

122



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**NUEVAS TECNICAS DE REVESTIMIENTO PARA CAUCES  
NATURALES Y ARTIFICIALES**

**T E S I S**

**PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO CIVIL**

**Presenta:  
EMILIANO ROSALES LIMON**

**Director de Tesis:  
M.I. ARTURO NAVA MASTACHE**



**Ciudad Universitaria México D.F. Noviembre 2002**

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA  
DIRECCION  
FING/DCTG/SEAC/UTIT/096/01

Señor  
**EMILIANO ROSALES LIMÓN**  
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor M.I. ARTURO NAVA MASTACHE, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

"NUEVAS TÉCNICAS DE REVESTIMIENTO PARA CAUCES NATURALES Y ARTIFICIALES"

- INTRODUCCIÓN
- I. ANTECEDENTES
- II. ESPECIFICACIONES
- III. FORMAS DE REVESTIMIENTO
- IV. PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO, VERIFICACIÓN Y DISEÑO DE LOS REVESTIMIENTOS EN COLCHONES Y GAVIONES
- V. COMPARACIÓN DE REVESTIMIENTOS MEDIANTE COLCHONES RENO Y GAVIONES CONTRA REVESTIMIENTO EN RIP-RAP
- VI. PROCESO CONSTRUCTIVO DEL GAVIÓN Y DE LOS COLCHONES RENO
- VII. CONCLUSIONES

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"  
Cd. Universitario a 23 de mayo de 2002.  
EL DIRECTOR

M.C. GERARDO FERRANDO BRAVO  
GFB/GMP/mstg.

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE: Emiliano Rosales

Limón

FECHA: 23 - Nov - 2002

FIRMA: [Firma]

*A mis padres  
y  
hermanos.*

---

## NUEVAS TÉCNICAS DE REVESTIMIENTO PARA CAUCES NATURALES Y ARTIFICIALES

Introducción.....	1
1. Antecedentes.....	3
1.1 Objetivos principales de un revestimiento	
1.2 Concepto de canalización	
1.3 Concepto de colchón Reno y gavión	
1.4 Funciones y características del revestimiento de un canal	
1.5 Secciones más frecuentes de revestimiento	
2. Especificaciones.....	34
2.1 Medidas estándar	
2.2 Alambre galvanizado tipo III	
2.3 Alambre galvanizado tipo III recubierto con PVC	
3. Formas de revestimiento.....	48
3.1 Revestimiento realizados en seco	
3.1.1 Aspectos relacionados con características geotécnicas	
3.1.2 Aspectos relacionados con características hidráulicas	
3.2 Revestimientos realizados en presencia de agua	
3.2.1 Aspectos relacionados con características geotécnicas	
3.2.2 Aspectos relacionados con características hidráulicas	
3.3 Revestimiento realizados en seco consolidados	
3.3.1 Colchón Reno consolidado con almáciga bituminosa	
3.3.2 Colchón Reno sellado con almáciga bituminosa	
3.3.3 Colchón Reno con membrana impermeable	
3.4 Revestimientos consolidados realizados en presencia de agua	

---

4 Procedimiento de cálculo, verificación y diseño de los revestimientos en colchones Reno.....	77
4.1 Expresión del flujo	
4.2 Elección del tipo	
4.3 Condiciones geotécnicas	
4.4 Condiciones hidráulicas	
4.5 Diseño mediante software	
4.5.1 Variables de entrada	
4.5.2 Desarrollo	
4.5.3 Resultados del programa	
4.5.4 Interpretación de resultados	
5. Comparación de revestimientos mediante colchones Reno y gaviones contra revestimientos en rip-rap.....	102
6 Proceso constructivo del gavión y de los colchones Reno.....	114
6.1 Requerimiento de personal	
6.2 Herramienta y equipo	
6.3 Proceso de preparación y puesta en obra	
7. Conclusiones.....	124
Apéndice.....	127
Bibliografía.....	132

## INTRODUCCION

A través de la historia, el hombre ha buscado las mejores condiciones geográficas, climáticas, pluviales, entre otras, para mejorar sus condiciones de vida. Por esto, es común que gran parte de las poblaciones se encuentren ubicadas en las márgenes de los ríos. Los cuales les proporciona alimento, una vía de comunicación y la misma agua para satisfacer sus necesidades domésticas, agrícolas e industriales. Por lo que la fijación de un cauce estable es de suma importancia.

Desde el siglo XVI, los ingenieros utilizaban en Europa unas cestas de mimbre rellenas de tierra -denominadas por sus inventores italianos *gabbioni*, o "jaulas grandes" para fortificar los emplazamientos militares y reforzar las orillas de los ríos (Ref.1). Hoy, el Servicio de Recursos, Fomento y Aprovechamiento de Aguas (AGLW) del Departamento de Agricultura de la FAO está promoviendo la misma tecnología sencilla -los "gaviones"- para utilizarlos como bloques de construcción para revestimiento en las estructuras hidráulicas de bajo costo y larga duración en los países en desarrollo.

Es en 1893, cuando el Río Reno rompió sus márgenes a los alrededores de Boloña (Ref.2), que el gavión saco tiene la primera e importante aplicación para la esquematización del río primerísimo de Casalecchio de Reno. Al final del siglo pasado se comienza a usar un nuevo y más moderno tipo de gavión; del gavión saco se pasa al tipo caja, aun más eficiente en la programación de barrancos y defensas fluviales.

La forma de los gaviones ha evolucionado y sus bordes se han reforzado con alambre de diámetro más ancho. Esto refuerza los lados del armazón durante la construcción, facilita las operaciones de sujeción y refuerza en general las estructuras de gaviones.

La planeación, diseño, construcción y mantenimiento de un sistema de conducción y distribución es una parte integral de la mayoría de los aprovechamientos hidráulicos, sean pequeños o grandes, simples o complejos y ya sea que sirvan para uno o diferentes usos. Para optimizar los beneficios del aprovechamiento, el proyecto completo se debe considerar como una unidad, antes de que se establezcan los requerimientos para el sistema de conducción y distribución.

Las propiedades hidráulicas de un canal natural por lo general son muy irregulares. En algunos casos pueden hacerse suposiciones empíricas razonablemente consistentes con las observaciones y experiencias reales, de tal modo que las condiciones de flujo en estos canales se vuelvan manejables mediante el tratamiento de a hidráulica teórica. Un estudio completo sobre el comportamiento del flujo en canales naturales requiere el conocimiento de otros campos, como hidrología, geomorfología, etc. Éste, constituye de hecho, un tema de estudio por sí mismo, conocido como hidráulica fluvial (Ref.3). Dicho estudio esta fuera de alcance de este trabajo. Lo que se desarrolla aquí es una adaptación de este tipo de canales a un

sección típica de revestimiento y de esta forma se prosigue a realizar el análisis de dimensionamiento del revestimiento.

Los cauces como todos los recursos naturales, requieren de mantenimiento y cuidados para evitar que con el tiempo provoquen dificultades. Un problema frecuente es que los cauces tanto naturales y artificiales en sus periodos alternos de estiaje y crecientes, provocan el asolvamiento del lecho, principalmente en las curvas, reduciendo con esto su área hidráulica, lo cual origina que al presentarse una nueva creciente, erosionen los márgenes o se desborden. Se han desarrollado diferentes técnicas; una de ellas es el uso de los colchones Reno y del gavión, que son estructuras en forma de caja, hechas de malla metálica a triple torsión rellenas de roca, más adelante se describirán con mayor detalle.

En el desarrollo de este trabajo primeramente se mencionan algunos conceptos teóricos que ayudan a tener una mejor visión del contenido de este trabajo. Posteriormente se hace mención de las especificaciones o requisitos acerca de los colchones Reno y de los gaviones, los cuales son tomados de un conjunto de normas americanas, ya que en México no se cuenta con algún documento que regule las características propias de estas estructuras y mucho menos su construcción. En el tercer capítulo se ven las diferentes formas de revestimiento de cauces naturales y artificiales destacándose algunas de las características hidráulicas y geotécnicas que se deben tener en cuenta para su buen funcionamiento. En el siguiente capítulo, se analizan las condiciones geotécnicas e hidráulicas que se deben de cumplir para lograr un buen diseño en colchones Reno realizándose un ejemplo de diseño hecho "manualmente", posteriormente se describe un software como una herramienta para facilitar el diseño de revestimientos. En el capítulo cinco se realiza una comparación de revestimientos mediante colchones Reno y los revestimientos en piedras sueltas (también llamados revestimientos en rip-rap en países de habla inglesa). Finalmente se desarrolla un proceso de construcción práctico y sencillo de Colchones Reno y gaviones.

Este trabajo no tiene la finalidad de ser tomado como una forma única y la mejor, sino más bien que se considere como una alternativa más para realizar revestimientos de cauces. Será finalmente el proyectista quien después de haber realizado estudios de factibilidad decida la mejor alternativa.

1

## ANTECEDENTES

## 1.1 Objetivos principales de un revestimiento

El propósito principal de las obras de protección de márgenes es doble. Por un lado, evitar el contacto directo entre el flujo con alta velocidad y el material que forma la orilla, y por otro, guiar o conducir el flujo en una dirección deseada y conveniente (Ref.4).

También se puede mencionar:

- Protección frente a las inundaciones, es decir impedir o dificultar que el terreno se inunde. Este es un objetivo dictado por la presión del daño económico y sobre la vida humana que provoca la inundación.
- Reducción de las pérdidas de agua en el canal. En este caso el revestimiento tiene como finalidad evitar la mayor pérdida de agua posible. Se debe de cuidar que el agua que se capta aguas arriba sea la que pase aguas abajo.
- Permitir el transporte de agua a alta velocidad con un costo reducido de construcción.
- La fijación de un cauce estable, lo cual significa poder asegurar que el flujo discurrirá en el futuro de modo permanente por dicho canal. Lo que mueve a este objetivo es desterrar la amenaza de los cambios de cauce del río. Estos cambios pueden poner en entredicho por ejemplo una planificación territorial, una obra de aprovechamiento de agua o un núcleo de población.
- La mejora de las condiciones de desagüe, es decir; asegurar que el mayor caudal pase en las condiciones deseadas.
- Reducir el costo de operación y mantenimiento.
- Obtención de rugosidades predeterminadas en las paredes. Importante para el estudio, cálculo y diseño del canal.

### 1.1.1. Clasificación de los recubrimientos marginales

Los recubrimientos marginales pueden ser permeables, semi-permeables e impermeables (Ref.4).

1. *Permeables.* Cuando permiten el paso libre del agua pero reducen su velocidad para que pierda su capacidad erosiva al no poder arrastrar el material de la margen. Algunas veces se diseñan para detener la vegetación y basura que arrastra la corriente. Por ejemplo se tienen los jacks, y las pantallas de madera. En todas estas obras el agua del cauce está en contacto con la margen.

2. *Semi-impermeables*. Son aquellos que cubren la margen y evitan el contacto directo de la corriente con el material que la forma, aunque no evitan que el agua pueda fluir entre sus huecos, perpendicularmente a la protección. Como ejemplo se encuentran todas las protecciones formadas con materiales sueltos como el enrocamiento, los gaviones y colchones Reno, y las formadas con elementos prefabricados de concreto.
3. *Impermeables*. Son aquellos que evitan completamente el contacto entre el material de la orilla y el agua. Como ejemplo se pueden citar las losas de concreto, recubrimientos asfálticos, muros de mampostería, tabla-estacados y uso de membranas impermeables, cualquiera que sea el material de que estén formados, mientras no existan huecos entre sus elementos.

No todos los recubrimientos se utilizan en cualquier situación o cauce; así, los permeables se utilizan con éxito en corrientes pequeñas que arrastran una gran cantidad de vegetación; los semi-impermeables, en todo tipo de corrientes, mientras exista espacio suficiente para formar el talud en que se apoye la protección; y por último, los impermeables con talud vertical, se utilizan con más frecuencia en cauces que pasan por ciudades y poblados.

## 1.2 Concepto de canalización

El problema de la localización de un canal, en muchos aspectos, es igual al problema de localización de un camino, pero la solución puede ser más difícil porque la pendiente de la plantilla del canal debe ser hacia abajo, por lo que los cambios frecuentes de ella, se deben evitar lo que más se pueda. El trazo del canal deberá seguir en lo posible las curvas de nivel del terreno. Sobre terrenos suficientemente uniformes, el canal se puede diseñar con secciones transversales abiertas a través de cortes, sobre relleno, en corte y relleno, a fin de balancear los volúmenes de excavación y sobre relleno. En barrancas poco profundas puede localizarse el canal en un relleno, mientras que en riscos más bajos se pueden salvar mediante cortes

La sección correcta entre el trazo con la localización elegida libremente y la adaptación total a la topografía del terreno debe determinarse comparando los costos de las diferentes soluciones posibles. Sin embargo, es necesario tener en mente que las condiciones geológicas del terreno influyen en forma definitiva en el trazo del canal. Con objeto de establecer bases dignas de confianza para el trazo del canal y para la determinación de sus secciones, se deben explorar las formaciones geológicas y la disposición de materiales (*Ref.5*).

Por canalización de un curso de agua se entiende la regularización de la sección del cauce, que puede ser obtenida y conservada con un revestimiento protectorio sobre ambas orillas, y si es necesario, también en el fondo del cauce (*Ref.6*). Funcionalmente, un encauzamiento es la vía de circulación de un caudal de agua, que puede estar acompañado de material sólido (*Ref.7*).

Dentro de la hidráulica se distinguen dos tipos de canales: los canales naturales y los canales artificiales (Ref.8). Los primeros son aquellos donde el hombre no intervino para su formación y en los segundos sucede lo contrario.

Las propiedades hidráulicas de un canal natural por lo general son muy irregulares. En algunos casos pueden hacerse suposiciones razonablemente consistentes con las observaciones y experiencias reales, de tal modo que las condiciones de flujo de estos canales se vuelvan manejables mediante tratamiento analítico de la hidráulica teórica.

Los canales artificiales son aquellos construidos o desarrollados mediante el esfuerzo humano, por ejemplo: canales de navegación, cunetas, vertederos, canales de riego, canales de centrales hidroeléctricas, etc., Las propiedades hidráulicas de estos canales pueden ser controladas hasta un nivel deseado. La aplicación de las teorías hidráulicas a canales artificiales producen, por lo tanto, resultados bastante similares a las condiciones reales y, por consiguiente, son razonablemente exactos para propósitos prácticos de diseño.

La canalización encierra conceptos muy importantes. A continuación menciono algunos de ellos, así como una breve explicación de cada uno de ellos.

### 1.2.1 Tipos de flujo en los canales

El flujo en canales abiertos puede clasificarse en muchos tipos y describirse de varias maneras. La siguiente clasificación se hace de acuerdo con el cambio de profundidad con respecto a los criterios: tiempo, espacio, efecto de la viscosidad, y de las fuerzas de fricción (Ref.9).

a) *El tiempo: Flujo permanente y flujo no permanente.* El flujo en un canal abierto es *permanente* si la profundidad de flujo no cambia o puede suponerse constante durante un intervalo de tiempo en consideración. El flujo es *no permanente* si la profundidad cambia con el tiempo (Ref.8). En la mayor parte de los problemas de canales abiertos es necesario estudiar el comportamiento del flujo solo bajo condiciones permanentes. Sin embargo, si el cambio en la condición del flujo con respecto al tiempo es importante, el flujo debe tratarse como no permanente.

Para cualquier flujo, el caudal  $Q$  en una sección del canal se expresa por

$$Q = VA \quad (1.1)$$

Donde  $V$  es la velocidad media y  $A$  es el área de la sección transversal de flujo perpendicular a la dirección de éste, debido a que la velocidad media está definida como el caudal dividido por el área de la sección transversal. En la mayor parte de los problemas de flujo permanente el caudal es constante a través del tramo de canal en consideración; en otras palabras, el flujo es continuo. A partir de la ecuación (1.1) se tiene.

$$Q = V_1 A_1 = V_2 A_2 = \dots \quad (1.2)$$

Donde los subíndices designan diferentes secciones del canal. Esta es la ecuación de continuidad para un flujo continuo permanente. Sin embargo, la ecuación 1.2 no es válida cuando el caudal de un flujo permanente no es *uniforme* a lo largo del canal, es decir, cuando parte del agua sale o entra a lo largo del curso del flujo. Este tipo de flujo, conocido como *flujo espacialmente variado* o *discontinuo*, se presenta en cunetas a lo largo de carretera, en canales de efluentes, en canales principales de riego y drenaje en sistemas de irrigación.

b) *Espacio: Flujo uniforme y flujo variado.* Se dice que el flujo en canales abiertos es *uniforme* si la profundidad del flujo es la misma en cada sección del canal. Puede ser permanente o no permanente, según cambie o no la profundidad con respecto al tiempo (Ref. 8).

*Flujo permanente uniforme* es el tipo fundamental que se considera en hidráulica de canales abiertos. La profundidad no cambia durante el intervalo de tiempo bajo consideración. El *flujo permanente no uniforme* es prácticamente imposible ya que se requeriría que la superficie del agua fluctuara de un tiempo a otro pero permaneciendo paralela al fondo del canal.

El flujo es *variado* si la profundidad de flujo cambia a lo largo del canal. Puede ser permanente o no permanente. El flujo uniforme no permanente es poco frecuente.

El flujo variado puede clasificarse además como *rápidamente variado* o *gradualmente variado*. El flujo es *rápidamente variado* si la profundidad del agua cambia de manera abrupta en distancias comparativamente cortas; de otro modo es *gradualmente variado*.

c) *El efecto de la viscosidad del agua: laminar, de transición o turbulento.* La importancia de las fuerzas de inercia respecto de la viscosa, ambas por unidad de masa, define el número de Reynolds ( $R_e$ ), de la siguiente manera:

$$R_e = \frac{V R_h}{\nu} \quad (1.3)$$

Donde

$R_h$  radio hidráulico de la sección en m,  
 $V$  velocidad media en la sección,  
 $\nu$  viscosidad cinemática del agua en  $m^2/s$ .

Para fines prácticos en canales se tiene (Ref.9):

flujo laminar, cuando  $R_e \leq 500$ ,  
 flujo de transición, cuando  $500 \leq R_e \leq 1250$ ,  
 flujo turbulento, cuando  $R_e \geq 1250$ .

El flujo laminar no es muy común, se presenta algunas veces cuando el flujo es en láminas muy delgadas con poca velocidad. En cauces naturales, la rugosidad en las fronteras es normalmente muy grande y se presenta el flujo turbulento.

d) Con respecto a las fuerzas de inercia: subcrítico y supercrítico. La importancia de la fuerza de inercia respecto de la gravedad, ambas por unidad de masa, se mide a través del número de Froude, definido como

$$F = \frac{V}{\sqrt{g \frac{A}{T}}} \quad (1.4)$$

La ecuación anterior es para canales con  $\theta < 8^\circ$ , donde  $\theta$  es el ángulo de inclinación de la plantilla respecto a la horizontal.

- El flujo es en régimen subcrítico, cuando  $F < 1$ , aquí la fuerza de la gravedad es más importante que la de inercia. El flujo es lento.
- El flujo es en régimen crítico, cuando  $F=1$ .
- El flujo es en régimen supercrítico, cuando  $F > 1$ , la fuerza de inercia es mayor que la de gravedad. Es decir rápido.

### 1.2.2 Elementos geométricos de una sección de canal

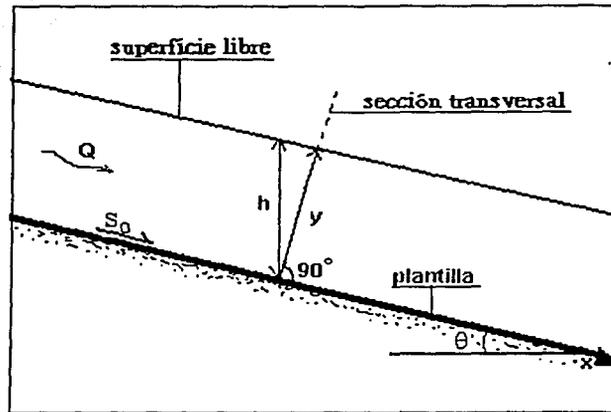
Los elementos geométricos son las propiedades de una sección de canal. Que pueden ser definidos por completo por la geometría de una sección y la profundidad de flujo.

Los elementos geométricos más importantes son:

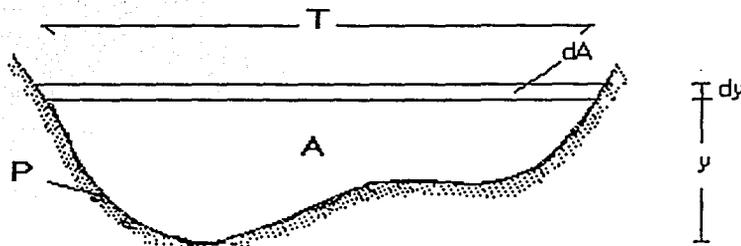
- *Tirante y*. Es la distancia perpendicular a la plantilla, medido desde el punto más bajo de una sección del canal hasta la superficie libre del agua. Ver la figura 1.1.

Se designa por  $h$  a la distancia vertical desde la superficie libre al punto más bajo de la sección, cuando la superficie libre es paralela a la plantilla o  $\theta$  es pequeño ( $\theta < 8^\circ$ , Ref.10) se relaciona mediante la relación

$$y = h \cos\theta$$



a) Corte longitudinal



b) Sección transversal

Fig.1.1 Elementos geométricos de un canal

- **Nivel.** Es la elevación o distancia vertical desde un nivel de referencia hasta la superficie libre. Si el punto más bajo de la sección de canal se escoge como el nivel de referencia, el nivel es idéntico a la profundidad de flujo.
- **Ancho de superficie libre  $T$ .** Es el ancho de la sección del canal en la superficie libre.
- **Área hidráulica  $A$ .** Es el área de la sección transversal del flujo perpendicular a la dirección de flujo.

El incremento diferencial del área  $dA$ , producido por un incremento diferencial del tirante  $dy$ , es

$$dA = T dy$$

- *Perímetro mojado  $P$* . Es la longitud de la línea de intersección de la superficie de canal mojada y de un plano transversal perpendicular a la dirección de flujo.
- *Radio hidráulico  $R_h$* , Es la relación del área mojada con respecto a su perímetro mojado

$$R_h = \frac{A}{P}$$

- *Tirante medio  $Y$* . Es la relación entre el área hidráulica y el ancho de la superficie libre

$$Y = \frac{A}{T}$$

- *Talud*. Indica la inclinación de las paredes de la sección y corresponde a la distancia  $k$  recorrida horizontalmente desde un punto sobre la pared, para ascender la unidad de longitud a otro punto sobre la misma.

### 1.2.3 Ecuaciones del flujo unidimensional permanente

A continuación se muestran las ecuaciones fundamentales de la hidráulica en su forma general para un volumen de control finito con algunas de sus características para el flujo unidimensional permanente.

#### *Ecuación de continuidad*

El flujo de masa del agua a través de la sección de un canal es  $\rho VA$ , donde  $\rho$  es la densidad del líquido,  $V$  la velocidad media de la sección y  $A$  su área hidráulica. De la Fig.1.2, no hay aportaciones ni salidas de líquido en el trayecto; el flujo unidimensional permanente en toda su longitud es:

$$\frac{\partial(\rho V A)}{\partial x} = 0 \quad (1.5)$$

Dado que  $\rho$  es constante (incompresible) y el flujo de masa no cambia al variar  $x$ . Al integrar entre las dos secciones del volumen de control se obtiene.

$$V_1 A_1 = V_2 A_2 = \text{constante} \quad (1.6)$$

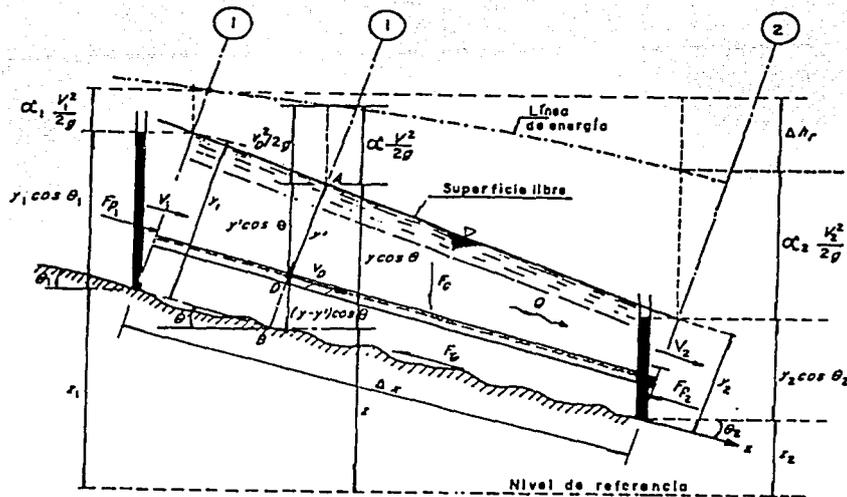


Fig.1.2 Aplicación de las ecuaciones fundamentales de la hidráulica a un volumen de control en un canal (Ref.9)

### a) Ecuación de la energía

El principio de la energía para el flujo unidimensional permanente e incompresible se establece de la siguiente forma:

$$\frac{d}{dx} \left( z + y \cos \theta + \alpha \frac{V^2}{2g} \right) = - \frac{dh_r}{dx} \quad (1.7)$$

Donde

- $h_r$  pérdida de energía,
- $y$  tirante,
- $z$  carga de posición,
- $v$  velocidad media en la sección,
- $\alpha$  coeficiente de Coriolis, considera el efecto de la distribución irregular de la velocidad, sin dimensiones (ver la parte 1.2.4).

