > \frac{0.10}{5} = 20 \text{ mm.}$$

Con respecto al enrocado:

$$D_{50}(\text{filtro}) > 5.0 \text{ mm.}$$

$$2.5 \text{ mm.} < D_{15}(\text{filtro}) < 20.0 \text{ mm.}$$

$$D_{85}(\text{filtro}) > 20.0 \text{ mm.}$$

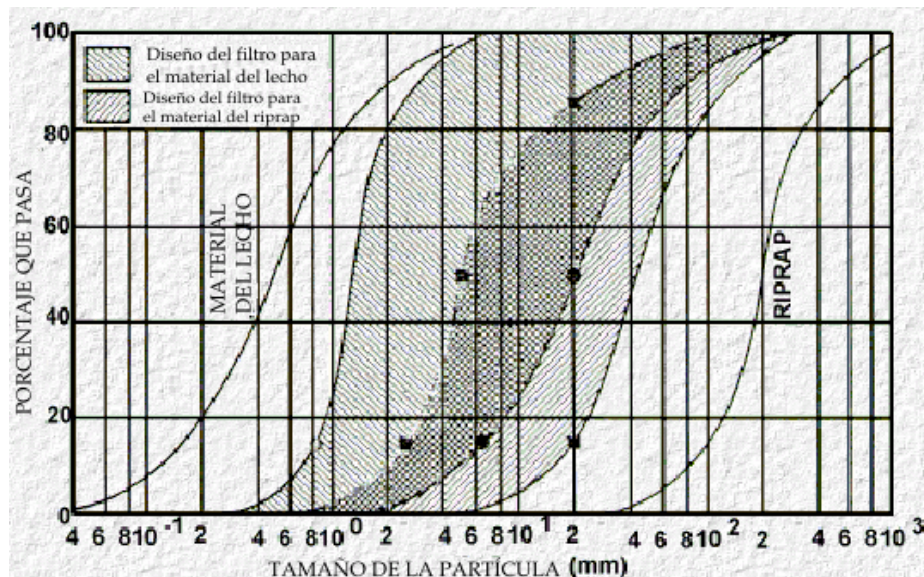
Combinando:

$$2.5 \text{ mm.} < D_{15}(\text{filtro}) < 6.7 \text{ mm.}$$

$$5.0 \text{ mm.} < D_{50}(\text{filtro}) < 20.0 \text{ mm.}$$

$$D_{85}(\text{filtro}) > 20.0 \text{ mm.}$$

Los requerimientos de gradación para las especificaciones de la capa de filtro granular son graficados en la siguiente figura:



EJEMPLO 6

Estime el diámetro medio del enrocado que sea adecuado para conducir una descarga de $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ en un canal de sección trapezoidal, cuya pendiente es del 15 %. El ancho de la base es de 1 m. y los taludes laterales son de 1:3. Encuentre la profundidad de flujo.

Solución:

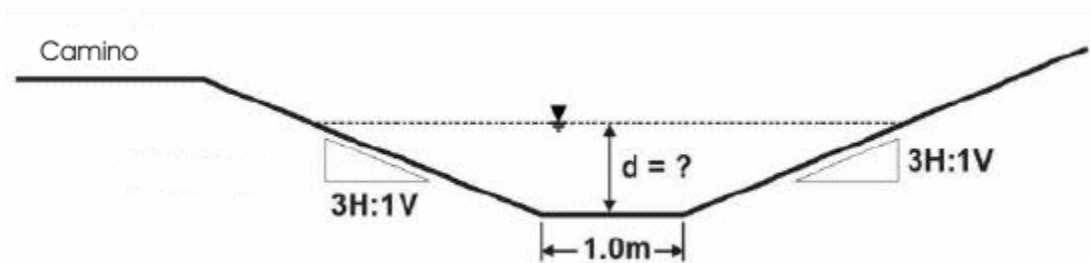
Los datos son los siguientes:

$Q = 0.5 \text{ m}^3/\text{s}$.

Pendiente $S = 0.15 \text{ m/m}$, cuyo valor es mayor al 10%, por lo tanto el canal es considerado como uno de pendiente pronunciada, y el diseño varía en relación a los canales con pendiente menor.

Ancho de la base $B = 1.0 \text{ m}$.

Pendientes laterales $Z = 3$



Para resolver el problema, ingrese en la gráfica 3 del anexo 9-2, dados $Q = 0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ y $S = 0.15 \text{ m/m}$:

Profundidad de flujo = 180 mm.