La integración de la ecuación anterior entre las secciones 1 y 2 del volumen de control de la figura 1.2, resulta

$$z_1 + y_1 \cos \theta_1 + \alpha_1 \frac{V^2}{2g} = z_2 + y_2 \cos \theta_2 + \alpha_2 \frac{V^2}{2g} + \Delta h_r \quad (1.8)$$

Donde  $\Delta h_r$  es la pérdida de energía entre las dos secciones. Cuando dicha pérdida se debe sólo a la fricción, es proporcional a la longitud  $\Delta x$  del tramo en que se produce.

La pendiente hidráulica media o pendiente media de fricción en el tramo se expresa de la siguiente manera

$$S = \frac{\Delta h_f}{\Delta x} \quad (1.9)$$

Cuando  $\Delta x$  tiende a cero,  $S = dh_f / dx$  que corresponde a la pendiente hidráulica local o pendiente de fricción local; suele llamarse también gradiente hidráulico local.

### c) Ecuación de cantidad de movimiento

Bajo las mismas condiciones de flujo que en el inciso anterior. La ecuación de cantidad de movimiento para dicho volumen resulta

$$F_p + F_r + F_c = \rho(Q_2 \beta_2 V_2 - Q_1 \beta_1 V_1) \quad (1.10)$$

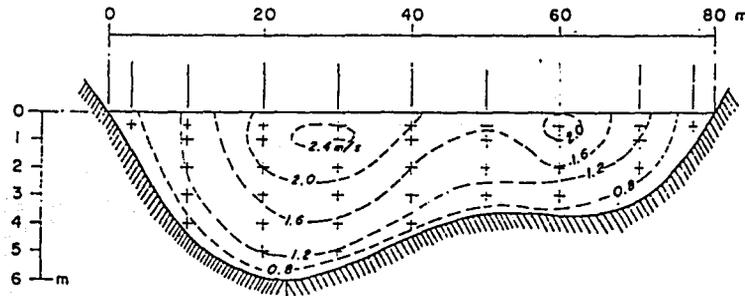
Donde

- $F_p$  fuerza resultante debido a las presiones, en Kg,
- $F_r$  fuerza producida por el esfuerzo tangencial generado sobre el fondo y paredes del volumen de control, en Kg,
- $F_c$  fuerza debida al propio peso, en Kg,
- $Q$  gasto en la sección, en  $m^3/\text{seg}$ ,
- $V$  vector de velocidad media en la sección,
- $\beta$  coeficiente de Boussinesq, que considera el efecto que tiene la distribución irregular de la velocidad en la sección en el cálculo de la cantidad de movimiento con la velocidad media, sin dimensiones (ver la parte 1.2.4).

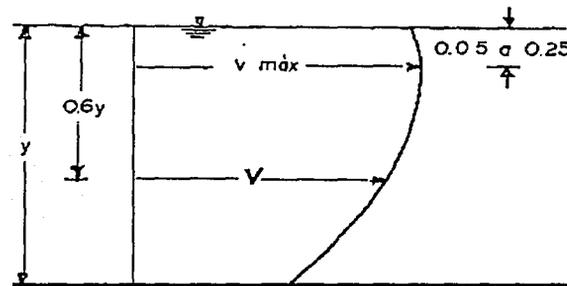
La cantidad de movimiento es igual a  $\rho Q \beta V$  y el segundo término de la ecuación representa el cambio en la cantidad de movimiento entre el flujo que entra y el que sale. La ecuación de cantidad de movimiento es vectorial, de tal forma que  $V$  y  $Q$  tienen magnitud dirección y sentido. Se ha establecido que el gasto sea positivo cuando sale y negativo cuando entra al volumen de control (Ref.9).

## 1.2.4 Distribución de velocidades en una sección de canal

Debido a la presencia de la superficie libre y a la fricción a lo largo de las paredes del canal, las velocidades en un canal no están uniformemente distribuidas en una sección, como se muestra en la Fig.1.3. La máxima velocidad medida en canales normales a menudo ocurre por debajo de la superficie libre a una distancia de 0.05 a 0.25 de la profundidad, el punto de velocidad máxima queda ligeramente debajo de chicha superficie; mientras que la velocidad mínima ocurre en la proximidad de la pared y aumenta hacia la superficie libre (Ref.8).



a) Distribución de la velocidad en la sección transversal de un río



b) Distribución de velocidades sobre una vertical en una sección transversal

Fig.1.3 Distribución de velocidades en una sección

La distribución de velocidades en una sección de canal depende también de otros factores, como una forma inusual de la sección, la rugosidad del canal y la presencia de curvas. En una corriente ancha, rápida y poco profunda o en un canal muy liso, la velocidad máxima por lo general se encuentra en la superficie libre.

Cuando la velocidad del agua es mayor de 2.5 m/s casi no se hacen mediciones profundas solo bastan hacerlas a unos 0.15 m abajo del nivel del agua. La velocidad media es aproximadamente 0.90 de la velocidad superficial.

En un canal ancho ( $T \geq 40 y$ ), con agua a gran velocidad y tirante pequeño, la velocidad máxima ocurre con frecuencia al nivel de la superficie libre. Cuando  $y > 3 m$ , y no es posible utilizar molinete en toda la sección, se puede medir únicamente a 0.15 m debajo de la superficie libre (Ref.9).

Como resultado de la distribución no uniforme de la velocidad, existen los valores de corrección  $\alpha$  y  $\beta$ , los cuales son siempre mayores que la unidad. Dichos coeficientes pueden valuarse solo si se conoce la distribución de la velocidad, experimental o teórica.

El gasto total y la velocidad media de la sección de aforo son

$$Q = \sum_{i=1}^n v_i \Delta A_i \quad (1.11)$$

$$V = \frac{Q}{A} \quad (1.12)$$

Donde

$\Delta A_i$  área de la subsección  $i$  en  $m^2$ ,  
 $v_i$  velocidad media en la subsección  $i$  en  $m/s$ ,  
 $n$  número de subsecciones,  
 $A$  área hidráulica total en  $m^2$ ,  
 $Q$  gasto total en  $m^3/s$ .

Los coeficientes se obtienen de la siguiente manera

$$\alpha = \frac{1}{AV^3} \sum_{i=1}^n v_i^3 \Delta A_i \quad (1.13)$$

$$\beta = \frac{1}{AV^2} \sum_{i=1}^n v_i^2 \Delta A_i \quad (1.14)$$

En ambos casos la determinación de  $\alpha$  y  $\beta$  es costosa, de tal forma que se recurre a otros criterios simplificados pero menos precisos. La tala 1.1 muestra algunos valores de dichos coeficientes propuestos por algunos autores.

canales	$\alpha$ valores medios	$\beta$ valores medios
Rectos sin obstáculos (Ref.8)	1.05	1.02
Rectangulares con obstáculos (O'Brien)	1.41	1.14
Trapeziales excavados en tierra (Darcy y Bazin)	1.10	1.1.03
Corrientes naturales y torrentes (Kolupaila)	1.15	1.05
Ríos de valle después de un meandro (Ref.8)	1.35	1.12
Ríos de valle desbordados en planicie (Kopuaila)	1.75	1.25
Trapeziales con paredes de mampostería (Darcy y Bazin)	1.07	1.02

tabla.1.1 Coeficientes  $\alpha$  y  $\beta$  en canales

Una onda de traslación es una sobrelevación del nivel del agua o una depresión (positiva y negativa respectivamente), que se propaga sobre la superficie libre conservando su forma geométrica (Ref.9). El primer caso se origina por la adición brusca de un volumen de agua o la adición de un cuerpo sólido; lo segundo ocurre por la extracción repentina de agua. La velocidad con que se propaga se conoce como celeridad  $c$ . En su traslación la onda se extingue por efecto de las resistencias pasivas en su movimiento. En un canal de pendiente pequeña y sección cualquiera, la celeridad de la onda se define de la siguiente manera

$$c = \sqrt{g A / T} \quad (1.15)$$

La celeridad de la onda es igual al denominador del coeficiente que define al número de Froude. Para flujos en régimen subcrítico y supercrítico se pueden hacer las siguientes interpretaciones:

- Para  $F < 1$  (régimen subcrítico),  $v < c$ , entonces la celeridad puede propagarse contra el flujo, de modo que la zona del canal aguas arriba está afectada por las condiciones hidráulicas de aguas abajo.
- Para  $F > 1$  (régimen supercrítico),  $v > c$  de modo que la zona del canal aguas arriba, no esta afectada por las condiciones hidráulicas de aguas abajo.

### 1.2.5 Pérdidas de energía

La superficie de un conducto esta formada por irregularidades o asperezas de diferentes alturas y con distribución irregular o aleatoria, que dependen de factores como la altura media de las irregularidades de la superficie, la variación de la altura efectiva respecto de la altura media, la forma y distribución geométrica, la distribución entre dos irregularidades vecinas. Puesto que es muy difícil tomar en cuenta todos esos factores, se permite expresar que la rugosidad puede expresarse por la altura media de las asperezas llamada rugosidad absoluta ( $k_s$ ), como un promedio obtenido del resultado de un cálculo con las características del flujo, más no propiamente por el obtenido como la media de las alturas determinadas físicamente de la pared en cada conducción (Ref.11).

En un canal de sección y rugosidad constante, el flujo puede ser variado, lo que hace que la pendiente hidráulica cambie continuamente de una sección a otra. Por esta razón es común en canales asociar la pérdida de fricción en un tramo con la pendiente media de fricción en el mismo y efectuar el cálculo de dicha pendiente, la ecuación aplicable para flujo uniforme de sección cualquiera es:

$$V = \sqrt{\frac{8g}{f}} \sqrt{R_h S} \quad (1.16)$$

Donde

- $V$  velocidad media en m/s,
- $f$  factor de fricción en función del número de Reynolds y de la rugosidad absoluta,
- $g$  aceleración de la gravedad igual a  $9.81 \text{ m/s}^2$ ,
- $S$  corresponde a la pendiente longitudinal del canal.

Cuya aplicación también se acepta en una sección de un flujo variado si  $f$  y  $R_h$  corresponden a los valores locales en la misma, en cuyo caso  $S$  es también la pendiente local de fricción.

El esfuerzo tangencial medio en la pared debido a la fricción que se opone al movimiento en flujo uniforme y variado en un canal es:

$$\tau_o = g \rho R_h S \quad (1.17)$$

Donde

- $\tau_o$  es el esfuerzo tangencial medio
- $\rho$  densidad relativa

La velocidad de fricción  $v_*$ , se define de la siguiente forma:

$$v_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \quad (1.18)$$

La expresión anterior no tiene significado físico, solo que recibe este nombre por tener dimensiones de velocidad, o sea m/s.

Comportamiento de la pared y forma de la sección	$A_l$	$A_r$	Autor
1. Hidráulicamente rugosa.			
a) Rectangular muy ancha		11.02	Prandtl, Von Kármán y Nikuradse (1933), adaptado del que se obtuvo en tubos.
b) Trapecial		11.10 12.27	Keulegan (1938) Keulegan (1938)
2. Hidráulicamente lisa, rugosa y de transición			
a) Rectangular muy ancha	3.32 3.73	11.02 12.20	Colebrook y White (1938) Thijse (1949)
b) Trapecial	3.67	12.27	Colebrook y White, con base en las ecuaciones de Keulegan

Tabla 1.2 Coeficientes  $A_l$  y  $A_r$  para el cálculo de la velocidad media en canales lisos y rugosos Obtenidos de la referencia 9.

### 1.2.6 Velocidad media en flujo turbulento

En canales de pared rugosa, la velocidad media  $V$  se obtiene a través de la siguiente expresión

$$\frac{V}{v_*} = 2.5 \ln \frac{A_r R_h}{k_s} \quad (1.19)$$

Para canales con pared hidráulicamente lisa o rugosa, operando o no en la zona de transición, la velocidad media se rige bajo la siguiente expresión

$$\frac{V}{v_*} = -2.5 \ln \left[ \frac{1}{A \frac{v_* R_h}{\nu}} + \frac{K_s}{A_r R_h} \right] \quad (1.20)$$

En estas expresiones  $A_r$  y  $A_l$  son variables en función del tipo de sección y rugosidad de las paredes, como se muestra en la tabla 1.2. Para Iwagaki, la resistencia al flujo turbulento en un canal es mayor que en un tubo de igual rugosidad y radio hidráulico y crece a medida que aumente en número de Froude, esto se debe a la inestabilidad de la superficie libre.

### 1.2.7 Flujo uniforme

#### Ecuación de Chezy

Considérese un tramo como el que se muestra en la figura 1.4. el cual es delimitado por dos secciones 1 y 2 con flujo uniforme, con  $\theta$  como ángulo de inclinación de la plantilla, de área hidráulica  $A$  y separadas una distancia  $L$ . La única fuerza que contribuye al movimiento del fluido analizado es la componente del peso de dicho tramo. En la dirección del movimiento, es decir:

$$\gamma AL \text{ Sen } \theta \quad (1.21 \text{ a})$$

Si no hay aceleración, existe una fuerza colineal con dirección opuesta y de igual magnitud para que el flujo sea uniforme. Dicha fuerza es la debida a la fricción que ejerce el fluido con las paredes y el fondo del cauce.

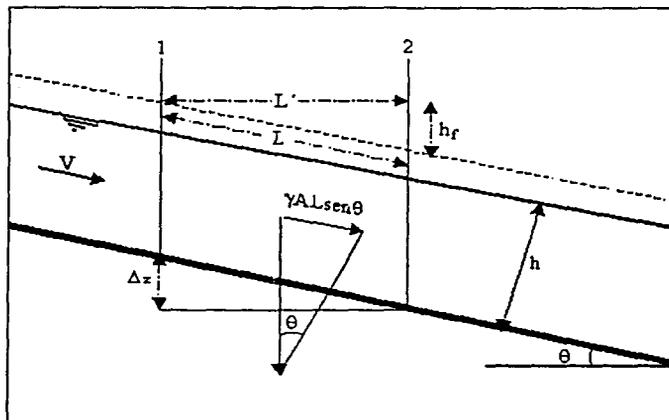


Fig.1.4 sección de control de un canal en flujo uniforme

Por otra parte, los experimentos han demostrado que el esfuerzo de fricción  $f$  en régimen turbulento es proporcional al cuadrado de la velocidad, es decir,  $f = CV^2$ . Además, como el área de contacto entre el fluido y el conducto es  $PL$ , siendo  $P$  el perímetro mojado y  $L$  la distancia analizada. La fuerza de fricción es:

$$CV^2PL \quad (1.21 \text{ b})$$

Como la pendiente hidráulica es  $S = \text{Sen} \theta$  y  $R_h = A / P$ , al igualar (1.21a) y (1.21b), y despejar  $V$  se obtiene la *ecuación de Chezy*, expresada de la siguiente manera:

$$V = C\sqrt{R_h S} \quad (1.22)$$

Donde  $C$  es un factor de fricción o resistencia y esta relacionada con la  $f$  de Darcy-Weisbach mediante la ecuación

$$C = \sqrt{\frac{8g}{f}} \quad (1.23)$$

#### *Ecuaciones empíricas de fricción.*

El uso de la ecuación de Chezy en canales tiene la dificultad de tener que hacer una estimación adecuada del factor de fricción, toda vez que éste depende del número de Reynolds. Sin embargo, la mayor parte de los problemas de canales que se presentan en la práctica están dentro de la región hidráulicamente rugosa del flujo turbulento. Para esta condición se han desarrollado diferentes ecuaciones que valúan al factor  $C$ .

#### *Ecuación de Manning*

La ecuación de Manning es la más conocida y usada en la mayoría de los países de occidente y será la que se aplique en este trabajo. Evalúa a  $C$  en la forma

$$C = \frac{R_h^{1/6}}{n} \quad (1.26)$$

Donde  $n$  es un factor de fricción, llamado coeficiente de Manning, depende sólo de la rugosidad de la frontera y es independiente del número de Reynolds. Además  $n$  esta relacionado con  $f$  y  $k_s$  mediante las siguientes expresiones:

$$n = \sqrt{\frac{f}{8g}} R_h^{1/6} \quad (1.27)$$

Para  $k_s$  en mm se tiene

Condición de $c$	Relación	Autor
$c = 14.84$	$n = 0.0122 k_s^{1/6}$	Strickler, 1923
$c = 14.84$	$n = 0.0119 k_s^{1/6}$	Williamson, 1951
$c = 12.00$	$n = 0.04 k_s^{1/6}$	ASCE

Las limitaciones de la aplicación de  $n$  dentro de la ecuación de Manning se pueden resumir de la siguiente manera:

- El coeficiente  $n$  no es adimensional.
- Válida para  $R_e < 10000$ , ya que no considera la viscosidad.
- Válida solo para rugosidades medias, ya que no sigue las leyes generales de fricción.
- No considera: la forma de la sección, la influencia de formación de ondas, de arrastre de aire y del transporte de sedimentos, las distintas rugosidades en la misma sección y la de su distribución de acuerdo con los niveles de agua.

Al sustituir la ecuación 1.26 en la ecuación de Chezy (1.22) resulta la ecuación de Manning, en la forma

$$V = \frac{1}{n} R_h^{2/3} S^{1/2} \quad (1.28)$$

Su aplicación se restringe a flujo turbulento en canales rugosos cuyo fondo no cambia sustancialmente a ondulaciones pronunciadas cuando es móvil. Su precisión depende en mucho de la selección adecuada de  $n$ , que se considera generalmente dependiente de las paredes y el fondo del canal, sin embargo  $n$  es un coeficiente de fricción, es decir; depende también de la geometría de la sección y características del flujo.

*Método de la soil conservation service (SCS) para el cálculo de  $n$*

Factores que intervienen en el cálculo del coeficiente de Manning

El valor del coeficiente de rugosidad de Manning ( $n$ ) es muy variable y depende de un cierto número de factores. Algunos de ellos se encuentran íntimamente relacionados entre sí (Ref.8), que son:

- *Rugosidad superficial.* Se presenta por el tamaño y la forma de los granos del material que forman el perímetro mojado y que producen un efecto retardador del flujo.
- *Vegetación.* La vegetación puede considerarse como una clase de rugosidad superficial, pero también reduce de manera notable la capacidad del canal y retarda el flujo. Este efecto depende por completo de la altura, densidad, distribución y tipo de vegetación.
- *Irregularidad del canal.* Se incluyen irregularidades en el perímetro mojado y variaciones en la sección transversal, tamaño y forma de ésta a lo largo del canal.
- *Alineamiento del canal.* Curvas suaves con radios grandes producen valores de  $n$  relativamente bajos, en tanto que curvas bruscas con meandros severos incrementan el  $n$ .
- *Sedimentación y socavación.* En general, la sedimentación puede cambiar un canal muy irregular en un canal relativamente uniforme y disminuir el  $n$ , en tanto que la socavación puede hacer lo contrario e incrementar el  $n$ . Sin embargo, el efecto dominante de la sedimentación dependerá de la naturaleza del material depositado.
- *Obstrucción.* Presencia de obstrucciones de troncos, pilas de puentes y estructuras similares tienden a incrementarse el  $n$ .
- *Nivel y caudal.* En mayor parte de las corrientes el valor de  $n$  disminuye con el aumento de nivel y en el caudal.
- *Material en suspensión y carga del lecho.* Ya sea en movimiento o no, consumirá energía y causará una pérdida de altura e incrementará la rugosidad aparente del canal.

Los diferentes elementos que influyen el coeficiente de Manning  $n$  se relacionan de la siguiente manera

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) m_5 \quad (3.17)$$

Los valores  $n_i$  y  $m_5$  se obtienen de la tabla 1.3

#### *Estimación de $n$ , usando tablas*

A continuación se muestra una serie de tablas para calcular el coeficiente de rugosidad de Manning ( $n$ ) en corrientes naturales y rugosidad en colchones Reno y gaviones.

Condición del cauce	Valor de $n$
1. Características del canal	$n_0$
a) En tierra	0.02
b) Cortado en roca	0.025
c) En grava fina	0.024
d) En grava gruesa	0.028
1. Grado de irregularidad:	$n_1$
a) Fronteras lisas. Lo mejor que se obtiene para los materiales que se usan	0
b) Irregulares menores. Por ejemplo, canal bien dragado o excavado	0.005
c) Irregularidades moderadas. Canal mal dragado o excavado	0.01
d) Muy irregular. Salientes o entrantes continuas del mismo orden de magnitud que el tirante. Erosiones muy irregulares en las márgenes	0.02
2. Variaciones de la sección transversal en forma y tamaño:	$n_2$
a) Graduales	0
b) Secciones grandes y pequeñas alternadas ocasionalmente	0.005
c) Secciones grandes y pequeñas alternadas frecuentemente o bien cambios de forma que causan desviación ocasional desde el cauce principal a ambos lados	0.01-0.015
3. Obstrucciones al área hidráulica provocadas por rocas, troncos y depósitos de desperdicios.	$n_3$
a) Sin obstrucciones	0
b) Menores	0.01- 0.015
c) Apreciables	0.02-0.03
d) Severas	0.04-0.06
4. Cantidad y tipo de vegetación:	$n_4$
a) poca densidad	0.005-0.01
b) Moderada. Matorral o pasto.	0.01-0.25
c) Densa	0.025-0.05
d) Muy densa	0.05-0.1
6. Grado de sinuosidad	$m_5$
a) $s < 1.2$	1.0
b) $1.2 \leq s < 1.5$	1.15
c) $s > 1.5$	1.3

Tabla 1.3 Factores para el cálculo de  $n$ , según el SCS (Ref.8)

COEFICIENTE DE RUGOSIDAD $n$ , EN CORRIENTES NATURALES			
CORRIENTES MENORES (ancho superficial en nivel creciente < 30m)	Mínimo	Normal	Máximo
<b>Corrientes en planicie</b>			
1. Limpias, rectas, máximo nivel, sin montículos ni pozos profundos	0.025	0.030	0.033
2. Igual al anterior pero con más piedras y maleza	0.030	0.035	0.040
3. Limpio, serpenteante, algunos pozos y bancos de arena	0.033	0.040	0.045
4. Igual al anterior, pero con algunos matorrales y piedras	0.035	0.045	0.050
5. Igual al anterior, niveles bajos, pendientes y secciones más ineficientes	0.040	0.048	0.055
6. Igual al 4, pero con más piedras	0.045	0.050	0.060
7. Tramos lentos, con malezas y pozos profundos	0.050	0.070	0.080
8. Tramos con muchas malezas, pozos profundos o canales de crecientes con muchos árboles con matorrales bajos.	0.075	0.100	0.150
<b>Corrientes montañosas, sin vegetación en el canal, barrancas empinadas, árboles y matorrales a lo largo de las bancas sumergidas en niveles altos</b>			
9. Fondo: gravas, cantos rodados y algunas rocas	0.030	0.040	0.050
10. Fondo: cantos rodados con rocas grandes	0.040	0.050	0.070
<b>PLANICIES DE INUNDACION</b>			
<b>pastizales, sin matorrales</b>			
11. Pasto corto	0.025	0.030	0.035
12. Pasto alto	0.030	0.035	0.070
<b>Áreas cultivadas</b>			
13. Sin cultivo	0.020	0.030	0.040
14. Cultivos en línea maduros	0.025	0.035	0.045
15. Campos de cultivo maduros	0.030	0.040	0.050
<b>Matorrales</b>			
16. Matorrales dispersos, mucha maleza	0.035	0.050	0.070
17. Pocos matorrales y árboles, en invierno	0.035	0.050	0.060
18. Pocos matorrales y árboles, en verano	0.040	0.060	0.080
19. Matorrales medios a densos, en invierno	0.045	0.070	0.110

20. Matorrales medios a densos, en verano	0.070	0.100	0.160
<b>Árboles</b>			
21. Sauces densos, rectos y en verano	0.110	0.150	0.200
22. Terreno limpio, con troncos sin retoños	0.030	0.040	0.050
23. Igual que el anterior, pero con gran cantidad de retoños	0.050	0.060	0.080
24. Gran cantidad de árboles, algunos troncos caídos, con poco crecimiento de matorrales, nivel del agua por debajo e las ramas	0.080	0.100	0.120
25. Igual que el anterior, pero con nivel de crecientes por encima de las ramas	0.100	0.120	0.160
<b>CORRIENTES MAYORES ( ancho superficial en nivel de creciente mayor a 30 m</b>			
El valor de n es menor que el correspondiente a corrientes menores con descripción similar, debido a que las bancas ofrecen resistencia menor efectiva.			
26. Sección regular, sin cantos redondeados ni matorrales	0.025	.....	0.060
27. Sección irregular y rugosa	0.035	.....	0.100

Tabla 1.4 Valores del coeficiente de rugosidad de Manning en cauces naturales (Ref.8)

PRODUCTOS	Rugosidad n (s/m <sup>1/3</sup> )	Fuerza tractiva permisible $\tau_c$ (Kg/m <sup>2</sup> )
Gaviones 50cm	0.036	34.2
Colchones Reno 15-17 cm	0.03	20.4
Colchones Reno 23-25 cm	0.035	23.4
Colchones Reno 30 cm	0.035	27.0

Tabla 1.5 Fuerza tractiva permisible y coeficientes de rugosidad al final de la instalación (Ref.12)

PRODUCTOS	rugosidad $n$ ( $s/m^{1/3}$ )	fuerza tractiva permisible $\tau_c$ ( $kg/m^2$ )
Gaviones 50cm	0.07-0.1	40
Colchones Reno 15-17 cm	0.07-0.15	40
Colchones Reno 23-25 cm	0.07-0.15	40
Colchones Reno 30 cm	0.07-0.15	40

Tabla 1.6 Fuerza tractiva permisible y coeficientes de rugosidad  $n$  con vegetación completamente desarrollada (Ref.12)

### 1.3 Concepto de gavión y colchón Reno

Los *gaviones* son estructuras en forma de caja prismática regular (Ref.13), fabricados con malla metálica de triple torsión, de diferentes tamaños y formas; reforzados en todas sus aristas con un alambre de calibre mayor al de las mallas; con celdas internas uniformemente repartidas e interconectadas con otras unidades similares, y que se llenan con piedras (de buena calidad) en el lugar de la obra para formar así una estructura flexible, permeable y monolítica.

Dentro de sus principales aplicaciones destacan los muros de contención, canalizaciones, vertederos en proyectos para control de erosión, espigones, escolleras y diques.

Las dimensiones de los gaviones son variables, pero generalmente tienen un ancho de 1 m, una altura que va de 0.5 a 1 m y una longitud de 1.5 a 4 m.

Una obra de gaviones no es una obra permanente, pero tampoco es una obra temporal. se habla de una vida útil de 25 años (Ref.13).

Los gaviones hechos a base de malla hexagonal están formados por una parte trasera, una tapa, dos extremos, una cara frontal y uno o varios diafragmas. Dichos elementos se pueden visualizar en la figura 1.5.

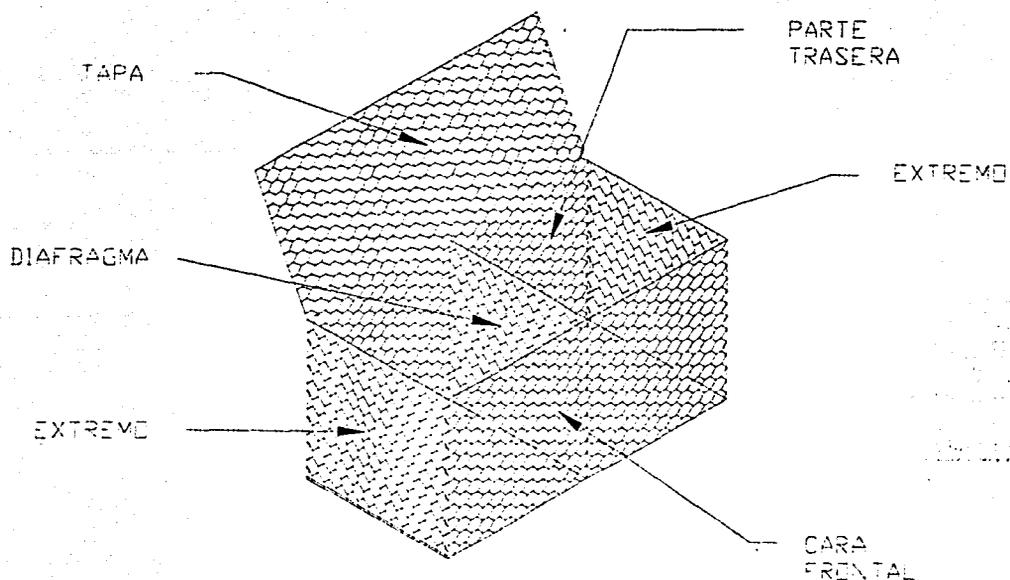


Figura 1.5 Elementos principales del gavión (Ref.13).

### Colchones Reno para revestimiento

Se entiende por *colchón Reno* como un contenedor de malla hexagonal a triple torsión, con celdas internas uniformemente repartidas y de altura relativamente pequeña en relación a las del gavión; tienen una altura inferior a los 50 centímetros de espesor, 1 metro de ancho y de 2 a 3 metros de largo. Estas dimensiones corresponden a las medidas estándar, aclarando que para cada caso las dimensiones varían de acuerdo a los requerimientos obtenidos del diseño del revestimiento (Ref.13). El nombre de *colchón* es por la forma muy similar a los colchones comerciales, solo que de roca y malla, y *Reno* por sus orígenes como se indicó en la parte primera de este trabajo.

Los colchones Reno están encaminados a utilizarse en revestimiento de canales ya sean naturales o artificiales. También se usan en la protección de playas contra la erosión provocada por el oleaje, canaletas y en protección de taludes en carreteras.

Tanto los gaviones como los colchones Reno, con objeto de facilitar el transporte, proceden de fábrica plegados, el llenado se hace lo más cerca de su posición final, como se describe en el capítulo 6. Estas estructuras tienen un peso específico de 1.7 a 1.8 Ton/m<sup>3</sup> dependiendo de la granulometría y tipo de roca (Ref.13).

Los colchones Reno y gaviones son dos conceptos diferentes, sus diferencias pueden asociarse al tamaño de sus componentes y al funcionamiento de la

estructura. En el primer caso los colchones Reno tiene un espesor reducido, mientras que los gaviones son estructuras de gran volumen, como se puede observar en las figuras 1.5 y 1.6. En el segundo caso, los colchones Reno protegen al suelo contra la erosión en el fondo y los taludes del canal, mientras que los gaviones son estructuras pesadas (trabajan por gravedad) encaminadas a la conducción, como puede ser un dique. Los gaviones que se utilizan para revestimiento de canales tienen taludes superiores a 1:2 llegando a ser incluso verticales. Para taludes menores se utilizan colchones Reno. Con el fin de facilitar su construcción las tapas de los colchones Reno vienen aparte enrolladas, mientras que en los gaviones toda la estructura se encuentra lista para ser armada en una sola pieza.

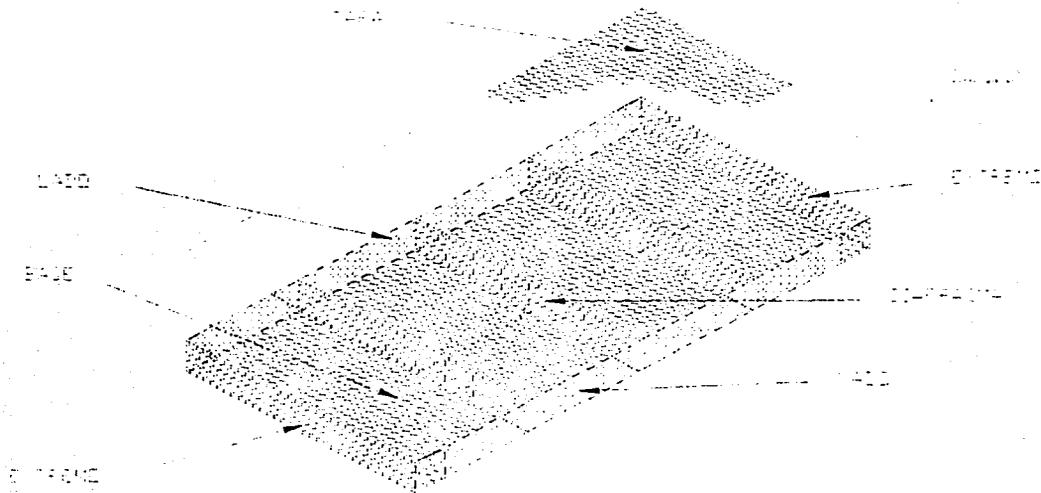


Figura 1.6. Elementos principales del colchón Reno (Ref.13).

En la fabricación de los colchones Reno y los gaviones se utilizan los siguientes elementos (en el capítulo 2 se describen algunas de sus características más importantes):

*Malla hexagonal de alambre a triple torsión.* Es una malla que es muy difícil de que se deshilvane, hecha a base de girar continuamente pares de alambre para dar tres torsiones y dar forma a las aberturas hexagonales, las cuales después se interconectan a alambres adyacentes, dando origen a las aberturas hexagonales.

*Alambre para refuerzo de aristas.* Alambre de terminación, que se usa para bordar la malla de alambre perpendicular a la torsión, envolviendo los alambres de la malla mecánicamente alrededor de éste, por lo menos 2.5 veces o insertando el mismo a través de las torsiones y doblando una sola abertura de malla.

*Alambre para aristas.* Alambre de terminación, que se usa para bordar la malla de alambre paralela a la torsión, tejiéndolo continuamente hacia la malla de alambre.

*Alambre de amarre, para gaviones y colchones Reno.* Alambre de acero con recubrimiento metálico o un alambre de acero con recubrimiento metálico revestido de PVC, que se usa para armar e interconectar unidades vacías, cerrar y asegurar unidades llenas de piedras y para atiesadores.

*Sujetadores para traslape para gaviones.* Es una alternativa al método de amarre con alambre, usada en operaciones de ligamiento para gaviones y colchones Reno.

*Atiesadores para gaviones.* Alambre de acero con recubrimiento metálico de acero o de acero con recubrimiento metálico revestido de PVC, que se usa para mantener el frente lo más recto posible; conectando el panel de la cara frontal con el panel de la cara trasera de un gavión aclarando que el atiesador debe formarse en el sitio de la obra, con alambre del mismo diámetro que el usado para los amarres.

Los gaviones y los colchones Reno para revestimiento fabricados con malla de alambre hexagonal a triple torsión (*Ref.13*), se pueden clasificar en base a su recubrimientos como: el tipo 1 se usa para aguas claras en canales, para aguas negras los tipos 2,3 y 4. Las características de cada tipo son:

- Tipo 1. Hechos de malla hexagonal de alambre a triple torsión. El alambre tiene un recubrimiento de zinc, el cual se aplica antes de hacer la torsión. Los sujetadores, el alambre para amarre y los atiesadores, se fabrican de alambre con recubrimiento de zinc.
- Tipo 2. Hechos de malla hexagonal a triple torsión de alambre. El alambre tiene un recubrimiento de Zn-5Al-MM (aleación de zinc con 5% de aluminio) el cual se aplica antes de hacer la torsión. Los sujetadores para traslape, el alambre para amarre y los atiesadores, se fabrican de alambre con recubrimiento de Zn-5Al-MM.
- Tipo 3. Son de malla hexagonal a triple torsión de alambre para amarre y de atiesadores como el tipo 1 y tienen un recubrimiento de PVC. Los sujetadores deben ser de alambre de acero inoxidable.
- Tipo 4 La malla hexagonal a triple torsión del alambre tiene un recubrimiento de aluminio el cual se aplica antes de hacer la torsión. Los sujetadores, el alambre para amarre y los atiesadores, se fabrican de alambre con recubrimiento de aluminio.

#### 1.4 Funciones y características de un revestimiento de un canal

En el capítulo 3 se muestran algunas formas de revestimiento utilizando diferentes materiales entre los que destacan los gaviones y colchones Reno. Algunas de las funciones y características de estos elementos son (Ref. 6, 15):

- Flexibilidad. Los colchones Reno y gaviones pueden por su flexibilidad absorber asentamientos sin perder su eficiencia, permaneciendo estructuralmente seguras, al contrario de las rígidas o semirrígidas que pueden ser destruidas aún por pequeños movimientos o socavaciones del terreno de apoyo. Las estructuras flexibles pueden adaptarse incluso a grandes movimientos sin que se perjudique la estructura.
- Permeabilidad. Los gaviones y los colchones Reno son altamente permeables y actúan como drenes permitiendo el escurrimiento de las aguas de filtración, eliminando de este modo los efectos de la presión hidrostática.
- Adaptación al ambiente. Las estructuras en colchones reno y gaviones tienen la característica fundamental de ser drenantes, permitiendo el paso del agua que al filtrarse alimenta la capa freática dando vida a los terrenos circundantes.

Después de poco tiempo las estructuras son cubiertas por la vegetación y por los fenómenos de filtración y sedimentación del transporte de material que llegan a almacenarse en el terrenos colindantes, reconstituyendo el paisaje preexistente (Fig.1.7 y 1.8). Este aspecto no solo influye en las características de resistencia de la obra sino favorece el desarrollo de la flora y de la fauna fluvial, restableciendo el equilibrio del ecosistema. En caso de que se quiera acelerar este proceso natural de integración en un revestimiento de colchones Reno o en una estructura en gaviones, es posible colmatar los huecos del relleno con tierra vegetal y sembrar o plantar especies de crecimiento rápido.

- Rugosidad predeterminada. El seleccionar un valor de rugosidad significa estimar la resistencia al flujo en un canal determinado. Para el caso de revestimientos realizados mediante colchones Reno y gaviones se pueden utilizar valores experimentalmente obtenidos, los cuales son de gran utilidad para el diseño de cauces revestidos.
- Aplicación en presencia de agua. Cuando las profundidades son grandes los colchones Reno pueden ser ensamblados y llenados en tierra y posteriormente ser colocados en el lugar previamente establecido con la ayuda de equipos, como puede ser una grúa.

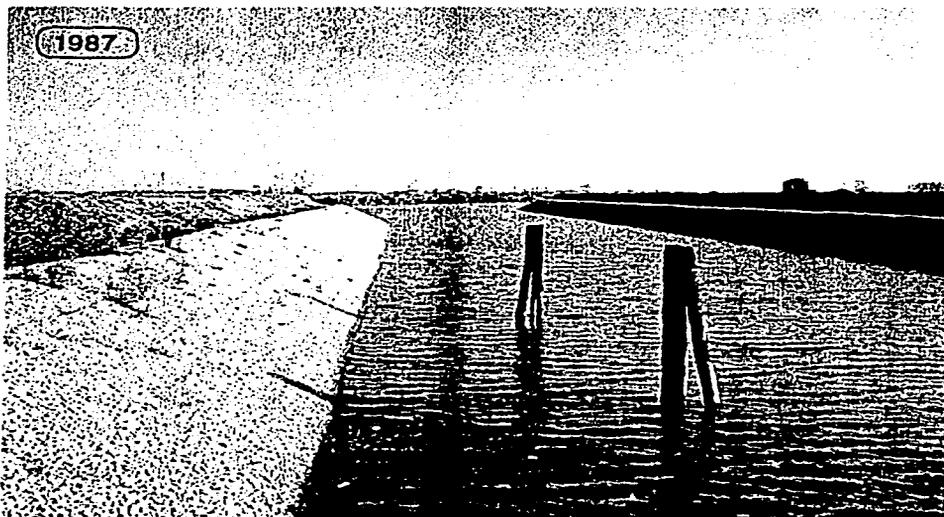


Fig. 1.7 Revestimiento en colchones Reno del canal Fissero-Tartaro, Italia (Ref. 6)



Fig.1.8 A distancia de un solo año, la obra presenta una integración casi perfecta al ambiente (Ref. 6).

- Rápidas de construir. Los gaviones y colchones Reno son estructuras de fácil y simple ejecución, no requieren mano de obra calificada para su armado y llenado. Al utilizar solo una red y piedras permiten rapidez de ejecución y posibilidad de trabajo aún en condiciones meteorológicas adversas, o en presencia de pequeños tirantes de agua.
- Las obras entran inmediatamente en función aún si están parcialmente terminadas, permitiendo la realización de la estructura en etapas y la eventual modificación sucesiva de sus dimensiones.
- Monolíticas. Las obras en colchones Reno por su peso propio y su carácter monolítico son capaces de resistir los empujes del terreno. Los revestimientos en colchones Reno, por ser estructuras continuas, logran absorber acentuadas erosiones protegiendo los terrenos que recubren.
- Larga duración. Es muy importante que la obra cumpla con el tiempo para el cual fue diseñada.
- La fuerte galvanización asegura la protección del alambre por muchos años en condiciones ambientales normales. El recubrimiento en PVC del alambre fuertemente galvanizado ofrece a su vez una protección efectiva aún en ambientes contaminados o agresivos. Los colchones Reno y los gaviones se ven favorecidos por la sedimentación que llena sus vacíos y por el "enraizamiento" de la vegetación como puede ser pasto y otras plantas de tamaño menor, aumentando su eficiencia con el paso del tiempo.
- Económicas. En todo proyecto de ingeniería el costo es un aspecto muy importante. Las estructuras hechas a base colchones reno y gaviones resultan ser una buena opción, siempre y cuando las condiciones geográficas sean favorables, es decir que existan rocas que cumplan con las especificaciones establecidas.

### 1.5 Secciones más frecuentes de revestimiento

Un canal construido con una sección transversal invariable y una pendiente de fondo constante se conoce como canal prismático. De otra manera, el canal es no prismático (*Ref.8*). Durante el desarrollo de este trabajo los canales descritos serán prismáticos. En el caso de los canales naturales, para realizar el análisis a lo largo del canal, se divide el canal en tramos que tengan la forma más o menos de canales prismáticos y así bajo esta hipótesis realizar su análisis.

El término *sección de un cauce* utilizado en esta tesis se refiere a la sección transversal del canal tomada en forma perpendicular a la dirección del flujo. Una *sección vertical de un canal*, sin embargo, es la sección vertical que pasa a través del

punto más bajo de la sección del canal. Para canales horizontales, por consiguiente, la sección del canal es siempre una sección vertical de canal.

Las secciones de los canales naturales son, por lo general, muy irregulares. Para cauces sujetos a avenidas frecuentes, el canal puede constar de una sección principal del canal que conduce caudales normales y uno, o más secciones laterales de canal para las avenidas o de desborde.

Para poder realizar un diseño de un canal a menudo se consideran secciones de figuras geométricas regulares. El trapecio es la sección más común para canales debido a que prevé pendientes necesarias para la estabilidad. Además su proceso constructivo y mantenimiento es más sencillo (Ref.4).

Se puede decir que las formas son el proceso de integración natural de los mismos, debido al intercambio con las capas freáticas y al crecimiento de la vegetación. En canales revestidos suele utilizarse un filtro hecho de material granular o un geotextil el cual es un material sintético permeable. Estos conceptos se describen en los puntos 3.2 y 3.3 del capítulo 3.

Dentro de las tipologías más frecuentes de revestimiento en colchones Reno y gaviones se encuentran las siguientes:

- Sección trapecial con revestimiento en las orillas,
- Sección trapecial con revestimiento completo,
- Sección de doble trapecio con revestimiento de espesor variable,
- Defensa longitudinal en gaviones,
- Defensa longitudinal con sistema Terramesh.

Las secciones más frecuentes de revestimiento mediante colchones Reno y gaviones pueden ser muy variadas las cuales dependerán de las condiciones geológicas propias del terreno, de la eficiencia, rapidez de construcción y costo. Estas secciones pueden ser trapecial y trapecial compuesta; hechas a base de colchones Reno, mientras que para gaviones se tienen las secciones rectangulares y rectangulares compuestas. Pueden aparecer secciones de canal donde sea necesario el uso de los colchones Reno y de los gaviones dichas secciones serán mixtas como se muestra 1.9.

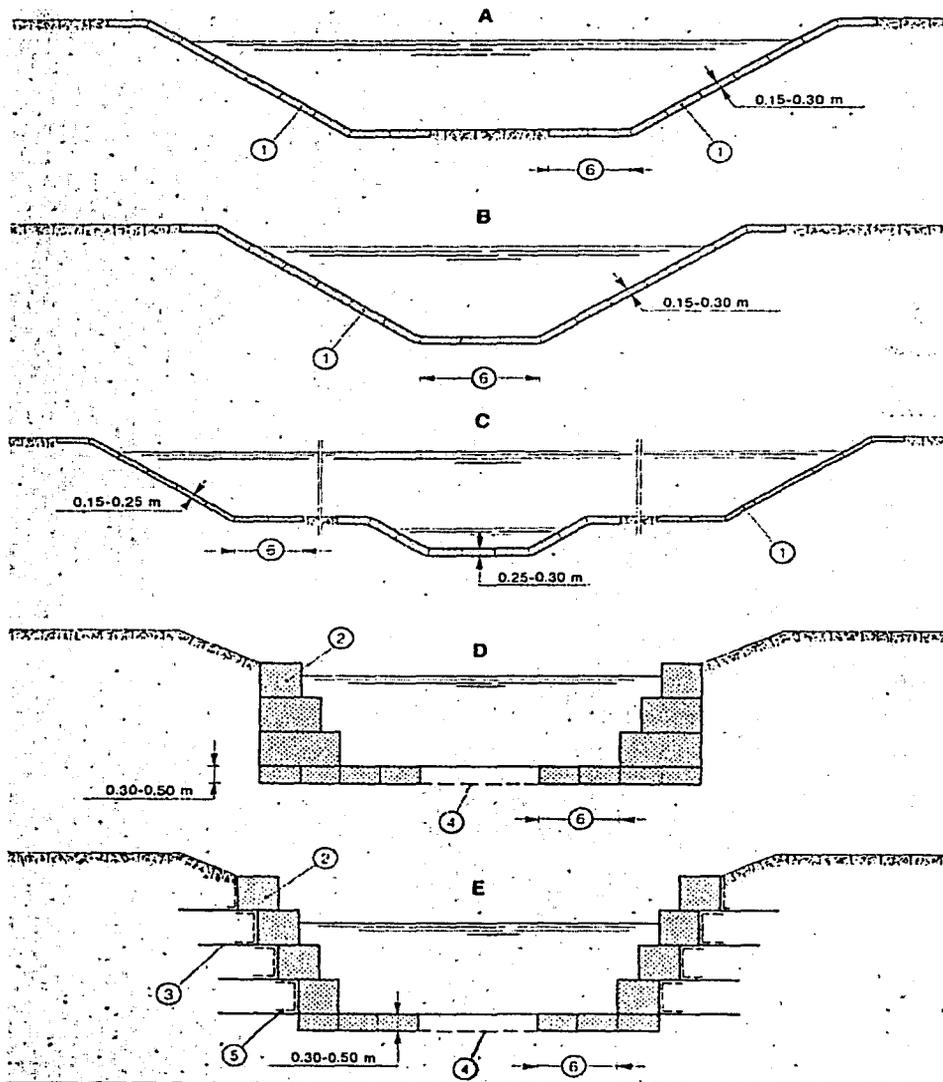


Fig.1.9 Tipologías más frecuentes de revestimiento mediante colchones Reno y gaviones (Ref.6). 1 Colchón Reno, 2 Gavión, 3 Red metálica, 4 Eventual revestimiento de fondo, 5 Geotextil, 6 Largo variable.

2

## ESPECIFICACIONES

A continuación se establecen los requisitos que deben cumplir los gaviones, colchones y mallas fabricadas a partir de malla hexagonal de triple torsión de alambre, con recubrimiento metálico o con recubrimiento metálico revestido de cloruro de polivinilo (PVC). Así como los alambres con recubrimiento metálico o con recubrimiento metálico revestido de PVC, para los amarres, atiesadores y sujetadores para traslape empleados para la fabricación, ensamble e instalación del producto (Ref. 13).

La malla de alambre hexagonal de triple torsión, usada para fabricar gaviones y colchones Reno para revestimiento, se produce en diferentes formas, basados en el tipo de recubrimiento.

### 2.1 Medidas estándar

Los gaviones deben fabricarse con malla tipo 8 X 10, teniendo la malla una abertura nominal de 83 por 114 mm (3.25 por 4.5 pulgadas). Las dimensiones se obtienen tomando las medidas en ángulos rectos hacia el eje central de la abertura de la malla ( $D = 83$  mm, ver figura 2.1 y tabla 2.1), paralelos a la torsión y a lo largo del mismo eje.

Los colchones Reno para revestimiento deben fabricarse con malla tipo 5 x 7 ó malla tipo 6 x 8, teniendo la malla una abertura nominal de 53 por 74 mm ó 64 por 83 mm (2.1 x 2.91 ó 2.5 x 3.25 pulgadas). Las dimensiones se obtienen tomando las medidas en ángulos rectos hacia el eje central de la abertura de la malla ( $D = 53$  ó 64 mm, ver figura 2.1), paralelos a la torsión y a lo largo del mismo eje.