Diámetro medio del enrocado $D_{50} = 220 \text{ mm}$.

EJEMPLO 7

Estime el tamaño de roca y el espesor del gavión requerido para conducir una descarga de $0.3 \text{ m}^3/\text{s}$ a través de una canal trapezoidal de 20 % de gradiente, asuma que el ancho del lecho es de 1.5 m y el talud lateral es de 3:1 en ambos lados del canal

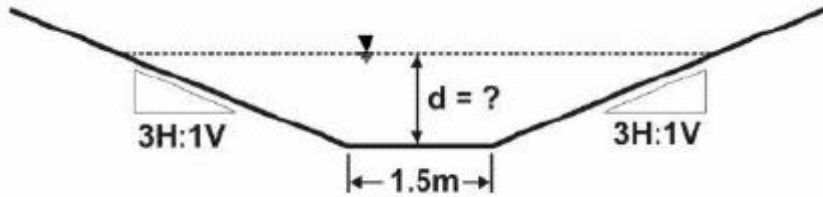
Solución:

Paso 1: Encuentre la profundidad de flujo en el canal.

Descarga, $Q = 0.3 \text{ m}^3/\text{s}$

Pendiente del lecho, $S = 0.20 \text{ m/m}$

Ancho del lecho, $B = 1.5 \text{ m}$ Taludes laterales, $Z = 3$



Ingresa en la gráfica 9 del anexo 9-2, para $Q = 0.3 \text{ m}^3/\text{s}$, la profundidad de flujo es 90 mm.

Paso 2: Determine el tamaño de la roca que conformará el gavión.

Esfuerzo de corte del flujo, $\tau_d = 9.81 \times 0.090 \times 0.20 = 0.176 \text{ Kpa}$.

Luego en la gráfica 5 del anexo 9-2, para $\tau_d = 0.176 \text{ KPa}$, el diámetro medio de la roca es 150 mm.

Paso 3: Encuentre el espesor del colchón de gaviones:

De la gráfica 6 del anexo 9-2, para $\tau_d = 0.176 \text{ KPa}$, el espesor mínimo es de $0.076 \text{ m} = 76 \text{ mm}$.

De las recomendaciones del acápite 8.8.3, el espesor del colchón es 2 a 3 veces el diámetro medio, por lo tanto, el espesor entra en el rango de 300 mm a 450 mm.

Los colchones de gaviones fabricados tienen un espesor que varía entre 0.25 m a 0.45 m.

Por lo tanto, adoptemos un espesor de 0.30 m, lo cuál es cercano al doble de D_{50} .

9.21 EJERCICIOS PROPUESTOS

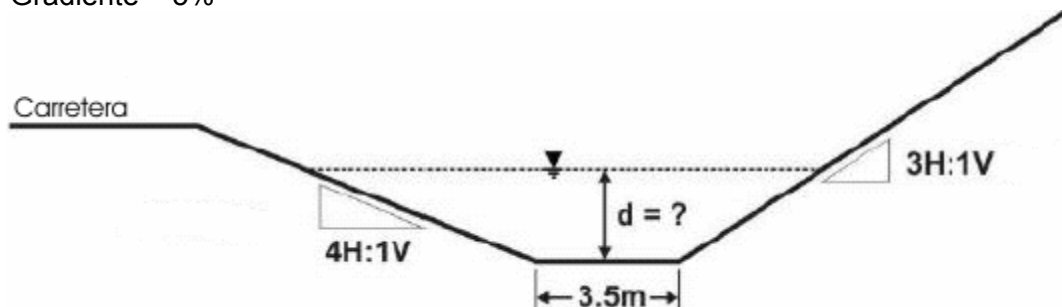
9.1 Determine si es posible utilizar fibra de vidrio como material de revestimiento en un canal de un ancho de base de 0.61 m, taludes laterales de 1:4, pendiente de 0.05 m/m; el canal de sección trapezoidal conduce un caudal de $0.283 \text{ m}^3/\text{s}$. Encuentre la profundidad de flujo.

9.2 La canaleta de una carretera, ver figura del ejercicio, puede conducir un caudal máximo de $0.15 \text{ m}^3/\text{s}$. Determine el diámetro medio del material granular (grava) que es requerido para un control adecuado de la erosión.