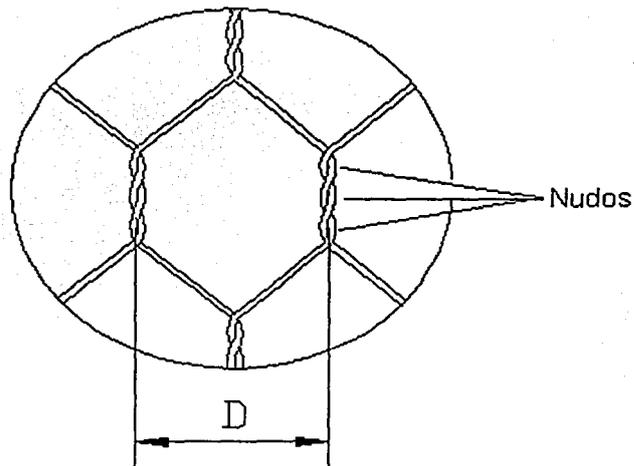
El ancho y la longitud de un gavión, en la condición de tal y como se fabricó, no deben diferir más del  $\pm 5\%$  del tamaño ordenado antes de ser llenado (Los tamaños típicos de los gaviones se muestran en la Tabla 2.2).

El ancho y la longitud de un colchón Reno para revestimiento en la condición de tal y como se fabricó, no debe diferir más del  $\pm 5\%$ , y la altura no debe diferir más de  $\pm 10\%$  del tamaño ordenado antes de su llenado. (Los tamaños típicos de los colchones para revestimiento se muestran en las Tabla 2.3).

*Tolerancias en las aberturas de la malla.* Las tolerancias en las aberturas de la malla hexagonal de triple torsión, no deben exceder más de  $\pm 10\%$  de la dimensión nominal "D" que se muestra a continuación, ver figura 2.1.

Tipo de malla	Dimensión nominal para valores de "D"
5 x 7	53 mm (2.09 pulgadas)
6 x 8	64 mm (2.50 pulgadas)
8 x 10	83 mm (3.25 pulgadas)

Tabla 2.1 Clase de malla comercial

Fig. 2.1 Dimensión nominal "D" de la abertura de la malla de alambre  
NMX-B-085-SCFI-1999 (Ref. 13).

A continuación se muestran las medidas estándar de los colchones Reno y de los gaviones, de acuerdo con las normas Circ. Del Cons. Sup. LL. PP. n 2078 del 27/8/1962, en la British Standard 443-1982 y en las ASTM 641-32 class 3 soft, en las Afnor NF A 91-131 clase C (Ref.16).

longitud m	ancho m	altura m	celdas m	volumen m <sup>3</sup>
4.00	2.00	0.17	4	1.36
5.00	2.00	0.17	2	0.17
6.00	2.00	0.17	2	0.17
4.00	2.00	0.23	4	1.84
5.00	2.00	0.23	5	2.30
6.00	2.00	0.23	6	2.76
4.00	2.00	0.30	4	2.40
5.00	2.00	0.30	5	3.00
6.00	2.00	0.30	6	3.60

Tabla 2.2. Medidas estándar del colchón Reno para revestimiento de cauces

longitud m	ancho m	altura m	diafragmas n	volumen m <sup>3</sup>
1.50	1.00	1.00	----	1.50
2.00	1.00	1.00	1	2.00
3.00	1.00	1.00	2	3.00
4.00	1.00	1.00	3	4.00
1.50	1.00	0.50	----	0.75
2.00	1.00	0.50	1	1.00
3.00	1.00	0.50	2	1.50
4.00	1.00	0.50	3	2.00

Tabla 2.3 Medidas estándar para gaviones en las canalizaciones

## 2.2 Alambre galvanizado tipo III

### 2.2.1 Materiales y su fabricación

El alambre usado para la fabricación de malla hexagonal de triple torsión, para usarse en gaviones y colchones Reno para revestimiento, deben cumplir con lo especificado en los siguientes párrafos o lo que sea apropiado para el tipo ordenado, excepto que la resistencia a la tensión debe ser conforme a lo indicado en el apartado 2.2.2.

- El tipo 1, malla hexagonal de triple torsión, debe de fabricarse de alambre de acero con recubrimiento de zinc, conforme a lo especificado en la norma que se indica en el apéndice A1.1, para el recubrimiento clase 3 en condición de revenido.
- El tipo 2, malla hexagonal de triple torsión, debe fabricarse de alambre de acero con recubrimiento de Zn-5Al-MM, conforme a lo especificado en la norma extranjera que se indica en el apéndice A1.2, para el recubrimiento Clase 80 en condición de revenido.
- El alambre de amarre y los atiesadores deben fabricarse de alambre de acero que tenga el mismo material de recubrimiento al de la malla hexagonal de triple torsión, suministrada en el pedido y conforme a lo especificado en las

normas que se indican en los apéndices A1.1, A1.2 ó A1.3, con una resistencia a la tensión conforme a lo especificado en el apartado 2.2.2.

- Los sujetadores para traslape fabricados de alambre de acero con recubrimiento de zinc y de alambre de acero con recubrimiento de aleación zinc-5% aluminio, deben ser conforme a lo especificado en la norma extranjera que se indica en el apéndice A1.4, para los tipos A, B, o C, de la Clase 3 y con una resistencia a la tensión especificada en el apartado 2.2.2. Los sujetadores fabricados de acero inoxidable deben ser conforme a lo especificado en la norma extranjera que se indica en el apéndice A1.5, para el tipo 302 y con una resistencia a la tensión especificada en el apartado 2.2.2.
- Los gaviones y colchones para revestimiento deben fabricarse con todos sus componentes conectados mecánicamente en las instalaciones del fabricante, con excepción de las tapas de los colchones, las cuales se producen por separado de la base. Los gaviones y los colchones para revestimiento (ver tablas 2.2 y 2.3) deben suministrarse en forma plegada, ya sea doblados en pacas o en rollos para poder embarcarse.

### 2.2.2 Propiedades mecánicas

#### *Resistencia a la tensión*

- La resistencia a la tensión de la malla hexagonal de triple torsión, el alambre para amarre y los atiesadores, debe ser conforme a lo especificado en las normas extranjeras que se indican en los apéndices A1.1, A1.2, y A1.3 para alambre en la condición de revenido, cuando se pruebe conforme a lo especificado en la norma mexicana NMX-B-172.
- Sujetadores para traslape. La resistencia a la tensión del alambre de acero con recubrimiento de zinc, el alambre de acero con recubrimiento de zinc-5% aluminio y el alambre de acero con recubrimiento de aluminio para sujetadores, debe ser conforme lo especificado en la norma extranjera que se indica en el apéndice A1.4 tipo A, B, y C. La resistencia a la tensión del alambre de acero inoxidable, usado para sujetadores, debe ser conforme a lo especificado en la norma extranjera que se indica en el apéndice A1.5 tipo 302, tabla 2.4. Cualquier sistema de sujeción, debe proporcionar el número de sujetadores para traslape requeridos para cumplir con lo indicado en la tabla 2.4, conforme a la prueba de resistencia al desprendimiento (ver 2.2.10 métodos de prueba). El fabricante debe establecer el número de sujetadores para traslapes requeridos para todas las conexiones verticales y horizontales para las uniones de una sola canasta o canastas múltiples, y debe incluir las instrucciones adecuadas de como instalar los sujetadores para traslape incluyendo dibujos o fotografías.

- Resistencia en la unión de malla y panel con panel. La resistencia mínima de la malla, el alambre para aristas en conexiones de malla, las conexiones panel con panel y la prueba de punzonamiento, debe probarse conforme a lo especificado en 2.2.10 métodos de prueba.

Descripción de la prueba	gaviones (Ton/m)	colchones (Ton/m)
Paralelo a la torsión	4.00	3.20
Perpendicular a la torsión	2.00	1.30
Conexión a las aristas	1.70	1.00
Conexión panel con panel, usando alambre para amarre o sujetadores para traslape	1.70	1.00
Prueba de punzonamiento, en KN (libras fuerza)	2.31 (5300)	1.74 (4000)

Tabla 2.4 resistencia a tensión de la malla para gaviones y colchones Reno

### Propiedades físicas

Recubrimiento metálico (ver tabla 2.5). La masa del recubrimiento debe cumplir con lo especificado en la norma extranjera que se indica en el apéndice A1.1, Clase 80 para el recubrimiento de zinc o con la norma extranjera que se indica en el apéndice A1.2, Clase 80 para el recubrimiento de Zn-5Al-MM o con la norma extranjera que se indica en el apéndice A1.3, para el recubrimiento de aluminio.

Resistencia a la niebla salina, para sujetadores. Después de la prueba conforme a lo especificado en la prueba de la cámara de niebla salina, los sujetadores para traslape, las aristas reforzadas o el alambre de la malla confinada por los sujetadores para traslape, éstos no deben mostrar puntos de oxidación en ninguna de sus partes de la superficie, excluyendo los extremos cortados.

### 2.2.4 Dimensiones y tolerancias

- El diámetro del alambre con recubrimiento metálico debe cumplir con lo especificado en la tabla 2.5 y con las tolerancias especificadas en las normas extranjeras que se indican en los apéndices A1.1, A1.2, y A1.3, la que sea aplicable.
- El diámetro de un alambre con recubrimiento metálico y el de un alambre de acero inoxidable, usado para la fabricación de sujetadores, debe ser conforme

a lo especificado en la tabla 2.5 con las tolerancias especificadas en la norma extranjera que se indica en el apéndice A1.4.

tipo de malla, recubrimiento  características	gavión		colchón reno			
	8 x 10		6 x 8		5 x 7	
	metálico	PVC	metálico	PVC	metálico	PVC
Alambre de malla	83 x 114	83 x 114	64 x 83	64 x 83	53 x 74	53 x 74
Alambre de malla	2.7	2.7	2.2	2.2	2.2	2.2
Alambre para aristas de refuerzo	3.4	3.4	2.7	2.7	2.7	2.7
Alambre para amarre	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2
Sujetadores para traslape	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0 (2)
Atiesadores. Utilizando alambre para amarre	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2
Espesor del revestimiento de PVC:						
Normal	N/A	0.50	N/A	0.50	N/A	0.50
mínimo	N/A	0.38	N/A	0.38	N/A	0.38

Tabla 2.5 Recubrimiento para diferentes tipos de malla y sus componentes(Ref.9).  
Dimensiones en mm.

### 2.2.5 Inspección

A menos que se indique otra cosa en la orden de compra, el fabricante es el responsable de realizar la inspección y pruebas especificadas en esta norma. A opción del fabricante, éste debe usar sus propias o cualquier otra instalación para efectuar las pruebas e inspección a menos que el comprador no lo apruebe en la orden de compra. El comprador, bajo su propio costo, puede realizar cualquier inspección y pruebas especificadas en esta norma, cuando lo considere necesario para asegurarse que el material cumple lo especificado.

### 2.2.6 Certificado

Cuando se especifique en la orden de compra, el fabricante debe proporcionarle al comprador un certificado de que el material cumple con lo especificado en esta norma.

### 2.2.7 Ejecución del trabajo

Cuando se fabrique alambre del grado y calidad apropiada, como se especifica en esta norma, debe dar como resultado un producto fuerte y utilizable para el tipo de malla, la cual debe tener aberturas substancialmente uniformes. Debe fabricarse y tener un buen acabado. Esto se determina mediante inspección visual, y según lo especificado en esta norma.

### 2.2.8 Muestreo

- Las muestras para determinar las propiedades físicas y mecánicas de la malla de alambre de triple torsión deben ser conforme a lo especificado en la capítulo 2.2.10.
- Las muestras para determinar las propiedades físicas y mecánicas del alambre de acero con recubrimiento empleado para la malla, alambre para amarre y atiesadores, deben de seleccionarse al azar de los rollos de alambre usados para su fabricación.

### 2.2.9 Número de pruebas

Deben realizarse un mínimo de tres pruebas para cada una de las siguientes propiedades: resistencia de la malla de alambre de acero con recubrimiento metálico paralela a la torsión, perpendicular a la torsión, conexión de la malla de alambre de acero a las aristas, y la prueba de punzonamiento. Se requiere de una repetición de prueba para la resistencia y para la prueba en las conexiones, anteriormente mencionadas, cuando ocurran cambios en las características físicas de los productos de malla. Los resultados de las tres pruebas deben cumplir con lo especificado en la tabla 2.4.

La resistencia a la tensión, la masa del recubrimiento metálico y el espesor del recubrimiento de PVC en el alambre de acero con recubrimiento metálico usado en la fabricación de la malla, alambre para amarre, atiesadores y sujetadores, deben de certificarse por los fabricantes del alambre de acero para dar cumplimiento a lo especificado en las secciones 2.2.1, 2.2.2 y tabla 2.5, para cada uno de los lotes para embarcarse a las instalaciones de los fabricantes de gaviones.

### 2.2.10 Métodos de prueba

#### *Propiedades mecánicas*

- Resistencia a la Tensión.- Las probetas de la malla de alambre, deben ser representativos de las utilizadas en el campo de construcción, así como de los materiales, geometría de la malla y de la ejecución del trabajo y deben ser lo suficientemente grandes, como sea práctico para minimizar los efectos de variación. El ancho de la probeta no debe ser menor de siete veces la abertura

de la malla, ni la longitud debe ser menor de catorce veces la abertura de la malla. Las pruebas deben efectuarse con la carga aplicada paralela a los ejes de la torsión y repetirse por separado en una probeta con la carga aplicada perpendicularmente al eje de la torsión.

El aparato debe sujetar al alambre, de tal manera que permita que la falla ocurra por lo menos a una distancia igual a una abertura de malla de los puntos de sujeción. Si una falla ocurre en un alambre, y ésta conduce directamente al punto de sujeción, debe descartarse esa probeta y no debe incluirse en el informe de pruebas.

Insertar el alambre en las mordazas de la máquina de prueba. El sistema de sujeción debe ser ajustable y libre de deslizamientos axiales de tal manera que los alambres sujetos mantengan la geometría de la malla, similar a la que se usa en campo, los alambres deben fijarse de tal manera que se eliminen las fallas en las mordazas. Las mordazas pueden dejarse sueltas hasta que se aplique la precarga, para permitir que los alambres se ajusten. Luego debe aplicarse la carga a una velocidad uniforme que no exceda el 50% ni el 3% de la resistencia última por segundo de la malla (ver tabla 2.4). La carga debe tomarse inicialmente como una precarga del 20% de la resistencia mínima especificada y debe pararse el viaje del cabezal de la máquina. Las dimensiones de la malla deben anotarse en ese momento y tomarse como las dimensiones iniciales de la probeta, cuando tales dimensiones son requeridas. Después debe continuarse con la aplicación de la carga uniformemente con incrementos del 10% de la resistencia mínima especificada hasta que ocurra la primera fractura o un alambre en el sistema se suelte. Puede pararse el viaje del cabezal de la máquina, en cada incremento de carga o cuando ocurra un incidente de la falla del alambre, con el fin de anotar la información pertinente tal como: carga, tipo de fractura, geometría resultante de la malla y alargamiento así como la reducción en el diámetro del alambre.

La distorsión de la malla o cambios en longitud deben medirse con exactitud y redondearse al 0.5% más cercano en el porcentaje de alargamiento. Los resultados de las pruebas deben ser de acuerdo con los requisitos mostrados en la tabla 2.4.

- Prueba al desprendimiento.- Deben montarse un juego de paneles unidos, los cuales se preparan por el mismo método que se especifica para la prueba de cámara salina pero sin someterlo a la exposición de 48 horas en la cámara salina, a una máquina de tensión con mordazas que sujeten firmemente a los paneles a todo lo ancho. Las mordazas deben diseñarse para que únicamente transmitan fuerzas de tensión. La carga debe aplicarse a una velocidad uniforme que no exceda 220 N/s [(50 libras/s) ó (22 kg/s)], hasta que ocurra la falla, se define cuando se alcance la carga máxima y se observe una caída en la resistencia con las subsecuentes cargas o cuando la abertura entre los dos alambres de las aristas más cercanos, aplicable a un sujetador confinando ya

sea a dos o a cuatro alambres para aristas, sea mayor de 50 mm (2 pulgadas) en cualquier lugar a lo largo del ancho del panel. La resistencia de los paneles unidos al momento de la falla debe ser la que se indica en la tabla 2.4.

- Prueba de cámara de niebla salina.- Deben unirse entre sí dos paneles iguales para gavión, cada uno con un ancho de 10.5 veces la abertura de la malla a lo largo del alambre para arista, con la instalación adecuada de sujetadores para traslape de alambre a lo largo de las dos aristas, para que así cada uno de los sujetadores para traslape confinen dos de las aristas y dos alambres de malla. Un sujetador adecuadamente instalado debe reunir los siguientes requisitos: cada sujetador de tipo traslape, debe estar cerrado y los extremos libres del sujetador, deben traslaparse como mínimo 25.4 mm. (1 pulgada). El par de paneles unidos, debe someterse a la prueba de cámara niebla salina, conforme a la norma extranjera que se indica en el apéndice A1.11, por un periodo no menor de 48 horas  $\pm$  1 hora duración del ciclo.
- Prueba de punzonamiento.- Una sección sin cortes de 1,82 m (6 pies) de longitud (sin refuerzo en las aristas) y no menor de 0.91 m (3 pies) de ancho (con aristas reforzadas), incluyendo todas las conexiones en las aristas reforzadas, deben tener los extremos firmemente sujetos 0.91 m (3 pies) a lo largo del ancho de la muestra. Cuando el ancho de la sección a probarse excede de 0.91 m (3 pies), las mordazas deben centrarse a lo largo del ancho, permitiendo así que el ancho excedente caiga libremente en ambos lados de la sección sujeta. La muestra debe someterse a una fuerza de tensión lo suficiente para causar el 10% de alargamiento de la sección de la muestra que está entre las mordazas. Después del alargamiento y durante la sujeción de la muestra, como se describió anteriormente (o de otra manera sin soporte), la sección debe someterse a una carga, aplicada a una área de 900 cm<sup>2</sup> (1 pie<sup>2</sup>), la cual debe estar aproximadamente al centro de la sección de la muestra entre las mordazas y perpendicular a la dirección de la fuerza de tensión. La muestra debe soportar, sin rupturas en cualquiera de sus alambres o de aberturas en cualquiera de los sujetadores de la malla, una carga real aplicada mediante un martinete circular a una velocidad como la indicada en 9.1.2 igualando o excediendo los valores que se indican en la tabla 2.4. La cabeza del martinete utilizada en la prueba debe ser circular con un diámetro de 305 mm (12 pulgadas) y debe tener las orillas biseladas o redondeadas para prevenir cortes en los alambres.

#### *Masa del recubrimiento metálico*

La masa del recubrimiento debe determinarse conforme a lo especificado en la norma mexicana NMX-H-014 o conforme a la norma extranjera que se indica en el apéndice A1.14 ó A1.15.

## 2.3 alambre galvanizado tipo III recubierto con PVC

### 2.3.1. Materiales y su fabricación

- El tipo 3, malla hexagonal de triple torsión, debe fabricarse, del mismo tipo de alambre de acero con recubrimiento metálico que el tipo 1, con un recubrimiento adicional de PVC extruido sobre el alambre de acero con recubrimiento metálico.
- Se permiten los polímeros termoplásticos o modificados así como sus métodos de aplicación, como sustitutos al recubrimiento de PVC, siempre y cuando su funcionamiento sea equivalente a los requisitos de funcionamiento del recubrimiento de PVC.

### 2.3.2. Propiedades físicas

#### Recubrimiento de PVC.

Las propiedades iniciales del recubrimiento de PVC deben cumplir los siguientes requisitos:

- Gravedad específica.- Debe ser de 1.30 a 1.35 cuando se pruebe conforme a lo especificado en la norma extranjera que se indica en el apéndice A1.6.
- Resistencia a la tensión.- Debe ser igual o mayor de 20.6 MPa [(2 Kgf/mm<sup>2</sup>) (2985 psi)], cuando se pruebe conforme a lo especificado en la norma extranjera que se indica en el apéndice A1.7.
- Módulo de elasticidad.- Debe ser igual o mayor de 18.6 MPa [(2 Kgf/mm<sup>2</sup>) ó (2700 psi)], cuando se pruebe conforme a lo especificado en la norma extranjera que se indica en el apéndice A1.7.
- Dureza.- Debe tener una dureza Shore de 50 a 60, cuando se pruebe conforme a lo especificado en la norma extranjera que se indica en el apéndice A1.8.
- Temperaturas de fragilización.- Debe ser igual o menor de 264 K (-9 °C), o una temperaturas más baja cuando lo especifique el comprador, cuando se pruebe conforme a lo especificado en la norma extranjera que se indica en el apéndice A1.9.
- Resistencia a la abrasión.- El porcentaje de pérdida de masa debe ser menor de 12%, cuando se pruebe conforme a lo especificado en la norma extranjera que se indica en el apéndice A1.10.

### Exposición en cámara de niebla salina y exposición a la luz ultravioleta

- El PVC no debe mostrar efectos de exposición después de 30 horas en la cámara de niebla salina, cuando se pruebe conforme a lo especificado en la norma extranjera que se indica en el apéndice A1.11.
- El PVC no debe mostrar efectos de exposición a la luz ultravioleta después de 30 horas, cuando se use el aparato tipo E y 336 K° (63 °C), cuando se pruebe conforme a lo especificado en las normas extranjeras que se indica en los apéndices A1.12 y A1.13.

### Evaluación del recubrimiento después de la cámara de niebla salina y de exposición a la luz ultravioleta

- Después de la prueba de cámara de niebla salina y de la exposición a la luz ultravioleta, el recubrimiento de PVC no debe mostrar grietas ni cambio notable de color, burbujas o desgarros. Además gravedad específica, resistencia a la tensión, dureza y resistencia a la abrasión, no deben tener cambios mayores de 6%, 25%, 10%, y 10% respectivamente de sus valores iniciales.
- El recubrimiento de PVC no debe mostrar grietas o fracturas después de que los alambres se hayan torcido para la fabricación de la malla.

### 2.3.3 Dimensiones y tolerancias

El espesor mínimo y el nominal del recubrimiento de PVC uniformemente aplicado deben ser los que se indican en la tabla 2.5.

#### Espesor del recubrimiento de PVC

- El espesor del recubrimiento de PVC debe determinarse en una pieza, de un alambre removido de una malla, seleccionada al azar.
- Debe medirse con un micrómetro el diámetro del alambre de acero con recubrimiento metálico y con recubrimiento de PVC. Determinar el espesor del recubrimiento de PVC desprendiendo el recubrimiento de PVC del alambre y medir el diámetro resultante con un micrómetro. El espesor del recubrimiento es la diferencia entre el diámetro del alambre de acero con recubrimiento metálico y con recubrimiento de PVC y el diámetro medido del alambre con recubrimiento metálico, dividido entre dos. Este valor debe ser el indicado en la tabla 2.5. Cuando se desprenda el recubrimiento de PVC, debe tenerse cuidado de no desprender superficie metálica.

Lo correspondiente a la inspección, certificación, ejecución del trabajo, muestreo, número de pruebas, métodos de prueba y masa de recubrimiento metálico las normas correspondientes son las mismas a los alambres galvanizados. Esta norma no concuerda con ninguna norma internacional por no existir referencia en el momento de su elaboración.

#### BIBLIOGRAFÍA

- ASTM A 975-1997 Standard specification for double-twisted hexagonal mesh gabions and reconstituted mattresses (metallic-coated steel wire or metallic-coated steel wire with poly vinyl chloride (PVC) coating).
- NMX-B-172 Métodos de prueba mecánicos para productos de acero. Declaratoria de vigencia 11 de julio de 1988
- NMX-H-014 Método de prueba para determinar la masa del recubrimiento de zinc en artículos de hierro o acero galvanizado

3

## FORMAS DE REVESTIMIENTO

Es necesario revestir los canales con problemas serios, sea en toda su extensión o en tramos, en toda la sección transversal o solo en taludes; o en su caso, sustituir un canal existente por uno nuevo diseñado para revestirse. Todas estas acciones estarán en función de los costos de la obra y beneficios que entraña dicho revestimiento.

Debe señalarse que ninguna de las formas de revestir usando: gaviones y colchones Reno, colchón Reno y membranas y, el sistema colchón Reno almaciga bituminosa, que se mencionan a continuación, se recomienda para todas las condiciones y circunstancias que se presenten. La decisión al respecto, debe ser responsabilidad del diseñador, conjuntamente con la organización a cargo de la operación y mantenimiento de las obras, previéndose la necesaria determinación del valor futuro de las tierras servidas o protegidas con las obras nuevas en caso de apertura de una zona o sustitución de obras existentes y con las obras mejoradas cuando éste sea el caso.

### 3.1 Revestimientos realizados en seco

Generalmente este tipo de trabajos se hacen en canales artificiales nuevos, o en aquellos cauces que en épocas de estiaje presentan tirantes de agua muy bajos, realizándose los trabajos directamente en el sitio.

#### 3.1.1 Aspectos relacionados con las características geotécnicas.

Los revestimientos en colchones Reno y gaviones se apoyan directamente sobre el terreno que deben proteger (Fig. 3.1); es necesario, por lo tanto, que el terreno sea suficientemente estable y que su inclinación no produzca deslizamiento del revestimiento.



Fig. 3.1 Ubicación de los colchones Reno sobre el suelo

Generalmente, los revestimientos se ubican sobre el fondo transversalmente con respecto al curso de agua (Ref.6), es decir, perpendicularmente a la corriente y los taludes se orientan siguiendo la dirección de la corriente, como se muestra en la figura 3.2.

Los taludes de apoyo se construyen con una inclinación de 1:1.5 a 1:2, según la naturaleza del terreno, reservando la pendiente máxima para los terrenos vegetales de mediana consistencia y la mínima para los terrenos arenosos sueltos.

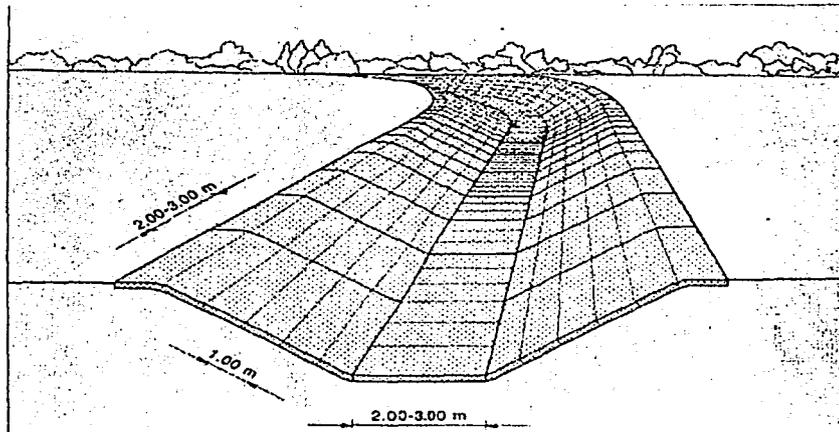


Fig. 3. 2 Revestimiento total del canal

Aguas arriba y aguas abajo del revestimiento se aconseja predisponer un "diente de gaviones caja" ya sea escalonado o continuo bien empotrado en el talud como se muestra en la figura 3.3 y 3.4 (Ref.6), que elimine el riesgo de rodeo.

Cuando el terreno de desplante está formado por gravas y arenas limpias, su resistencia al corte puede estimarse aproximadamente, correlacionándola con la granulometría y la compacidad relativa de esos suelos.

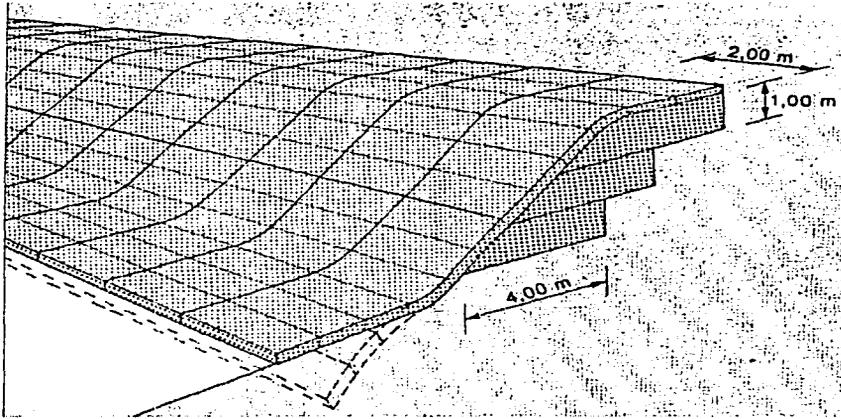


Fig. 3.3 Ejemplo de empotramiento escalonado realizado en obra, mediante gaviones

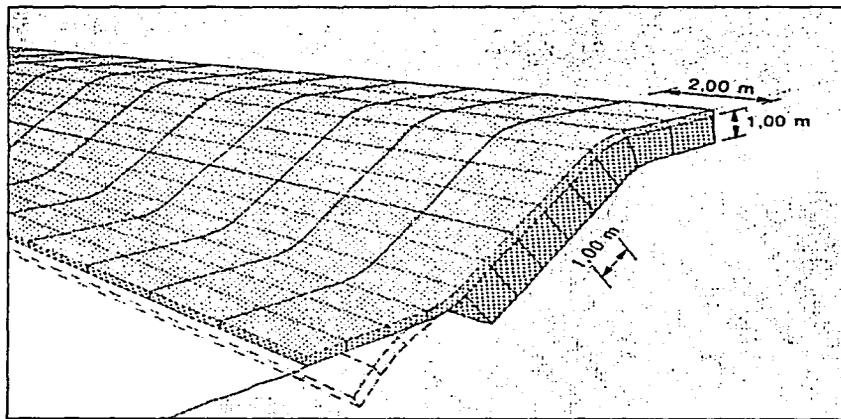


Fig. 3.4 Ejemplo de empotramiento continuo realizado en obra, mediante gaviones

Existen varios criterios para clasificar las partículas por su tamaño. En el caso de sedimentos en ríos, el más común es la clasificación por la American Geophysical Union que se muestra a continuación

Grupo	Clase	Tamaño en mm
Bolos	Muy grandes	2048-4096
	Grandes	1024-2048
	Medianos	512-1024
	Pequeños	256-512
Cantos	Grandes	128-256
	Pequeños	64-128
Grava	Muy gruesa	32-64
	Gruesa	16-32
	Mediana	8-16
	Fina	4-8
	Muy fina	2-4
Arena	Muy gruesa	1-2
	Gruesa	0.5-1
	Mediana	0.25-0.5
	Fina	0.125-0.25
	Muy fina	0.062-0.125
limo	Grueso	0.031-0.062
	Mediano	0.016-0.031
	Fino	0.008-0.016
	Muy fino	0.004-0.125
Arcilla	Gruesa	0.002-0.004
	Mediana	0.001-0.002
	Fina	0.0005-0.001
	Muy fina	0.00024-0.0005

Tabla 3.1 Clasificación de los materiales sedimentarios en un río (Ref.9)

La relación de vacíos es la relación entre el volumen de vacíos  $V_v$  y el de los sólidos  $V_s$  de un suelo (Ref.17):

$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

Y porosidad ( $n$  %), es la relación entre el volumen de vacíos y el volumen de su masa  $V_m$ . En este caso, debemos decir que los colchones Reno y gaviones tienen una porosidad de entre los 30 y 45% y se expresa como:

$$n (\%) = \frac{V_v}{V_m} \times 100$$

La compacidad relativa se expresa por la relación (Ref.18)

$$Cr = \frac{(e_{\text{máx}} - e_n)}{(e_{\text{máx}} - e_{\text{mín}})} \quad (3.1)$$

En la que  $e_{m\acute{a}x}$ ,  $e_{m\acute{i}n}$  y  $e_n$ , son respectivamente las relaciones de vacíos en el estado más suelto, en el más compacto y en estado natural.

Para la determinación de la resistencia al corte de los suelos finos, deben efectuarse pruebas triaxiales de muestras inalteradas.

En lo referente a la compresibilidad, la magnitud de los asentamientos será función de la intensidad de la carga, de su espesor de la capa compresible y de la relación de vacíos y grado de saturación en estado inicial de los suelos en esta capa.

Al atravesar el agua un revestimiento, sale aguas abajo con una velocidad que puede arrastrar partículas de suelo, iniciando la formación de un conducto o tubo que progresa hacia aguas arriba, hasta llegar a establecer la comunicación entre ambos lados del revestimiento; a su vez el flujo a través de ese tubo arrastra material de sus paredes ensanchándolo hasta provocar daños significativos a la estructura. A este fenómeno se le llama "falla por tubificación" (Ref. 18).

No todos los suelos son igualmente afectados por la tubificación. La susceptibilidad depende de la cohesión que exista entre las partículas del suelo y del tamaño y peso de cada partícula. Las arcillas de alta plasticidad, cuyas partículas se encuentran unidas por fuerzas de tipo iónico a través de las moléculas de agua o de coloides de suelo son poco susceptibles a la tubificación. Un coloide es un conjunto de partículas de suelo de dimensiones menores a 0.001 mm (Ref. 19). En arenas finas, los limos sin cohesión o mezclas de ambos, ofrecen una resistencia mínima a la erosión y por consiguiente son muy susceptibles a la tubificación.

### 3.1.1.1 Estudios geológicos

#### *Investigación preliminar*

La investigación preliminar consiste básicamente en preparar los perfiles longitudinales y transversales a lo largo de la ruta elegida y determinar las profundidades de las zanjas y alturas de los terraplenes. Después de contar con estos datos pueden llevarse a cabo los estudios de geotécnicos. En el proyecto de un canal tienen que satisfacerse las siguientes exigencias mínimas según Krynine (Ref. 20).

1. No habrá asentamiento perjudicial del canal dentro del material subyacente.
2. Las laderas serán estables.
3. El fondo y los taludes deberán ser impermeables (si se establece en el proyecto), previniendo las pérdidas de agua permisibles.

Así mismo habrá de prepararse un mapa geológico superficial. Éste deberá rodear una faja de alrededor de 60 metros de ancho, más la amplitud de la parte superior del canal elegido. El mapa debe mostrar las condiciones geológicas que se encontraron, la maniobrabilidad de los materiales; los cruces de arroyos, ríos,

carreteras y otras obras; los bancos de materiales para construcción y el abastecimiento de agua. El informe que lo acompañará se redactará en forma concisa, con los datos precisos para estudios de detalle o para la construcción.

#### *Investigación complementaria*

Las perforaciones con máquina deben efectuarse a lo largo de la línea central del canal con una separación aproximada de 300 metros (según se requiera). Se harán perforaciones adicionales si las condiciones geológicas y topográficas cambian mucho o en lugares donde se prevee colocar estructuras mayores. Así mismo deberán llevarse desde los materiales críticos hasta la roca sana o profundizar por lo menos tres metros por debajo del nivel del canal, o bien, si se tiene el conocimiento de la geología, puede pararse la perforación a profundidades someras o simplemente no hacerlas.

Los métodos geofísicos de resistividad ayudan a definir la posición del nivel freático, el espesor de la roca intemperizada o localizar rocas muy permeables. Para conocer si la roca es sana es aconsejable utilizar el método sísmico de refracción.

Además debe considerarse la posibilidad de tener deslizamientos de tierra. Si los hay, habrán que señalarse en el mapa, haciendo un cálculo de su influencia en la construcción y en el mantenimiento de futuros canales. Se hace hincapié en que los deslizamientos de tierra suelen reconocerse más fácilmente por medio de fotos aéreas. Estos estudios sobre deslizamientos preexistentes dan una idea sobre la futura estabilidad de las paredes del canal.

Los datos geológicos que deben estudiarse en esta etapa son:

- *Suelo.* Espesor, extensión, clasificación, composición, textura, estructura, porosidad y permeabilidad.
- *Rocas.* Clasificación, textura, estructuras, porosidad, permeabilidad, y profundidad de la roca sana.
- *Pliegues.* Presencia, tipo y orientación.
- *Estratigrafía.* Unidades litológicas, espesores y distribución.
- *Geodinámica externa.* Erosión, tipo y extensión del intemperismo, transporte y acumulación. Los movimientos en masa del terreno, soliflucción y avalanchas.
- *Geohidrología.* Flujo en agua superficial y subterránea; configuración, profundidad y fluctuación del nivel de agua freáticas, geometría de los acuíferos, volumen de los mismos; efecto de la excavación del canal en los patrones de agua superficial y subterránea.

- *Materiales de construcción.* Calidad y volumen.

#### *Investigaciones durante y después de la construcción*

En esta etapa, el trabajo se dirige a tener cuidado con los fenómenos de erosión, intemperismo o acumulación, así como los deslizamientos que pudieran ocurrir. Es aconsejable también obtener los niveles piezométricos y de ser necesario obtener de una manera más exacta la permeabilidad de los suelos o rocas para evitar lo más posible las filtraciones.

##### 3.1.1.2 Bancos de materiales

Definición: Por banco de materiales se entiende aquel lugar en la corteza terrestre construido por roca o material granular (arena, grava, arcilla, etc.) susceptible de ser utilizado en la construcción.

Es de gran importancia contar con una buen banco de materiales en la construcción de revestimientos de canales hechos mediante gaviones y colchones Reno, ya que a menudo el tipo de protección esta condicionado a la cercanía y presencia de materiales, así como por la cantidad y calidad de los mismos. Por lo regular es necesario construir caminos de acceso a los mismos, posibilidad que debe contemplarse desde el punto de vista económico.

En la construcción de gaviones y colchones Reno, las rocas de relleno deben cumplir con propiedades como son: alta resistencia al intemperismo o al impacto y a la abrasión, gran dureza, densidad alta a moderada y consecuentemente gran durabilidad, definida ésta por Bolivar del Valle, J.M., como la capacidad para conservar el tamaño, resistencia y la forma original durante un largo espacio de tiempo. Comúnmente se emplean rocas frescas, sanas y masivas como pueden ser: granito, diorita, gabro, caliza y cuarcita.

##### 3.1.1.3 Definición de filtro

Un filtro es un dispositivo hecho mediante materiales pétreos o materiales sintéticos. La función del filtro es disminuir la velocidad de filtración y no permitir el arrastre de partículas de suelo hacia el exterior

Es común emplear arena y grava en la construcción de filtros. Dichos materiales se encuentran en: rellenos aluviales, llanuras de inundación, terrazas, conos de inyección, dunas, así como en suelos residuales.

Para los filtros, los materiales de construcción deben tener una buena resistencia al corte y buen drenaje. Los filtros hechos de materiales sintéticos se ven en la parte 3.2.1 y 3.3.3.1 de este capítulo.

### 3.1.2 Aspectos relacionados con las características hidráulicas.

La resistencia de un revestimiento en gaviones y colchones Reno, depende de la Robustez de la red metálica, del espesor de la estructura y del tamaño de las piedras de relleno; para elegir estos parámetros, conociendo la velocidad promedio de la corriente, es posible utilizar la tabla 4.1 válida para los revestimientos del fondo y, con buena aproximación, también para los de las orillas.

La velocidad media del agua que pasa por una sección de un cauce se puede obtener mediante la ecuación de Manning (Ec. 1.28).

Por velocidad crítica se entiende como la máxima velocidad que puede soportar el revestimiento sin que se produzcan movimientos de las piedras en el interior del colchón.

La velocidad límite es aquella, aún aceptable que determina deformaciones reducidas debido al amontonamiento de las piedras en el colchón Reno.

Una vez fijada la capacidad del canal es necesario elegir la forma geométrica. En general los canales tienen una forma trapezoidal en los que intervienen los siguientes elementos: ancho de plantilla "b", tirante de agua "y", coeficiente de rugosidad de Manning "n", talud y bordo libre.

Cuando se trata de materiales que presentan características especiales, para elegir el coeficiente de rugosidad "n", así como en canales que conducirán aguas claras que propicien el desarrollo de plantas acuáticas, se deberá incrementar dicho coeficiente, es posible consultar las tablas 1.4 y 1.6, con el fin de tener un incremento de área y así contrarrestar en parte la reducción de la sección por incremento de plantas o depósito de azolves.

Los taludes se fijarán de acuerdo con la consistencia del material en que se excave el canal. El talud en cada caso será dado de acuerdo con los resultados de los estudios de Mecánica de suelos.

Con objeto de tener un margen de seguridad en la operación de los canales, conviene dejar cierto desnivel entre la superficie libre del agua para tirante normal y la corona de los bordos. Otros conceptos teóricos importantes que intervienen son los ya descritos en el capítulo 1.

### 3.2 Revestimientos realizados en presencia de agua

Para la defensa de las orillas a efectuarse en presencia de agua, las operaciones de puesta en obra de piedras sueltas presentan notables dificultades.

Para poder realizar revestimiento en presencia de agua, los colchones Reno se construyen lo más cercanos posibles a las orillas del cauce, los cuales se colocan por medio de equipos especiales como por ejemplo pontones y grúas, como se muestra en las figuras 3.5 y 3.6. La colocación de los colchones Reno sobre la superficie a proteger es en sentido transversal al flujo. Cuando se usa un pontón la colocación de los colchones Reno, se realiza mediante el deslizamiento de las piezas uniéndolas previamente mediante amarres hechos con alambre de la misma calidad que el de la malla.

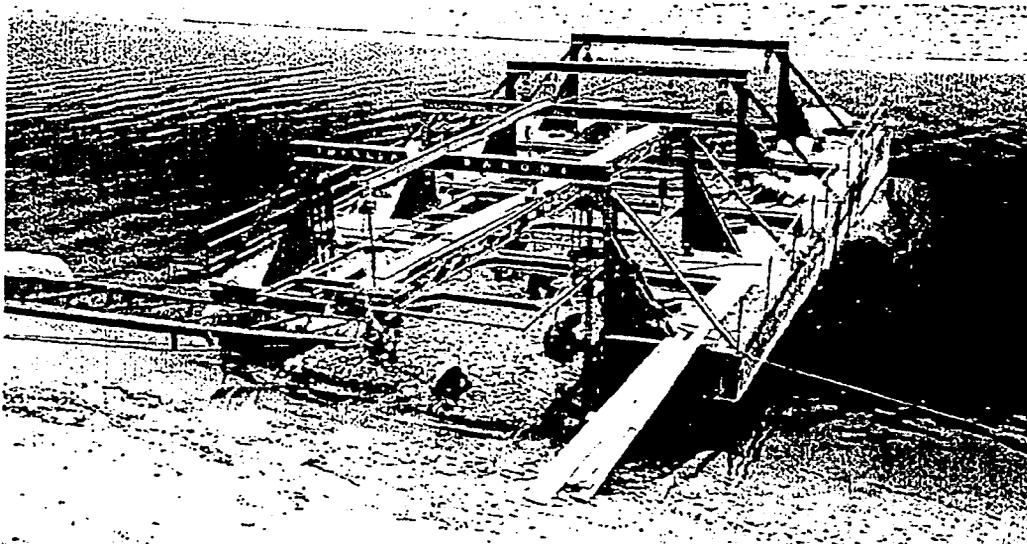


Fig. 3.5 Pontones flotantes en la fase de puesta en obra de los colchones Reno en agua.

#### 3.2.1 Aspectos relacionados con las características geotécnicas

Los aspectos relacionados con las características geotécnicas son los mismos que se mencionaron en el apartado 3.1.1, únicamente que los estudios de suelo y del cauce son más difíciles de realizar, sobretodo si el cauce es muy profundo o caudaloso. Pero, ante todo, lo más complicado es su proceso de construcción.

Los recubrimientos marginales consisten en colocar directamente sobre la orilla del cauce un material que no pueda ser arrastrado por la corriente. Para ello, generalmente se perfila la orilla con un talud que permita la colocación fácil y segura

del material de protección. Entre este último material y el que forma la margen usualmente se coloca un filtro, como puede ser un geotextil ver figura 3.6.

Los geotextiles son materiales permeables (permiten el paso de agua), que dependen de los materiales empleados y del proceso de fabricación. Los geotextiles pueden ser tejidos, no tejidos y de punto. Los tejidos están compuestos por dos series de fibras entrelazadas en forma más o menos ortogonal; los no tejidos tienen la característica de tener un arreglo aleatorio de sus fibras; y los de punto, tienen fibras que están unidas por medio de lazos entre el mismo hilo (Ref.21).

El objetivo del filtro es evitar que las partículas finas de la orilla salgan a través de los huecos del revestimiento que es diseñada para resistir altas velocidades del flujo.

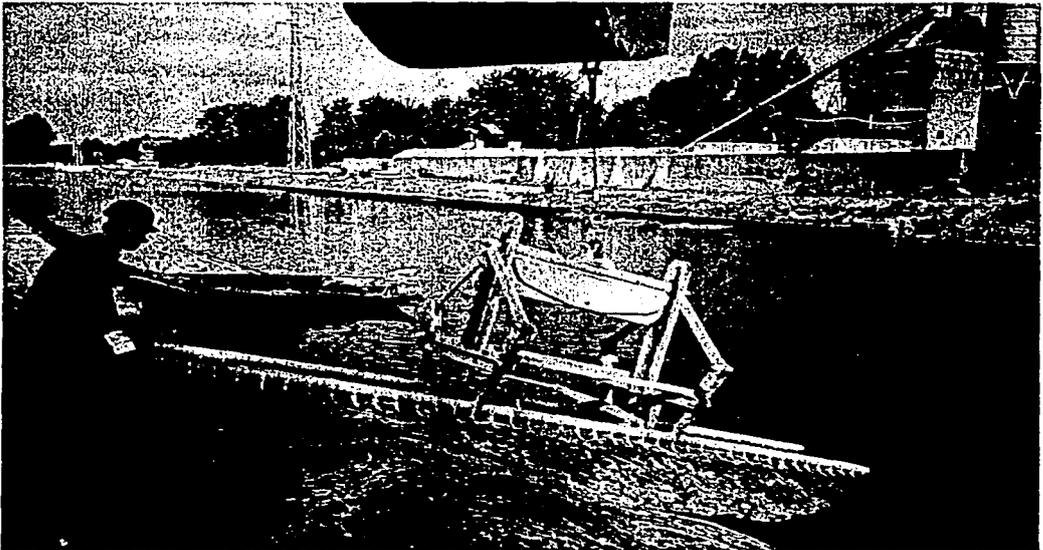


Fig.3.6 Puesta en obra de los colchones Reno mediante el uso de una grúa y un sujetador(Ref.8).

### 3.2.2 Aspectos relacionados con las características hidráulicas

Cuando se requiera realizar trabajos de revestimiento a cauces en presencia de agua se deberá hacer estudios especiales al flujo de agua y suelo antes de ejecutar la obra, tomando en cuenta valores mayores que sean capaces de contrarrestar los errores que se tengan en: transporte, maniobras de colocación en el suelo, provocadas por la corriente y por el mismo movimiento del equipo e irregularidades del suelo en el diseño de los elementos que intervengan en dicha protección.

### 3.3 Revestimientos realizados en seco consolidados

Es necesario realizar un estudio cuidadoso para evaluar si el canal debe impermeabilizarse. La decisión dependerá de la magnitud de las filtraciones previsibles, del tipo de líquido que conducirá y de las condiciones ecológicas y económicas. Antes de decidir respecto a la conveniencia de impermeabilizar un canal, es necesario realizar un estudio geotécnico del sitio, con los objetivos siguientes:

- Verificar si la permeabilidad del lugar conduce a filtraciones aceptables o no.
- Definir los problemas de estabilidad de los suelos al utilizarse un método de impermeabilización.

Una vez que se ha decidido el revestimiento de un canal, disminuye la importancia de la permeabilidad de los suelos en que se construirá, pero en cambio debe investigarse cuidadosamente su estabilidad. No debemos olvidar que hay dos grupos de suelos que pueden presentar problemas en un canal revestido:

#### 1) Arenas finas y limos sueltos, sobre todo si están mal graduados

A estos suelos se les ha llamado "colapsables". En el caso de arenas y limos es necesario conocer su composición granulométrica y las relaciones de vacíos (ver 3.1.1). Con estas determinaciones, se deduce su compacidad relativa en estado natural, la cual se comparará con la compacidad relativa que se halla decidido como aceptable en el caso particular.

#### 2) Arcillas expansivas

La *plasticidad* es una propiedad del material por la cual es capaz de soportar deformaciones rápidas, sin rebote elástico, sin variación volumétrica apreciable y sin desmoronarse ni agrietarse.

Para medir las arcillas se usa el método de Atterberg. Según su contenido de agua en orden decreciente, un suelo susceptible de ser plástico puede estar en cualquiera de los estados de consistencia que son: líquido, semilíquido, plástico, semisólido, y sólido. Las fronteras definen al límite líquido, límite plástico, índice plástico y el límite de contracción, que se definen como:

El *límite líquido (LL)*, es la frontera convencional entre los estados semilíquido y plástico. Se obtiene a partir del uso de la *copa de Casagrande*, que es un recipiente de bronce o latón con un tacón solidario del mismo material; el tacón y la base giran en torno a un eje fijo de la base.

El *límite plástico (LP)*, es la frontera entre los estados plásticos y semisólido. Se obtiene a partir de la deformación de rollos de 3 mm de diámetro de la muestra de

suelo hasta que ocurra el desmoronamiento y agrietamiento; en ese instante se determina rápidamente su contenido de agua, que corresponde al *límite plástico*.

La diferencia entre el límite líquido y el límite plástico se conoce como *índice de plasticidad* ( $I_p$ ) y se expresa en la forma:

$$I_p = LL - LP \quad (3.2)$$

El *límite de contracción* (LC), es la frontera entre los estados semisólido y sólido, definidos con el contenido de agua con el que el suelo ya no disminuye su volumen al seguirse secando. El método de Terzaghi para calcular el LP, consiste en medir el peso y el volumen de una muestra de suelo totalmente seca; en tal momento, puede decirse que el límite de contracción sería la humedad de la muestra seca si tuviese sus vacíos llenos de agua y se expresa

$$LC(\%) = \left( \frac{V_m \gamma_o}{W_s} - \frac{1}{S_s} \right) \times 100 \quad (3.3)$$

Donde:  $V_m$  es el volumen de la muestra;  $\gamma_o$  indica el peso específico del agua;  $S_s$  y  $W_s$  corresponden al peso específico relativo seco y al peso seco de la muestra respectivamente.