Información de la canaleta:

Ancho del lecho = 3.5 m

Gradiente = 5%



9.3 Para la construcción de una carretera, es necesario revestir un canal de 1250 pies (381 m) de largo. Para dicha obra será necesario reducir su longitud a 1000 pies (305m). El canal

esta diseñado para un caudal de 5000 cfs ($141.6 \text{ m}^3/\text{s}$) incluyendo sus márgenes. Condiciones adicionales del sitio son descritas:

Las condiciones de flujo pueden ser asumidas como uniformes o flujo gradualmente variado.

El perfil del canal existente indica que la pendiente longitudinal es de 0.0049

Los suelos naturales son pobremente gradados que van desde arenas medias a gravas gruesas como se ilustra en la curva de gradación de la figura del problema. La curva de gradación indica las siguientes características del suelo:

$$D_{85} = 0.105 \text{ pies (0.032 m)}$$

$$D_{50} = 0.064 \text{ pies (0.018 m)}$$

$$D_{15} = 0.0045 \text{ pies (0.001 m)}$$

$$\text{Permeabilidad } K = 3.5 \cdot 10^{-2} \text{ cm/s}$$

$$\text{Gravedad específica de la roca de 2.65}$$

Diseñe el enrocado y filtro para el canal trapezoidal que será construido en este lugar.

- 9.4** Determinar un revestimiento adecuado para un canal de sección trapezoidal, situado al lado de un camino, y cuyas características principales son:

$$\text{Descarga máxima en el canal: } Q = 500 \text{ pies}^3/\text{s}$$

$$\text{Pendiente del canal: } S = 10 \%$$

$$\text{Ancho de la base: } b = 20 \text{ pies}$$

$$\text{Taludes laterales: } Z = 2H:1V$$

- 9.5** Un canal natural ancho tiene que ser estabilizado con los métodos descritos en este capítulo. En su trayectoria, el canal pasa por una curva de 45° y un radio de curvatura de 200 pies. Si el canal tiene una descarga máxima de $2800 \text{ pies}^3/\text{s}$ con un período de retorno de 100 años, una pendiente de 1.2 %, un ancho de la base de 40 pies, y los taludes laterales son de $Z = 4$. Diseñar el sistema de revestimiento para a.) los tramos rectos antes y después de la curva, b) el revestimiento adecuado para la parte de la curva, la longitud de protección y la sobre elevación del tirante.

- 9.6** Determine el tamaño medio del enrocado y la profundidad de flujo para el siguiente canal con pendiente pronunciada:

Datos:

$$Q = 0.566 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$S = 0.15 \text{ m/m}$$

$$B = 0.61 \text{ m.}$$

$$Z = 3$$

- 9.7** Encuentre el tamaño medio adecuado del enrocado y la profanidad de flujo de un canal con pendiente pronunciada:

Datos:

$$Q = 0.849 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$S = 0.15 \text{ m/m}$$

$$B = 0.914 \text{ m.}$$

$$Z = 3$$

- 9.8** Determine la profundidad de flujo, el tamaño medio de las rocas y el espesor requerido para un colchón conformado por gaviones que reviste un canal de sección trapezoidal con taludes laterales de $Z = 3$, una pendiente del 12 %, un ancho de la base de 0.61 m y una descarga de $0.283 \text{ m}^3/\text{s}$.
- 9.9** Un canal para drenaje está excavado en un terreno formado por suelo arcilloso medianamente compactado. Por medio de ensayos y pruebas de geotecnia se ha llegado a determinar el índice de vacíos de ese suelo es de 1.0. El canal es de sección trapezoidal, el caudal de diseño es de $2.5 \text{ m}^3/\text{s}$ y la pendiente de fondo es de 0.0016. Determinar: a) el ancho de la base, b) el tamaño medio y profundidad de flujo si el canal será revestido con enrocado.
- 9.10** Un drenaje carretero de sección trapezoidal tiene sus pendientes laterales de 1:3, el diseñador ha dispuesto que la base del canal de drenaje debe ser revestido con grava de 55 mm. Determine el tamaño medio de grava, necesario para proteger las márgenes del canal.

Datos:

Grava redondeada

$B = 1.5 \text{ m}$.

Tirante = 0.184 m.