La expansibilidad y contracción del suelo dependen del tipo de mineral de arcilla que la constituye, la expansibilidad aumenta en el orden de caolinita, illita y montmorilonita. El  $Li^+$  y el  $Na^+$  son los cationes que producen mayor expansibilidad, mientras el  $Fe^{+++}$  es de los que producen menor expansibilidad. Una forma práctica para identificar arcillas expansivas es la propuesta por W. G. Hertz (Ref.22), en función del contenido de coloidal (porcentaje de partículas menores que 0.001 mm), índice de plasticidad y el límite de contracción como se muestra en la siguiente tabla.

Contenido coloidal (% < 0.001 mm)	IP (%)	LC (%)	Expansión probable (%) (seco a saturado)	Grado de expansión
>28	>35	<11	>30	Muy alto
20-31	25-41	7-12	20-30	Alto
13-23	15-28	10-16	10-20	Medio
<15	<18	>15	<10	Bajo

Tabla 3.2 Datos para estimar el cambio volumétrico probable

La variación de volumen que pueda experimentar un material que contenga arcillas expansivas depende de diversos factores entre los que destacan:

- a) La proporción y tipo de mineral arcilloso. Los minerales de montmorilonita tienen una estructura propicia a la expansión, y además, poseen una gran actividad en cuanto a intercambio de bases.
- b) La compactación. Un suelo compacto tiene más partículas por unidad de volumen, por lo que sufrirá mayor expansión al mojarse, pero por otra parte, no puede sufrir tanta contracción como uno de estructura suelta, al secarse.
- c) Las probables variaciones de humedad. Todo cambio volumétrico en las arcillas depende de la absorción o pérdida de agua.
- d) Las cargas a que se someterá. Si las cargas externas aplicadas son de suficiente magnitud pueden equilibrar las fuerzas desarrolladas al humedecerse el suelo arcilloso.
- e) La estructura del suelo. La expansión es mayor en especímenes remoldeados que en inalterados de un mismo suelo.
- f) El tiempo necesario para que se produzcan los cambios de contenido de humedad. A causa de la finura del material la transmisión de humedad es lenta.

### 3.3.1 Colchón Reno consolidado o parcial con almaciga bituminosa

El betumen es, por definición, una sustancia que es soluble en disulfuro de carbono; generalmente derivado del petróleo; sustancia pegajosa; adherente, de color negro, asociadas con olores acre característicos (*Ref.23*).

La almaciga bituminosa es una resina de hidrocarburos, que es una combinación de hidrógeno y carbono. Los miembros más ligeros y más volátiles de esta familia de hidrocarburos incluyen gas natural o manufacturado, gasolina, aceite diesel, entre otros.

La consistencia de la almaciga bituminosa normal varía, desde ligeramente más espeso que el agua hasta materiales duros y quebradizos que se rompen bajo la acción de fuerzas; pero los más duros fluyen si se someten a una carga prolongada y continua (*Ref.24*). Esta característica plástica de la almaciga bituminosa da origen a la flexibilidad que es una de sus mayores ventajas sobre otros elementos para revestir.

Cuando las condiciones hidráulicas de proyecto imponen la utilización de una estructura con características de resistencia superiores a las de un revestimiento en colchones Reno o en gaviones tradicionales, o bien, cuando se necesita una

impermeabilización de la capa protectora por ejemplo en canales de riego, es posible predisponer una estructura formada por el colchón Reno y almaciga bituminosa hidráulica, reuniendo las características y las funcionalidades de estos dos materiales, es decir, flexibilidad inalterada, mayor protección contra la corrosión, mayor protección contra la abrasión y mayor compactación en el revestimiento (Ref.25).

Un revestimiento consolidado o parcial, es aquel donde las piedras están ligadas pero la estructura aún es permeable. Ver figura 3.7.

La almaciga bituminosa es colocada una vez terminada la colocación de los colchones Reno tradicionales. La colocación de la almaciga bituminosa se puede llevar a cabo mediante un sistema de riego uniforme en toda la superficie.

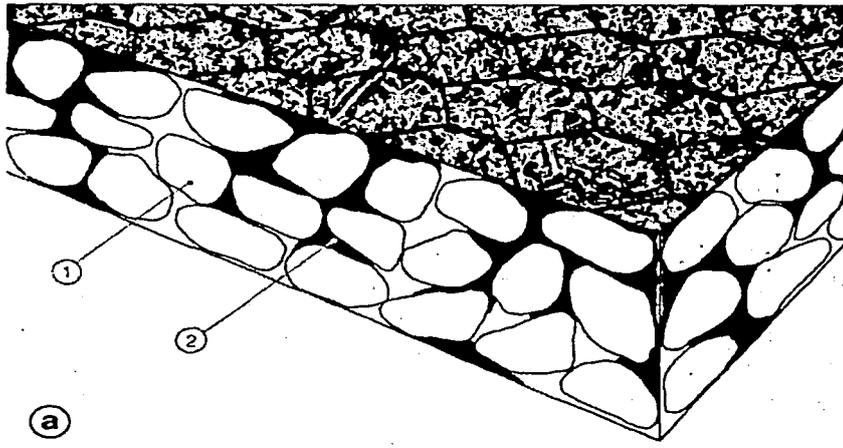


Fig. 3.7 Colchón Reno consolidado con almaciga bituminosa (Ref.6)

### 3.3.2. Colchón Reno sellado con almaciga bituminosa

Las cantidades de almaciga bituminosa necesarias dependerán del tipo de impermeabilización que se desea obtener. La tabla 3.3 muestra las cantidades mínimas de almaciga bituminosa colable para penetración parcial y/o total en función del espesor de los colchones Reno y gaviones. La cantidad de material esta en  $\text{kg}/\text{m}^2$  aplicada en la superficie superior del revestimiento, como se muestra en las figuras 3.7 y 3.8.

Un revestimiento sellado o total, es aquel cuando la almaciga bituminosa sella completamente el relleno y recubre con una capa de 20 a 30 mm la estructura metálica que queda, por lo tanto, sin contacto directo con el agua y los agentes atmosféricos como se muestra en las figuras 3.8 y 3.9.

Tipo	Espesor	Cantidad de almaciga bituminosa	
		Penetración parcial Kg/m <sup>2</sup>	Penetración total Kg/m <sup>2</sup>
Colchón Reno	0.15	60-90	120-140
	0.17	80-100	130-150
	0.23	90-120	190-220
	0.25	100-130	200-240
	0.30	120-150	240-280
Gaviones	0.50	150-200	400-450
	1.00	200-350	700-800

Tabla 3.3 Cantidades unitarias mínimas de almaciga bituminosa colable para penetración parcial y/o total de los colchones Reno y gaviones (Ref.6)

La preparación del almaciga bituminosa se efectúa en las instalaciones normales utilizadas para la construcción de carreteras. La puesta en obra en seco se puede efectuar por colada directa desde un camión, mediante la utilización de una simple canaleta, o bien, con la ayuda de una grúa y de un contenedor térmicamente aislado.

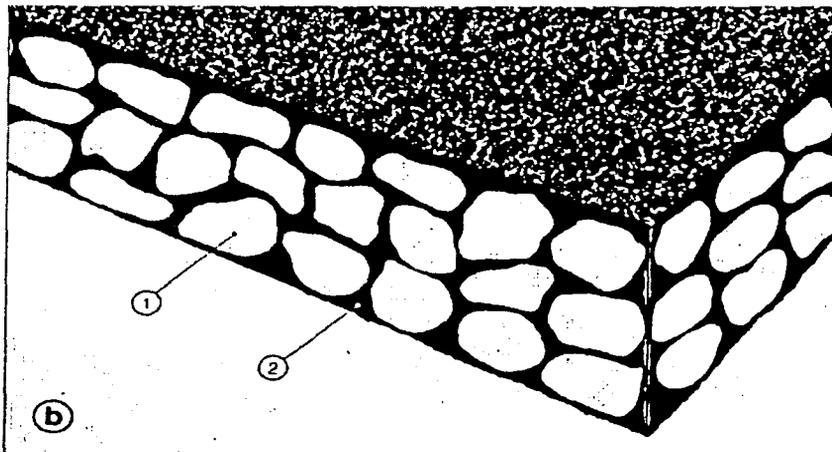


Fig. 3.8 Colchón Reno sellado con almaciga bituminosa: 1.- Roca, 2.-almaciga bituminosa

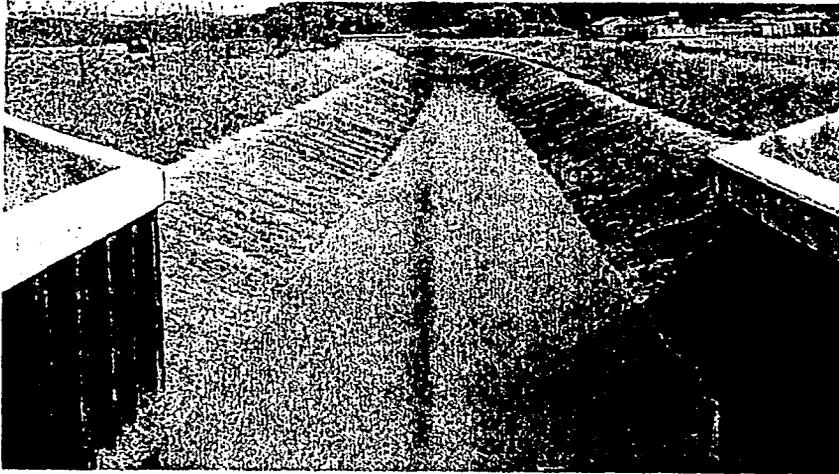


Fig. 3.9 Canal de descarga revestido con colchones Reno consolidados con almáciga bituminosa (Ref.8).

### 3.3.3 Colchón Reno con membrana impermeable.

Las membranas (también llamadas geomembranas por encontrarse en contacto directo con el suelo, Ref.26) en obras de revestimiento de canales y lagunas, pueden clasificarse en dos grandes grupos: las fabricadas a base de plásticos y las hechas con elastómeros. Dentro de los plásticos se tiene: al PVC (cloruro de polivinilo), el PE (Polietileno) y sus derivados. Entre los elastómeros se tiene al EPT y EPDM (hule butilo), neopreno (Policloropréno) y sus derivados. Otras membranas derivadas, o combinaciones de estos dos grupos, son el CPM (Polietileno clorinado), el hypalon (polietileno clorosulfonatado) y 3110 (poliolefin elastizado).

Al usar membranas impermeables se busca generalmente eliminar al máximo las infiltraciones. Es importante mencionar que aún con los mejores productos, no puede existir la absoluta seguridad de que se alcance dicho objetivo. El resultado final depende de la calidad, propiedades del material y de su instalación (Ref.27).

**Fabricación.** Todas las membranas de revestimiento están hechas dentro de un reactor llamado polimerizador, a partir de resinas obtenidas como producto de una reacción química llamada polimerización, en el cual moléculas pequeñas de un monómero se unen entre sí y con otras moléculas polímeros de largas cadenas. A temperatura y presiones normales, el monómero se presenta como un gas y por tanto, se maneja a bajas temperaturas y altas presiones. Las resinas se mezcla con otros ingredientes para obtener las propiedades deseadas, éstos ingredientes que se agregan constituyen los diferentes tipos de membranas.

Las membranas más gruesas se obtienen frecuentemente superponiendo varias hojas y se refuerzan intercalando entre ellas una o dos telas de refuerzo (hechas generalmente de nylon, algodón, yute, poliéster y vidrio). Este refuerzo aumenta la resistencia a la tensión de la membrana y facilita su manejo y los empalmes. El refuerzo ayuda a la estabilidad contra el punzonamiento, estabilidad contra el encogimiento y mayor resistencia al desgarre. Siempre debe buscarse el mínimo número de juntas. Las juntas entre secciones de membranas pueden hacerse recurriendo a diferentes métodos (dieléctrico y térmico), cintas adhesivas y la aplicación de solventes.

#### Criterios generales para la selección de membranas impermeables

La selección del tipo de membrana para una obra debe tomar en cuenta múltiples factores entre los que destacan: facilidad de reparación, resistencia al intemperismo, inmunidad al ataque de bacterias y hongos, composición uniforme y economía. En la tabla 3.4 se muestran otras propiedades y su comparación entre siete diferentes membranas de uso más común en revestimientos.

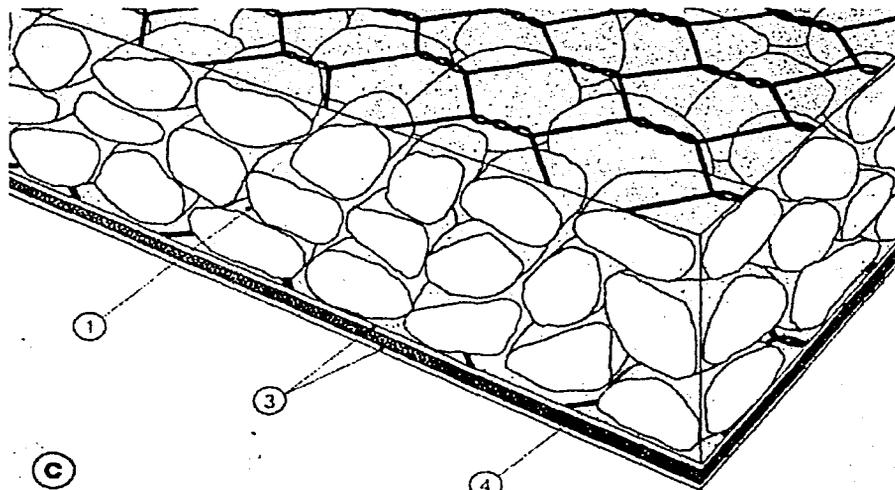


Fig. 3.10 Colchón Reno combinado con una membrana impermeable: 1.- Colchón Reno, 3.- Geotextil, 4.- Membrana impermeable.

Como alternativa al almaciga bituminosa, con el objeto de garantizar la impermeabilidad del revestimiento, se puede utilizar una membrana sintética impermeable bajo el colchón Reno; en este caso, es conveniente proteger la membrana contra eventuales riesgos de perforación poniendo una doble capa de geotextil, como se muestra en las figuras 3.10 y 3.11.

Material Propiedad	Polietileno	PVC	CPE	Polipropileno	Nylon	hule butilo	Hypalon
Densidad	0.94-0.96	1.2-1.5	1.35-1.39	0.9-0.91	1.08-1.4	0.92-1.25	
Resistencia a la tensión Kg/cm <sup>2</sup>	170-340	245-700	125 min	280-2250	630-775	70-280	70-140
Elongación %	10-650	60-200	375-575	40-400	250-550		
Temperatura de trabajo °C	-55-115	-50-90	-40-50	-50-105	-50-170	-45-160	-45-120
Resistencia a los ácidos	B	B-E	B-E	B-E	P		B
Resistencia a las bases	B-E	B-E	B-E	B-E	E		B-E
Resistencia a los solventes oxigenados	P-B	B	P				B
Resistencia a los solventes aromáticos y halogenados	R	B	P	B	B	P	R
Resistencia a los solventes alifáticos del petróleo	R-B	B	B	B	E	P	B
Impermeabilización	P	B	E	P	R	B	E

Donde: P = Pobre; R = Regular; B = Bueno; E = Excelente.

Tabla 3.4 Propiedades de membranas en el uso de revestimientos (Ref.28).

### 3.3.3.1 Guía de instalación de geosintéticos (Geotextiles y geomembranas)

A continuaciones se menciona una recomendación para ayudar a asegurar que, una vez instalado el geosintético, desarrolle la función asignada en el diseño. Con este fin, el geosintético debe ser identificado, manipulado, almacenado, e instalado de manera que no se vean afectados los valores de sus propiedades físicas y mecánicas y que las condiciones de diseño se cumplan en forma cabal (Ref.29). Los métodos de empalme descritos en esta parte son exclusivamente para geotextiles, para membranas impermeables usar alguno descrito en 3.3.3.

#### *Identificación del material, Almacenamiento y manipulación*

El geosintético estará enrollado en cilindros que tengan la suficiente resistencia como para evitar los pliegues u otros daños producidos por el uso normal. Cada rollo vendrá envuelto con una recubierta de plástico para proteger al material de daños

que puedan ocurrir en el flete y la manipulación, y deberá estar identificado con una etiqueta pegada que indique el nombre del fabricante, el número de estilo y el número de rollo. También se puede proporcionar la identificación del rollo destinado a la obra propuesta para el rollo como se indica en los planos de construcción y como fueron aprobados por el ingeniero, propietario o contratista.

Mientras se realiza la descarga o mientras se transfiriere el geosintético de un lugar a otro, prevenga al daño del envoltorio, cilindro, etiqueta, o el geosintético en sí. Si el geosintético va a permanecer almacenado por un largo tiempo, este debe ser ubicado y colocado de tal manera de asegurar su integridad. Esto puede lograrse al elevar el geosintético del suelo y asegurarse que esté cubierto y protegido adecuadamente contra la luz ultravioleta, luz solar, productos químicos que sean ácidos fuertes o bases fuertes, incendios o llamas, temperaturas sobre los 60 °C (140 °F) y de la destrucción causada por humanos o animales.

Una vez desenrollado, el geosintético deberá ser tensionado a mano hasta que se esté completamente tenso, sin arrugas y totalmente tendido en el suelo. Los rollos de geosintético adyacentes deben ser traslapados según sea necesario para asegurar un 100 por ciento de cobertura, a menos que se especifique lo contrario en los planos del contrato. Los paneles adyacentes de geosintético deben ser unidos para prevenir la pérdida del 100 por ciento de cobertura debido al deslizamiento del panel geosintético durante la operación de relleno.

#### *Instalación del geosintético*

El lugar debe estar libre de piedras grandes, raíces y desechos. Posteriormente se excava y se le da forma al lugar hasta las líneas y cotas. Rellenar las depresiones y hoyos para producir una compactación. Al colocar el geosintético debe tomarse especial cuidado para evitar daños en el geotextil. El geosintético puede ser unido por el traslape o por costura mediante fajas del mismo material. La distancia mínima de traslape en la dirección longitudinal o transversal es de 0.6 metros. Excepto en instalaciones bajo el agua donde el mínimo de traslape es de 1 metro, se permiten costuras si el traslape es de por lo menos 15 cm. Es necesario asegurar firmemente el geosintético en la parte superior del talud utilizando una zanja de anclaje. Para obtener máxima efectividad, la zanja debe estar por lo menos 1 metro del coronamiento del talud y debe tener una profundidad de al menos 0.6 metros. Compactar cuidadosamente la zanja para asegurar un buen anclaje.

Al instalar geosintéticos a lo largo de un arroyo u otros lugares donde se esperan movimientos de agua, colocar un soporte en la base del geosintético de modo similar al de la parte superior para evitar el escurrimiento bajo éste.

Con respecto a la Instalación de los colchones Reno, se colocan los bloques directamente sobre el material geotextil, el relleno de piedras no debe ser muy pesado. Cualquier geosintético que sea dañado durante la instalación será reemplazado según las instrucciones de traslape antes mencionadas.

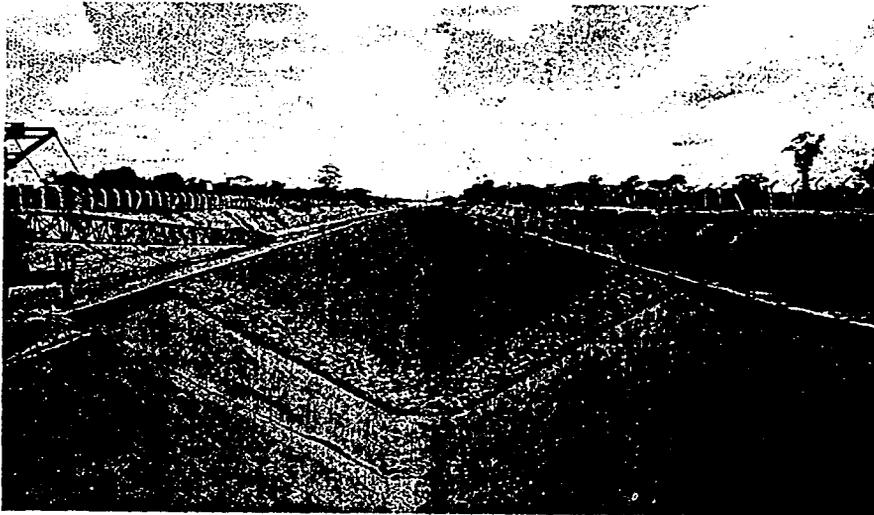


Fig. 3.11 Canalización del canal Pedra do Cavalo, Brazil. Utilizando colchones Reno combinados con una membrana impermeable (Ref.6).

### 3.4 Revestimiento consolidado realizado en presencia de agua

Normalmente, el colado del almaciga bituminosa en los colchones Reno, como se ha dicho precedentemente, se efectúa en la obra, ya que esta operación no presenta dificultades significativas. Preparar los elementos bituminados fuera de la obra y vararlos, siendo una operación perfecta desde un punto de vista técnico y puede ser económicamente conveniente hacerlo así, si se deben colocar grandes cantidades de colchones Reno y se puedan utilizar espesores reducidos.

Los colchones pueden unirse con alambre de la misma calidad (como se indica en el Cap.2; *especificaciones*) y formar un solo elemento de acuerdo a las dimensiones del talud en la sección, o pueden construirse como un solo colchón de acuerdo a las medidas especificadas de la zona a proteger y posteriormente realizar el colado de almaciga bituminosa.

Generalmente, la preparación se efectúa sobre pontones equipados para este objeto; sobre estos últimos, los materiales para el relleno del colchón Reno y el almaciga son puestos en obra con mayor facilidad y uniformidad que en superficies inclinadas. La colocación se efectúa mediante el deslizamiento del elemento sobre la plataforma del pontón, adecuadamente inclinada. Los elementos pueden ser puestos en obra,

sobreponiéndolos 0.40 a 0.60 m en los bordes, evitando de este modo complicadas operaciones de sellado en las juntas bajo el agua.

Otro sistema de puesta en obra de elementos bituminados fuera de la obra es mediante grúas. En este caso, las operaciones de preparación, relleno y bituminado son iguales a las anteriores, con la única diferencia que se efectúan sobre los diques y no sobre los pontones.

3.5 Aspectos importantes al diseñar un revestimiento ya sea permeable, semi-permeable o impermeable.

3.5.1 *Localización en planta.* Para iniciar el diseño de una protección marginal, primero se debe dibujar el eje del nuevo cauce. Después se marca la orilla y el pie del talud de la margen, líneas 0-0' y T-T' respectivamente. Finalmente paralela al eje del cauce, se traza el pie del talud de la altura de protección, línea E-E'. Todo conforme a la Fig.3.12.

Las líneas 0-0' y T-T' muestran en planta la posición de la margen, de la parte superior (orilla del río) y el pie del talud de la margen respectivamente. Ambas sirven de referencia para el futuro proyecto. Únicamente se puede hablar de la posición de la orilla en ríos de planicie o en los que el cauce principal este bien formado y la margen no coincida con el talud de un cerro o lomerío. En esta última condición conviene trazar en planta la proyección del contacto de la superficie libre del agua correspondiente al gasto formativo.

La línea E-E' que corresponde a la ubicación de la traza del talud de la protección con el fondo. Para ubicarla hay que tener en cuenta los materiales de construcción, tipo de filtro por utilizar y talud del recubrimiento. Para ello, se dibuja una primera línea, la que se corregirá y reubicará a medida que avance el diseño. Cuando el recubrimiento es vertical, esta tercera línea coincide con su pared exterior, en contacto con el agua. Cuando se diseña un recubrimiento permeable esta línea no se necesita. Ubicada la línea E-E', el talud de la protección y la elevación de la planicie, se traza la línea J-J', que corresponde al punto superior del exterior de la protección. Una vez que el recubrimiento ha sido diseñado y se conoce su espesor, se logra definir la posición de las líneas H-H' y G-G', que marcan la superficie sobre la que se apoyará el recubrimiento marginal propiamente dicho.

La línea F-F', llamada de "extrema precaución" (Ref.4), por indicar hasta donde llega la protección contra la socavación local del recubrimiento marginal, sea impermeable o semi-impermeable, también es paralela al eje del cauce. Dicha línea se traza al final, una vez que el recubrimiento marginal ha quedado diseñado. Si el recubrimiento es permeable indica hasta donde llegarán los elementos de dicha obra. Lo importante es, que debe ser respetado el trazo del eje del río y que el revestimiento quede paralelo a dicho eje.

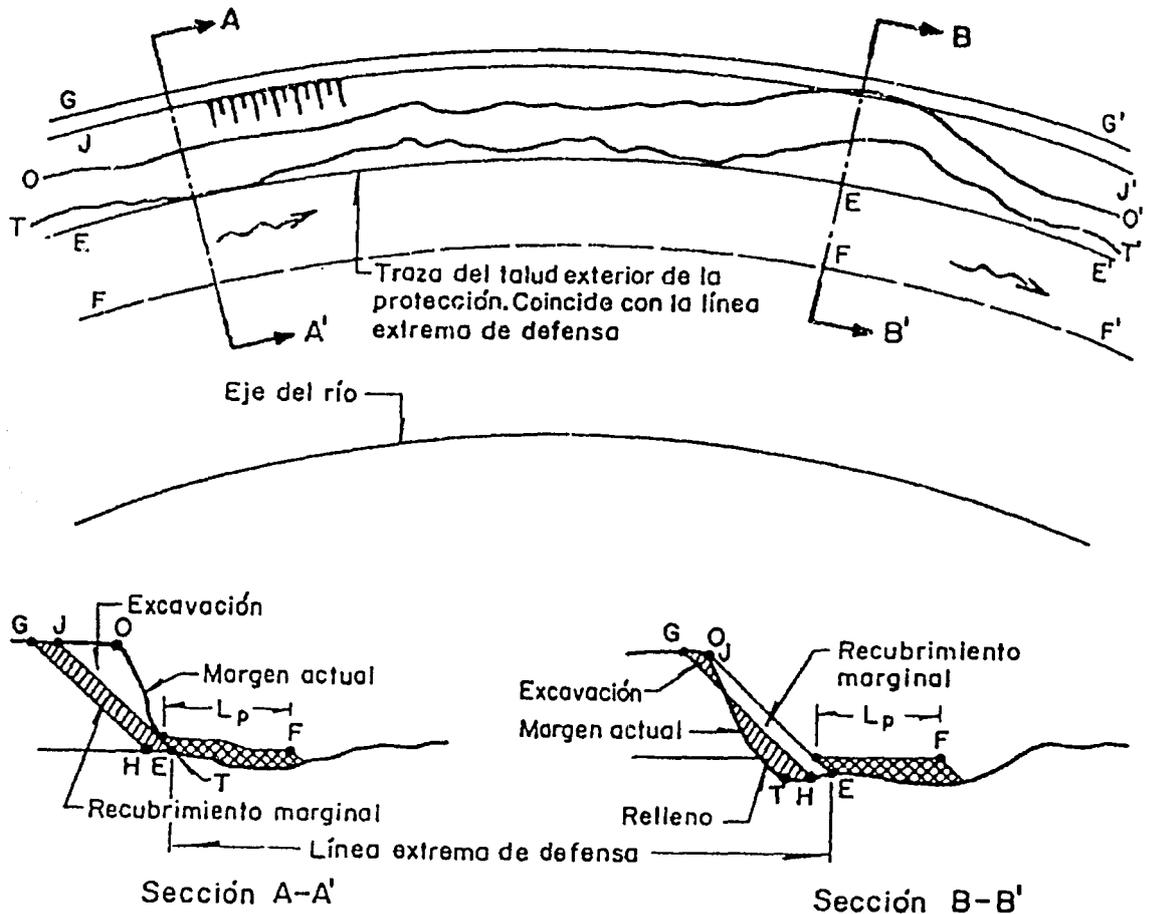


Fig. 3.12 Trazo del eje del cauce y de la línea del pie del talud de la protección (Ref.4)

Cuando se tienen curvas de radios menores que  $2B$ , pueden utilizarse también recubrimientos marginales, por lo que se acepta cualquier radio de curvatura menor. Con ello los radios de curvatura del eje del cauce deben valer:

$$r \leq 8B$$

Donde  $r$  es el radio de curvatura al centro del cauce.

Cuando únicamente se desea evitar los movimientos laterales de un cauce, sin reducir el ancho, el revestimiento sólo se coloca en las orillas cóncavas de las curvas y se prolongan hacia aguas arriba y hacia aguas abajo en los tramos rectos, de tal forma, que donde termina la protección de una margen se inicia la protección de la margen opuesta, véase Fig. 3.13. Como puede notarse, las márgenes interiores de las curvas no se protegen y el río finalmente las fija libremente.

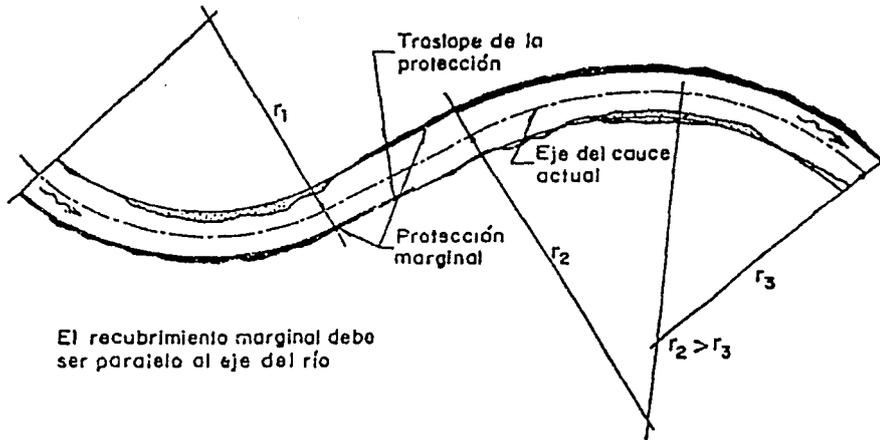


Fig. 3.13 Recubrimiento marginal para fijar el cauce actual

**3.5.2 Talud de protección.** Simultáneamente con la localización en planta, en cada sección transversal dibujada en el proyecto, se deberá trazar una línea vertical en el lugar que corresponde a la línea E-E' que señala el pie del talud exterior de la protección. A partir de ese punto se trazará el talud seleccionando, y el espesor que tendrá la protección, líneas E-J y H-G respectivamente. De esta forma se conocerán las zonas que serán rellenadas los cortes que se tienen que realizar antes de colocar el revestimiento. Teniendo en cuenta los rellenos y cortes, se moverá la línea del pie del talud E-E' y se reubicarán los puntos que la señalan en las secciones transversales.

En recubrimientos marginales formados con enrocamiento conviene utilizar taludes de 2:1 o mayores, con objeto de que la protección se sostenga adecuadamente, el tamaño máximo de los elementos no debe ser muy grande.

El talud de 2:1 se recomienda también por facilidad de construcción cuando las márgenes son protegidas con losas de concreto, gaviones o colchones Reno.

Taludes más tendidos como 3:1 se utilizan en grandes ríos y sobre todo cuando es similar al talud natural de las márgenes.

Cuando la protección se requiere en zonas en que los ríos atraviesan poblaciones, se diseñan con taludes más verticales con objeto de ganar terreno al río o bien para no destruir construcciones que estén cerca de la orilla. Recurriéndose al uso de tabla-estacas, muros de concreto y de Gaviones. Estas estructuras deberán resistir los empujes de tierra.

*3.5.3 Dimensionamiento del revestimiento.* Un recubrimiento semi-permeable se forma generalmente con enrocamiento, colchones reno o gaviones. Esas obras deben descansar sobre la margen, por lo que ésta debe ser perfilada al talud deseado.

Los recubrimientos marginales formados con enrocamiento deben de contar como mínimo con: una coraza en contacto con el flujo cuyos elementos tengan el peso suficiente para no ser arrastrados por la corriente y un filtro que evite que las partículas que forman la margen del cauce salgan entre los huecos de la coraza del enrocamiento.

Entre el material de la orilla y la coraza hay que colocar un filtro, ya que las partículas que forman la orilla pueden ser arrastradas por un flujo de tierra hacia el río, el que se origina cuando el nivel freático en la margen tiene una elevación superior a la elevación de la superficie del río.

Otro agente que puede provocar la succión del material de la margen, a través de los huecos del recubrimiento, son los vórtices originados por la propia corriente, debido a la presencia del enrocamiento. El efecto de succión es más notable cuanto es menos el espesor del recubrimiento y más irregular es su talud. En los colchones Reno este fenómeno es menos significativo por ser menos rugosos.

La facilidad de colocación de los filtros depende de la elevación del agua, de su velocidad y del equipo de construcción.

El recubrimiento marginal impermeable. Un recubrimiento se construye completamente impermeable cuando se tiene la certeza de que el nivel freático nunca está por encima del nivel del fondo del cauce. Si el nivel freático sube por arriba de fondo y se construye una protección impermeable, se deben colocarse lloraderos en el recubrimiento, para evitar la subpresión.

Por último, los recubrimientos impermeables se pueden formar con tabla-estacas metálicas o de concreto. Son muy útiles en cauces profundos y márgenes arcillosas que tienden a ser verticales y para protecciones de emergencia en zonas donde no exista roca ni grava suficiente. En el capítulo 4 se desarrolla un diseño para revestimientos, utilizando colchones Reno.

3.5.4 *Materiales de construcción.* Los materiales empleados en la construcción de revestimientos se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Cuando el material descansa sobre el material de la margen. Pueden utilizarse cilindros de roca, los que a medida que se van llenando se dejan deslizar libremente por la margen. Esta solución únicamente se utiliza cuando el talud es menor de 0.4:1, es decir  $\phi \geq 68^\circ$ , ya que de otra manera los elementos no se deslizarán fácilmente. Estos cilindros se pueden colocar también en márgenes no perfilizados y tienen la ventaja de que tampoco requieren de una protección contra la erosión, al pie de los mismos, ya que si ésta existe, el cilindro se sigue deslizando hacia abajo.
- Cuando el material se soporta a sí mismo. Estos se forman generalmente con gaviones y colchones Reno. Los muros construidos con estos materiales resisten bien las altas velocidades del flujo pero se deben calcular para que soporten el empuje del material que forma la margen o los rellenos que se hagan entre las orillas y el muro.
- Cuando el material está separado de la margen. Son los recubrimientos permeables.

3.5.5 *Protección contra la erosión local.* La causa principal de la falla de los recubrimientos es la erosión que se produce al pie de los mismos, por lo que el éxito de un recubrimiento depende de su protección contra esa erosión local, ver Fig. 3.14. Cuando una margen está protegida y no puede desplazarse lateralmente, la erosión en curvas aumenta, debido principalmente a que la margen interior de la curva, sujeta a sedimentación, se sigue desplazando hacia el interior del cauce, hasta que se alcanza un nuevo estado de equilibrio.



Fig. 3.14 Falla de un recubrimiento no protegido al pie del talud

Existen varios procedimientos para evitar que un revestimiento sea socavado, entre ellos se mencionan tres, que se ilustran en la Fig. 3.15.

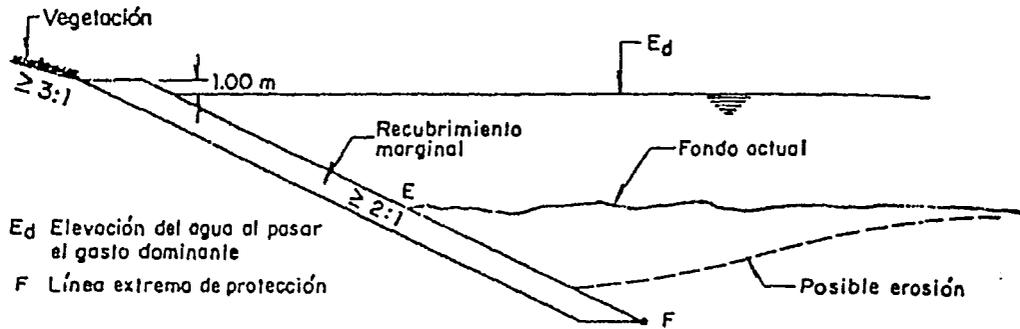
1. Desplantar la protección a una profundidad tal que no sea afectada por la erosión general o la erosión en curvas. Con carácter aproximado se debe profundizar la protección cuando menos 1.5 metros; esta recomendación es útil en ríos pequeños cuyo ancho no sea mayor de 30 metros. En ríos mayores las socavaciones indicadas deben ser calculadas y se debe de dragar o excavar el fondo hasta alcanzar las elevaciones obtenidas. Esta protección se realiza con facilidad en ríos que no llevan agua durante algunos meses del año. Véase la Fig. 3.15a.
2. Excavar una trinchera al pie del recubrimiento, como se indica en la Fig. 3.15b. Dicha trinchera se rellena con material pétreo que no pueda ser arrastrado por la corriente. Si se produce erosión y el producto desciende se producirá un deslizamiento y reacomodo de algunos elementos de la trinchera, pero el recubrimiento marginal sigue protegido. Con esta solución los volúmenes de excavación son menores. Se debe tener en cuenta que el lado interior de la trinchera debe tener el mismo talud que el recubrimiento y colocar sobre el filtro correspondiente. El talud exterior es el reposo del material del fondo. Si el río es pequeño y no dispone de datos confiables y el radio de curvatura vale  $r \geq 4B$ , la profundidad de la trinchera puede variar entre 1 y 1.5 metros.
3. En lugar de profundizar la protección se puede colocar un delantal a base de enrocamiento o colchones Reno sobre el fondo del cauce, cuyo espesor  $s$ , igual o mayor a 3 capas de roca y con un ancho  $L_P$  que, como mínimo, sea igual a una vez el tirante de la corriente correspondiente al gasto máximo, como se muestra en la Fig. 3.15c.

La selección de las opciones indicadas depende principalmente de motivos económicos y de los equipos de construcción disponibles. En grandes ríos y cuando la protección es muy importante, normalmente la primera es la adoptada, aunque es la más costosa. En ríos que llevan agua todo el año, las protecciones más económicas y fáciles de construir se logran con lo descrito en el punto 3.

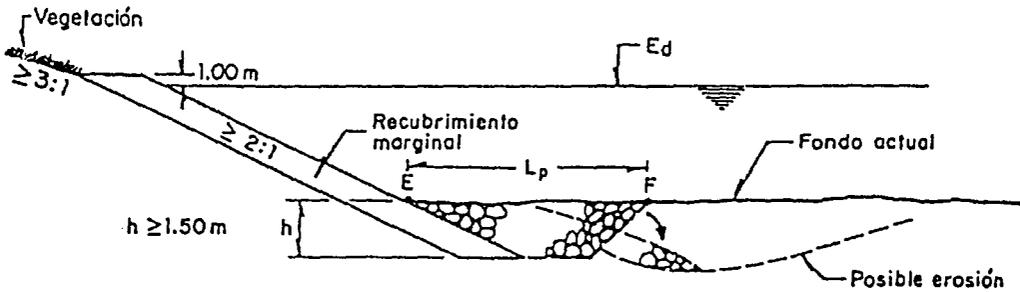
Si se comete el error de recubrir exclusivamente los márgenes sin profundizar el recubrimiento o sin formar el delantal de protección, dichos recubrimientos inevitablemente llegan a fallar. Las fallas tienen una extensión mayor cuando se utiliza concreto o mampostería. Además no se pueden reparar y se requiere construir otro nuevo revestimiento. En cambio si el recubrimiento es flexible (gaviones y colchones Reno), este puede deslizarse y aunque sea parcialmente destruido se adapta al movimiento, protegiendo la zona erosionada.

Por otra parte se debe tener en cuenta, durante el diseño, que si el río no lleva agua en estiaje se puede revisar el revestimiento, visualizar posibles erosiones y reparar

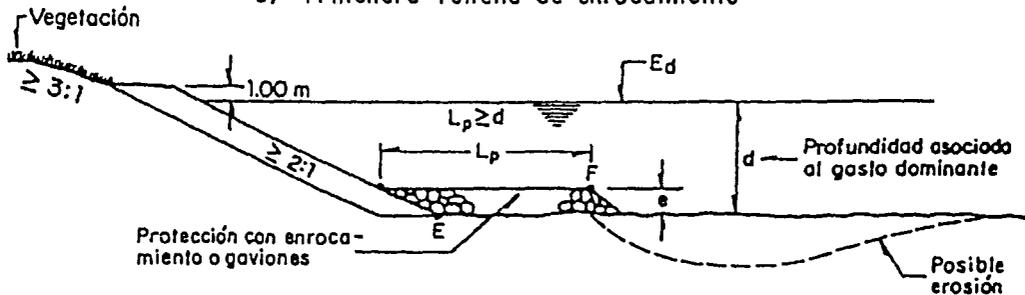
fallas incipientes. Esto no es posible cuando el río lleva agua todo el año, ya que cuando se aprecia la falla en el revestimiento en la parte fuera del agua ya ha fallado completamente en su parte sumergida.



a) Recubrimiento desplazado a una elevación inferior que la de la posible erosión



b) Trincherero relleno de enrocamiento



c) Delantal de protección

Fig. 3.15 Formas de proteger un revestimiento marginal contra la erosión

Si el revestimiento marginal se coloca en un tramo recto del río, la erosión local disminuye considerablemente, al grado que si se tiene la certeza de que el flujo siempre se desplazará paralelo al revestimiento y en el tramo no se producirá erosión general, no se requiere proteger el pie del talud.

**3.5.6 Altura de protección.** En los ríos de planicie se recomienda que la protección llegue hasta el borde superior de la orilla, es decir, que la protección abarque toda la altura de la margen.

En ríos que no son de planicie, el revestimiento marginal, se llevará un metro más arriba del nivel del agua al pasar el gasto formativo. La parte de la orilla arriba de la protección deberá tenderse con taludes entre 3:1 y 10:1 para evitar algún desprendimiento sobre la zona protegida, y se debe cubrir con vegetación del lugar para que aumente su resistencia a la erosión, la vegetación más conveniente es la más flexible, como el pasto, la que al presentarse la avenida, permite que la corriente la flexione y apoye contra la superficie del terreno con lo que la protege.

En este apartado se han mencionado algunas alternativas de protección del suelo ante la acción erosiva del agua que tiende a deformar las márgenes y fondo del canal, pueden utilizarse diferentes técnicas de revestimiento para cada tramo e incluso dentro de una misma sección. Por ejemplo un canal de sección compuesta puede estar formado por un canal principal para época de estiaje y otro canal para época de lluvias, el principal puede utilizarse un revestimiento impermeable, mientras que en el otro un revestimiento semi-permeable.

Las membranas impermeables siempre deben protegerse de agentes que en algún momento pudiesen dañarla como son: rayos solares, vidrios, alambres, latas, rocas, raíces, vegetación, vandalismo y animales.

La aplicación de almáciga bituminosa en los colchones Reno para lograr rugosidades menores e impermeabilizar los canales es de gran importancia en canales de riego y en canales que transportan sustancias peligrosas. Los gaviones sellados con almáciga bituminosa no se recomiendan, ya que requieren de gran cantidad de almáciga bituminosa, lo cual provoca que sean incosteables.

Cuando los canales se encuentran en zonas donde se requiera reforzar la resistencia a la erosión de márgenes y al mismo tiempo conservar el equilibrio ecológico, lo más pronto posible, pueden utilizarse colchones Reno y rellenarlos de tierra y sembrar vegetación flexible de crecimiento rápido.

4

PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO, VERIFICACIÓN Y  
DISEÑO DE LOS REVESTIMIENTOS EN COLCHONES  
RENO

En el diseño de estructuras de protección hidráulica donde se utilicen colchones Reno y gaviones, el diseñador debe tomar en cuenta el crecimiento de vegetación en el tiempo; tomando en cuenta dos situaciones:

- a) *Fin de instalación.* Donde el material o técnica usada para las estructuras y el coeficiente de rugosidad de Manning presentan la fuerza tractiva más baja, debido a la gran cantidad de huecos entre las piedras de relleno. Esto es, el de la situación más crítica.
- b) *Vegetación completamente crecida.* Después de algunos años el crecimiento de la vegetación consolida a la protección de las márgenes incrementando su resistencia a la erosión. La presencia de raíces de las plantas se entrelazan cubriendo prácticamente los espacios entre las piedras.

Se ha indicado que la rugosidad de un cauce es uno de los factores que más interviene en la pérdida de carga y por lo tanto, en la magnitud de los tirantes o elevaciones del agua que escurre a través de él. A mayor rugosidad, menor velocidad media, la que, para un mismo gasto, exige áreas hidráulicas mayores que, en general, se obtienen con mayores tirantes. En los escurrimientos naturales, dicha rugosidad se incrementa notablemente por la presencia de obstáculos como rocas o vegetación. Otros factores que intervienen en la pérdida de carga de los cauces naturales son las ampliaciones y reducciones de la sección, las irregularidades de las márgenes, las bifurcaciones y las curvas (Ref.31). Aquí solo se trata la vegetación, porque influye a veces más que todos los demás agentes mencionados, y su presencia puede ser controlada.

Al tratar la vegetación en cauces naturales se debe distinguir entre cauces con agua todo el año y aquellos que en época de estiaje tienen escurrimientos muy reducidos o nulos. Además, si se han construido revestimientos se debe diferenciar entre el cauce principal y el de avenidas.

En cauces principales de los ríos que llevan agua todo el año el crecimiento de la vegetación es poco significativo y la rugosidad depende, principalmente, de la granulometría del material del fondo y de las orillas y de las ondulaciones que se desarrollan en el fondo (Ref.17).

En cauces que llevan poca o nada de agua en la época de estiaje y que conservan humedad crece vegetación en el fondo, la que, salvo situaciones extremas, no es posible remover año con año en forma económica. Dos condiciones en las que necesariamente se debe remover la vegetación anualmente se comentan a continuación:

- Cuando hay poblaciones a lo largo del río. Si al obtener los perfiles del agua con y sin vegetación, la longitud del río que debe ser limpiada, frente y aguas abajo de las poblaciones, es reducida y la limpia anual es económicamente factible, el remover la vegetación es una solución que ayuda a disminuir los

desbordamientos frente a las poblaciones y a lo largo del tramo que ha sido limpiado. Cuando el régimen de los escurrimientos es subcrítico (ver 1.2.1 y 1.5.3 del capítulo 1) es indispensable limpiar un tramo aguas abajo de la población. La longitud a limpiar será la máxima necesaria para que el remanso producido por el tramo no limpiado no afecte los niveles frente a la población. Cuando el régimen es supercrítico el crecimiento de vegetación no es significativo, por lo que no se requiere remover dicha vegetación.

- Cruces de puentes. En ellos se desea que el flujo se distribuya lo más uniformemente posible en todos los claros de esas estructuras. Para lograrlo, se debe remover la vegetación 500 m aguas arriba y 200 m aguas abajo del puente.

#### 4.1 Expresión del flujo

El gasto de diseño es obtenido sobre una base de datos hidrológicos por medio de mediciones históricas de los niveles de las avenidas. Como una regla el flujo de diseño corresponde al tiempo de retorno de 100 años (Ref.17), en los cauces los cuales puedan tolerar avenidas, se pueden escoger gastos de diseño con periodos de retorno menores, aceptando inundaciones frecuentes.

La ecuación de flujo uniforme, es apropiada para diseño de canales estables no erosionables, pero no proporciona una condición suficiente para el diseño de canales erosionables. Esto se debe a que la estabilidad de canales erosionables, la cual gobierna el diseño, depende principalmente de las propiedades del material que forma el cuerpo del canal más que de la hidráulica de flujo en el canal, únicamente. Solo después de que se obtienen una sección estable para el canal erosionable puede utilizarse la ecuación de flujo uniforme (ec.3.16) para calcular la velocidad de flujo y el canal.

La velocidad del flujo en canales de fronteras fijas, con o sin revestimiento de superficie dura, que conducen agua limpia o con materiales en suspensión, debe limitarse para evitar el desgaste y la erosión continua de fondo y paredes; dicha velocidad se denomina *velocidad máxima de operación*. En la tabla 4.1 se muestran algunos valores de velocidad máxima admisible para distintos materiales, una tabla más amplia se puede consultar en la referencia 8.

*Velocidad de separación*, es la menor velocidad media del flujo que logra separar continuamente a las partículas y se designa como  $V_s$ . Para la cual la fuerza de sustentación de la partícula es casi igual a su peso sumergido. Por esta razón suele confundirse a  $V_s$  con  $V_c$ .

- a) Para la estimación de la velocidad media para materiales no cohesivos se puede usar la Fig.4.5.y 4.6,

- b) Para la *velocidad media crítica* para materiales cohesivos, se presenta la figura 4.4 para valores de *velocidad crítica media* en suelos cohesivos, elaborada con datos de la ex-Unión Soviética (Ref.8).
- c) *Velocidad crítica media en canales sinuosos*. Los criterios de *velocidad media* o *cerca del fondo* para las condiciones críticas, presentados en los incisos anteriores son válidos para canales rectos. Cuando se tienen curvas el agua erosiona más fácilmente las paredes y el valor de la *velocidad crítica* se ve afectada por un factor  $f_s$  de valor
- 0.95 poco sinuosos  
0.87 moderadamente  
0.78 muy sinuosos.