9.22 BIBLIOGRAFIA

- U.S. Department of Transportation – Federal Highway Administration. “Design of Rip Rap Revetment”, Hydraulic Engineering Circular N° 11. Estados Unidos. Marzo 1989
- Web Planeta Terra, Gaviones, http://planeta.terra.com.br/negocios/solnasce/gaviones_esp.htm
- U.S. Department of Transportation – Federal Highway Administration. “Design of Roadside Channels with Flexible Lining”, Hydraulic Engineering Circular N° 15. Estados Unidos. Abril 1998.
- Georgia Stormwater Management Manual, Appendix F - Guidelines for Design of Open Channels. Estados Unidos. Mayo 2003.

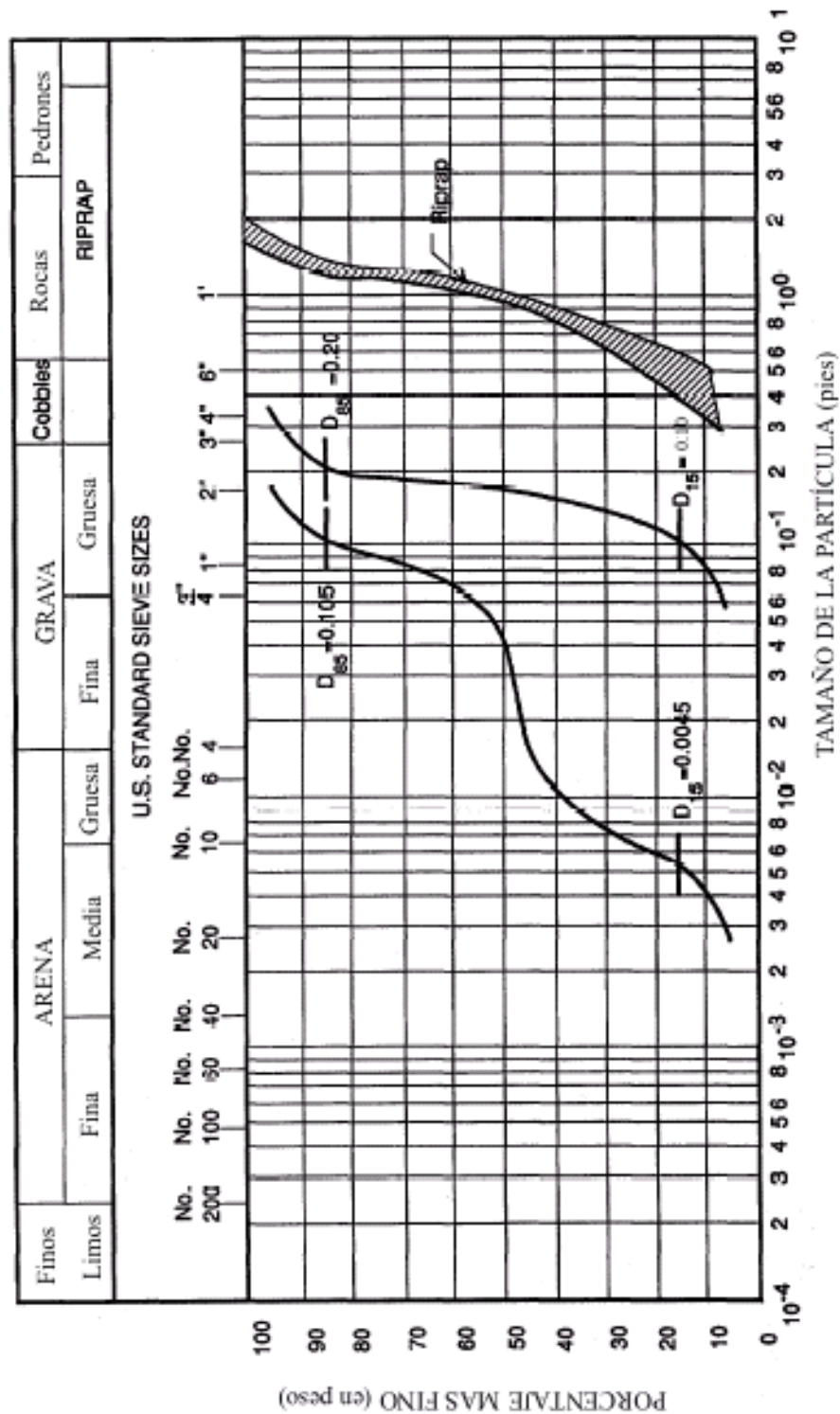


Figura 9.10 Curva de gradación del ejercicio 9.3