Material o tipo de recubrimiento	Tirante en m					Froude  b=10m k=2	Observaciones
	0.4	1.0	2.0	3.0	5.0 o más		
	Velocidad máxima en m/s						
Recubrimiento con gaviones convencionales	4.2	5.0	5.7	6.2	6.6	1.41	Posibilidad del desgaste de la malla y su corrosión
Arenisca dolomítica dura, arenisca silicea	3.7	4.5	5.2	5.6	5.8	1.33	Si la superficie de la roca es lisa multiplicar por 1.57
Mármol, granito, sienita (resistencia a la compresión de 156 a 196.13 Mpa).	16	20	23	25	25	5.81	Si la superficie es lisa, 25 m/s es permisible en cualquier tirante. En caso de estar agrietada o disgregada por intemperismo, los valores permisibles deben disminuir
Porfirita, andesita, diabasa, basalto, cuarzita (resistencia a la compresión de 156.91 a 196.13 Mpa)							
Recubrimiento de piedra de tamaño:							Si el recubrimiento es en dos capas multiplicar por 1.25
15 cm	2.5	3.0	3.5	3.8	3.9	0.89	
20 cm	2.9	3.5	4.0	4.3	4.4	1.02	

TABLA 4.1 Velocidades máximas, para canales de lecho y paredes fijos o recubiertos, según Mastkow (Ref.8)

Debe distinguirse entre *velocidad máxima de operación del canal* y las *velocidades de arrastre*; en la primera se toma como criterio el desgaste y la erosión de los elementos que forman al revestimiento; para el segundo caso, el inicio de movimiento de las piedras y deformación del colchón Reno. La velocidad crítica o límite no podrá ser mayor que la velocidad de operación.

#### 4.2 Elección del tipo de protección

La elección del tipo de protección ya sea en colchones Reno, gaviones o la combinación de ambos, consiste en encontrar las dimensiones en cuanto al espesor ( $s$ ), tamaño de piedras de relleno, tipo de malla y dimensiones de alambre como se muestra en la figura 4.1.

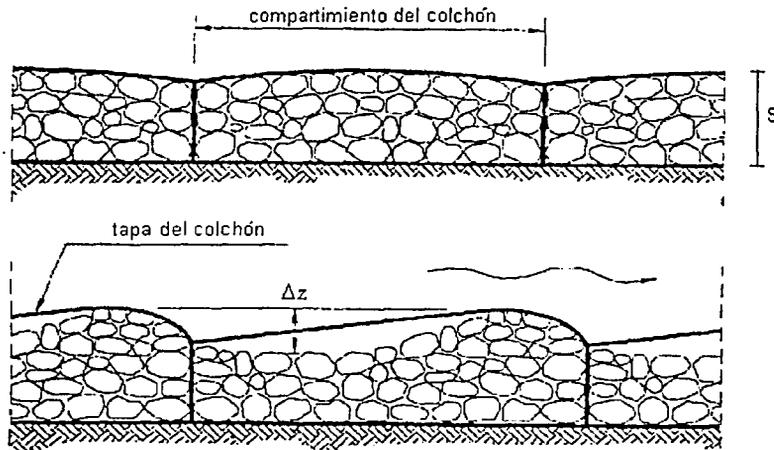


Fig 4.1 Movimiento de las rocas dentro de los colchones Reno al paso del agua, donde  $s$  es el espesor del colchón (Ref.17)

En la tabla 4.2 se presentan los espesores de los revestimientos en colchones Reno y en gaviones; en función de la velocidad de la corriente, aclarando que los valores de velocidad indicados han sido calculados experimentalmente para números de Froude  $\leq 1$ . Para valores  $>1$  se consultan las figuras 4.6 y 4.7, que se muestran mas adelante.

La velocidad límite o máxima permisible en el fondo del cauce es función directa del material que constituye al cauce, siendo menor para materiales finos y sueltos y mayor para suelos compactos. Se agrega la tabla 4.3 con algunos valores de velocidad límite en el fondo de los cauces de agua naturales. Donde (A) es la velocidad límite con transporte de material coloidal y (B) sin transporte de material coloidal.

Tipo	Espesor (m)	Piedra de relleno		Velocidad crítica* (m/s)	Froude k=2			Velocidad límite* (m/s)
		Dimensiones (cm)	d <sub>50</sub>		y=2m	y=3m	y=5m	
Colchones Reno	0.15-0.17	7-10	0.085	3.5	0.94	0.80	0.64	4.2
		7-15	0.110	4.2	1.13	0.96	0.77	4.5
	0.23-0.25	7-10	0.085	3.6	0.97	0.82	0.66	5.5
		7-15	0.120	4.5	1.22	1.03	0.82	6.1
	0.30	7-12	0.100	4.2	1.13	0.96	0.77	5.5
		10-15	0.125	5.0	1.35	1.14	0.92	6.4
Gaviones	0.50	10-20	0.150	5.8	1.57	1.32	1.06	7.6
		12-25	0.190	6.4	1.73	1.46	1.17	8.0

Tabla 4.2 Espesores indicativos de los revestimientos en colchones Reno y en gaviones en función de la velocidad de la corriente (Ref.6)

Material del cauce	Velocidad límite (m/s)	
	A	B
Arena fina	0.45	0.75
Terreno arcilloso-arenoso	0.55	0.75
Terreno arcilloso-limoso	0.60	0.90
Limos normales	0.75	1.05
Grava fina	0.75	1.50
Arcilla compactada	1.15	1.50
Grava gruesa	1.20	1.85
Guijarros y pedriscos	1.50	1.70
Arcillas esquistosas	1.85	1.85

Tabla 4.3 Velocidad límite del agua en algunos materiales (Ref.6)

En lo referente a las dimensiones de malla y alambre se tiene que consultar las especificaciones del punto 2.1

#### 4.3 Condiciones geotécnicas

Existen diferentes métodos para realizar el diseño de canales erosionables dos de ellos son: el método de la velocidad permisible y el método de la fuerza tractiva. El segundo, utiliza el esfuerzo tangencial crítico como elemento de diseño, es más recomendable, ya que dicho esfuerzo se compara con el de arrastre que produce el flujo. En él intervienen una mayor cantidad de variables del flujo y características del material para su valuación, lo que lo hace más racional.

##### *Método de la fuerza tractiva*

Este método analiza tanto la estabilidad del lecho del canal como los taludes o márgenes. Se le conoce también como método de Lane, o según el USBR, como método de la fuerza tractiva. Consiste en igualar el esfuerzo tangencial que produce el flujo con el tangencial permisible  $\tau_p$  que se adopte en el diseño, de acuerdo con el factor de seguridad y el valor de  $\tau_c$  que resiste el material antes de ser arrastrado. Se debe destacar los criterios para determinar  $\tau_c$  se aplican solo al lecho o fondo del canal. Las partículas de material sobre el talud son afectadas además por la fuerza de la gravedad, que ayuda a que rueden; por tanto, el esfuerzo tangencial permisible en el talud es menor que el del fondo. Por ello, se distingue al esfuerzo tangencial permisible en el fondo  $\tau_{pb}$ , del correspondiente  $\tau_{pt}$ , en los taludes.

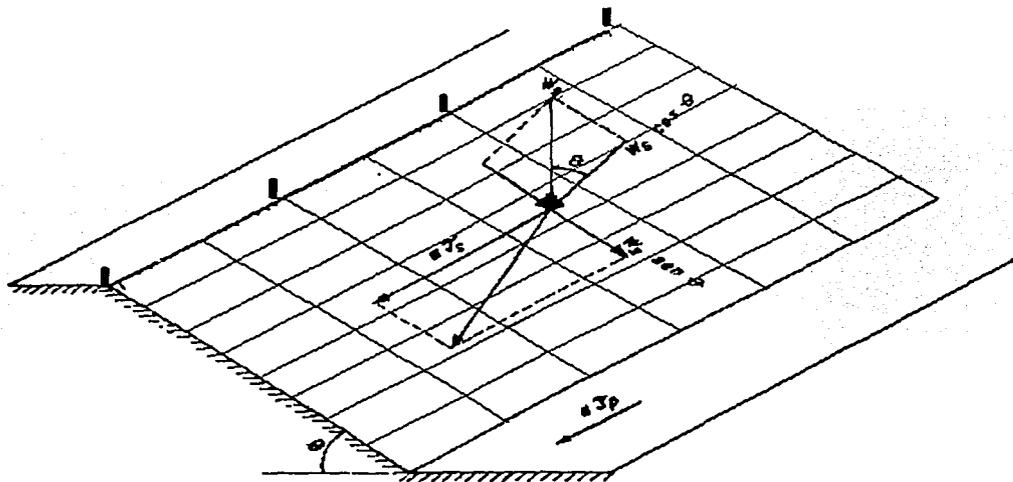


Fig. 4.2 Fuerzas actuando sobre una partícula de suelo del talud

En un canal como el que se muestra en la figura 4.2, las partículas del talud están sujetas a la fuerza tangencial crítica ( $a\tau_{pt}$ ) y la componente de la fuerza de gravedad en la dirección de la pendiente máxima del talud ( $W_s \text{sen}\theta$ ), donde  $a$  es el área efectiva de la partícula,  $W_s$  es la fuerza de gravedad sobre la partícula sumergida y  $\theta$  el ángulo de inclinación del talud respecto de la horizontal. La fuerza resultante de estas dos fuerzas perpendiculares es

$$(W_s^2 \text{sen}^2\theta + a^2 \tau_{pt}^2)^{1/2}$$

La partícula se equilibra con la fuerza de fricción ejercida sobre ella, que es igual al producto del componente de la fuerza de gravedad normal al talud, por el coeficiente de fricción interna ( $\tan \phi$ ), donde  $\phi$  es el ángulo de reposo del material

$$W_s \cos\theta \tan\phi = (W_s^2 \text{sen}^2\theta + a^2 \tau_{pt}^2)^{1/2}$$

$$\tau_{pt} = \frac{W_s}{a} \cos\theta \tan\phi \sqrt{1 - \frac{\tan^2\theta}{\tan^2\phi}}$$

En el fondo del canal,  $\theta = 0$  y la ecuación anterior es

$$\tau_{pb} = \frac{W_s}{a} \tan\phi$$

La relación  $K$  entre el esfuerzo tangencial crítico en los taludes y el esfuerzo tangencial de arrastre en el fondo es

$$K = \frac{\tau_{pt}}{\tau_{pb}} = \cos\theta \sqrt{1 - \frac{\tan^2\theta}{\tan^2\phi}}$$

o bien:

$$K = \sqrt{1 - \frac{\text{sen}^2\theta}{\text{sen}^2\phi}}$$

Donde,  $\theta$  es el ángulo de inclinación del talud y  $\phi$  es el ángulo de reposo del material o de fricción interna.

Para determinar el ángulo de fricción interna del material se hacen pruebas de laboratorio o se pueden usar los ábacos mostrados en la Fig. 4.3.

Para materiales cohesivos y no cohesivos finos, la fuerza de cohesión es muy grande si se compara con la gravitacional, y esta última se puede ignorar, es decir,  $K = 1$ , es decir.

$$\tau_s = \tau_c \sqrt{1 - \frac{\text{sen}^2 \phi}{\text{sen}^2 \theta}} \quad (4.1)$$

El esfuerzo tangencial medio de fricción  $\tau_o$  que produce el flujo se obtiene de la ecuación 2.1 resultante de las consideraciones de equilibrio dinámico impuestas al movimiento del agua en flujo uniforme. Cuando el canal es muy ancho ( $T \geq 40y$ ) el radio hidráulico es casi igual al tirante ( $R_h \cong y$ ) y  $\tau_o$  adquiere su máximo valor:  $\tau_o = g \rho y S$ .

El esfuerzo tangencial que produce el flujo no se distribuye de manera uniforme sobre el perímetro mojado en la sección del canal. De acuerdo a las mediciones del USBR en un canal trapecial de talud  $k = 2$ ,  $b / y = 4$ , el esfuerzo máximo sobre los taludes es  $= 0.75 g \rho y S$ . Y en el fondo  $= 0.97 g \rho y S$ .

Para utilizar el método se considera flujo uniforme establecido en el canal, donde se conoce el gasto que conduce, la pendiente y las características del material en el fondo y taludes.

#### 4.3.1 Comparación en términos de la fuerza tractiva

Este método esta basado en la comparación entre los esfuerzos actuantes (dependen de las características hidráulicas y geométricas) y los esfuerzos permisibles (dependen del material).

##### *El esfuerzo activo*

Para cauces naturales y canales anchos, el radio hidráulico  $R$  es igual a la profundidad del agua, es por lo tanto:

$$\text{en el fondo; } \tau_{pb} = \gamma_w y S_f \quad (4.2a)$$

Para un punto sobre la orilla de un cauce recto, en el plano horizontal; el esfuerzo  $\tau_{pt}$  es igual a:

$$\text{en el talud; } \tau_{pt} = 0.75 \gamma_w y i_f \quad (4.2b)$$

##### *Esfuerzo permisible*

Considerando el esfuerzo resistente o permisible, se define la resistencia máxima tractiva o esfuerzo máximo permitido  $\tau_c$ , como el valor critico en el cual el material del

revestimiento comienza a moverse. En el caso de suelos no cohesivos  $\tau_c$  puede ser obtenido usando la siguiente expresión:

$$\tau_c = c^* (\gamma_s - \gamma_w) d_m \quad (4.3)$$

El  $d_m$  es el porcentaje en peso del material retenido en una criba que permite pasar el  $m\%$  del total del material,  $c^*$  es el coeficiente de Shields y para colchones Reno y gaviones es aproximadamente 0.10.

El revestimiento es estable si uno puede verificar, para un punto del revestimiento

$$\text{Si en el fondo del cauce se cumple; } \tau_{pb} \leq \tau_c$$

En el caso del material no cohesivo. Debemos tomar en cuenta, el máximo esfuerzo de reducción  $\tau_s$ , por medio de un coeficiente de corrección, comparando el nuevo valor de  $\tau_s$  con el máximo esfuerzo activo  $\tau_{pt}$ , obteniendo:

$$\text{en los taludes; } \tau_{pt} \leq \tau_s$$

#### 4.3.2 Revisión de la fuerza tractiva para colchones Reno y gaviones.

En general el revestimiento es considerado como estable cuando no existe movimiento individual de las rocas. Este movimiento individual de las rocas se ve disminuido en los colchones Reno y en los gaviones, debido al confinamiento de la malla, lo que no sucede con los revestimientos en rocas sueltas.

$$\tau_s = \tau_c \sqrt{1 - \frac{\text{sen}^2 \phi}{\text{sen}^2 \theta}}$$

Nótese que esta relación es función solo de la inclinación  $\theta$  del lado inclinado del canal y del ángulo de reposos  $\phi$  del material. Para materiales cohesivos y materiales finos no cohesivos, las fuerzas de cohesión, aún en agua limpia, se vuelven tan grandes en comparación con la componente de la fuerza gravitacional que hacen que la partícula ruede hacia abajo y por consiguiente la fuerza gravitacional puede no considerarse. Por consiguiente, el ángulo de fricción interna del material necesita ser considerado solo para materiales gruesos no cohesivos. De acuerdo con investigaciones del USBR se encontró que en general el ángulo de reposo del material se incrementa tanto con el tamaño como con la angularidad del material, como se muestra en la Fig. 4.3.

Se puede asumir para colchones Reno un ángulo  $\theta = 41^\circ$ , ya que para valores de  $\theta$  41 tiende a cero y valores negativos. El programa MACMAC (ver el subcapítulo 4.5) asume un valore de  $\theta = 39^\circ$ .

### 4.3.3 Revisión de deformaciones en protecciones hechas con colchones Reno y gaviones

Cuando el esfuerzo cortante valuado en la condición crítica "inicio de movimiento", algunas rocas tienden a moverse dentro del colchón Reno como se muestra en la Fig. 4.1.

Si el esfuerzo cortante se incrementa, ocurren dos cosas: primero; de una u otra manera el revestimiento puede perder su efectividad, si la base del suelo debajo del colchón queda expuesta y dos; se puede lograr un nuevo equilibrio en que la fuerza de resistencia del alambre de acero permite cumplir dicha función.

Es muy importante evaluar el decremento de los colchones Reno, para evitar que el suelo quede desprotegido.

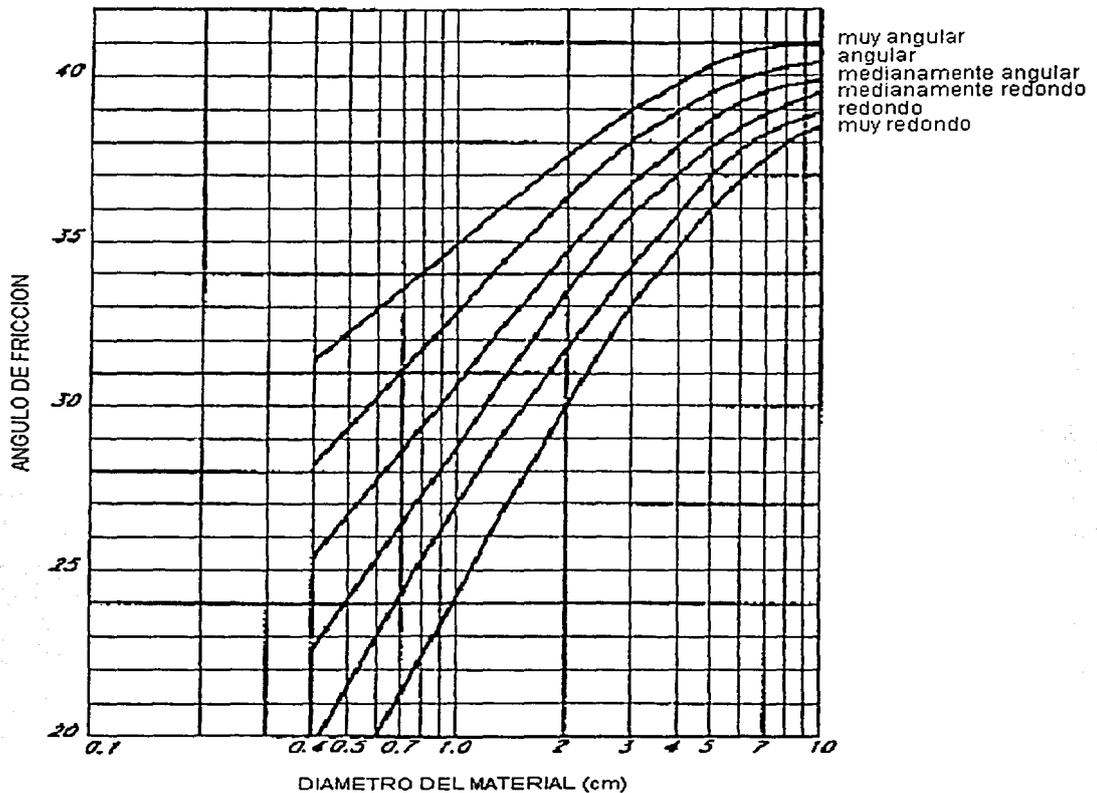


Fig. 4.3 Ábacos para obtener el ángulo de fricción interna para suelos no cohesivos (Ref.12)

Para evaluar el decremento de deformaciones en los colchones Reno se usa el parámetro  $\Delta z / d_m$ , donde  $\Delta z$  es la diferencia de alturas entre la roca más alta y la roca más baja dentro del colchón Reno como se muestra en la Fig.4.3. Podemos definir al "parámetro efectivo de Shields".

$$\text{En las orillas: } C^* = \frac{(\tau_m - \tau_s)}{(\tau_s - \tau_w) d_m} \quad (4.4a)$$

$$\text{En el fondo: } C^* = \frac{(\tau_b - \tau_c)}{(\tau_s - \tau_w) d_m} \quad (4.4b)$$

Si se conoce  $C^*$  se obtiene  $\Delta z / d_m$  de la Fig. 4.4. La reducción de espesor sobre las rocas de relleno en los colchones Reno es  $\Delta z / 2$ ; por lo tanto, para garantizar que el suelo no quede desprotegido y expuesto directo a la corriente, se debe cumplir:

$$\Delta z / d_m \leq 2 (s / d_m - 1) \quad (4.5)$$

Donde  $s$  es el espesor del colchón Reno.

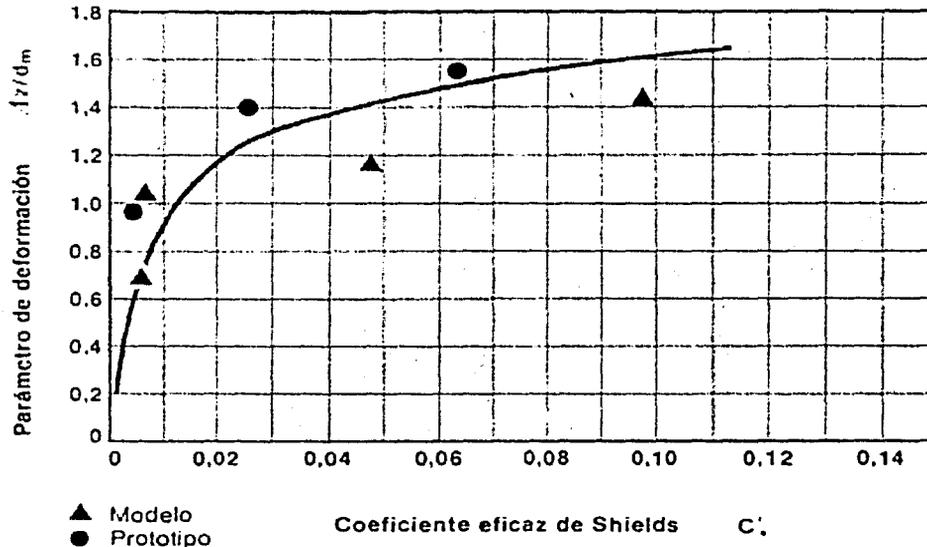


Fig.4.4 Relación entre el parámetro de deformación y el coeficiente eficaz de Shields

El mismo procedimiento para evaluar la aceptabilidad se hizo también para los colchones Reno sobre los taludes. Pruebas de laboratorio (Ref.17) se observaron

valores de  $C^*$  donde el factor  $\Delta z / d_m$  no se incrementó; por esta razón el espesor de los colchones Reno puede soportar de 1.8 a 2 veces el tamaño de las "rocas estables" soportando más las condiciones adversas, hasta la pérdida efectiva de la protección.  $\tau_{pb}$  puede exceder  $\tau_c$  pero no más del 20%; sin embargo puede exceder para cierto tipo de diseños de flujos.

#### 4.3.4 Verificación de la velocidad del agua bajo el revestimiento ( $V_b$ )

En ambos casos: colchones Reno, gaviones y rip-rap (así llamado en la literatura inglesa para designar a los revestimientos en canales hechos mediante piedras sueltas), su espesor y medida de las piedras deben resistir el movimiento causado por la corriente y prevenir la erosión del material.

Donde la velocidad del agua bajo el revestimiento  $V_b$  depende principalmente del declive del canal y del tamaño de los vacíos entre las rocas (esto es, en medio de las mismas rocas), asumiendo que la dirección predominante del flujo es paralela a la superficie o cara del colchón Reno, la velocidad puede quedar prácticamente constante en la cara, al variar las condiciones hidráulicas y espesores del colchón Reno. La velocidad bajo el colchón Reno, podemos determinar a partir de la fórmula de Manning expresada en la forma:

$$V_b = \frac{1}{n_f} \left( \frac{d_m}{2} \right)^{2/3} \sqrt{i_f} \quad (4.6)$$

Donde  $n_f$  es el coeficiente de rugosidad de Manning del filtro sobre el fondo que es igual a:

$n = 0.02$  si se usa un filtro geotextil o sin filtro bajo el colchón Reno,  
 $n = 0.025$  si se usa grava como filtro

La velocidad  $V_b$  se compara con la velocidad permisible  $V_e$  del suelo a proteger. La  $V_e$  Para suelos cohesivos se puede obtener de la Fig. 4.5. Para suelos friccionantes la expresión es:

$$V_e = 16.1\sqrt{d} \quad (4.7)$$

Donde  $V_e$  es expresada en (m/s) y  $d$  en (m) que corresponde al tamaño de la partícula de suelo retenido.

Cuando se usa el filtro geotextil, la velocidad del flujo al pasar por el geotextil se ve reducida. En la interfase con el geotextil  $V_b$  calculado con (4.6) se ve reducida en un  $\frac{1}{2}$  a  $\frac{1}{4}$  el valor de  $V_b$ , dependiendo del tipo de geotextil.

Si la utilización del filtro geotextil no permite una reducción aceptable de la velocidad bajo el revestimiento, es necesario predisponer un filtro de grava.

Tal filtro debe tener un espesor permisible entre 0.15 y 0.20 metros y un mínimo espesor de

$$S = \frac{d_v}{f} \left[ 1 - \left( \frac{v_e}{v_b} \right)^2 \right] \quad (4.8)$$

Donde  $f$  es el coeficiente de Darcy-Weisbach (puede ser asumido con  $f=0.05$ ) y  $d_v$  es el diámetro equivalente de los vacíos en metros. Esta letra puede obtenerse como 1/5 del promedio del tamaño de las partículas del filtro:

$$d_v = \frac{d_{50}^{(filtro)}}{5} \quad (4.9)$$

Finalmente para evitar erosión significativa se debe cumplir:

$$V_b \leq 2 - 4 V_e \quad (\text{usando filtro geotéxtil})$$

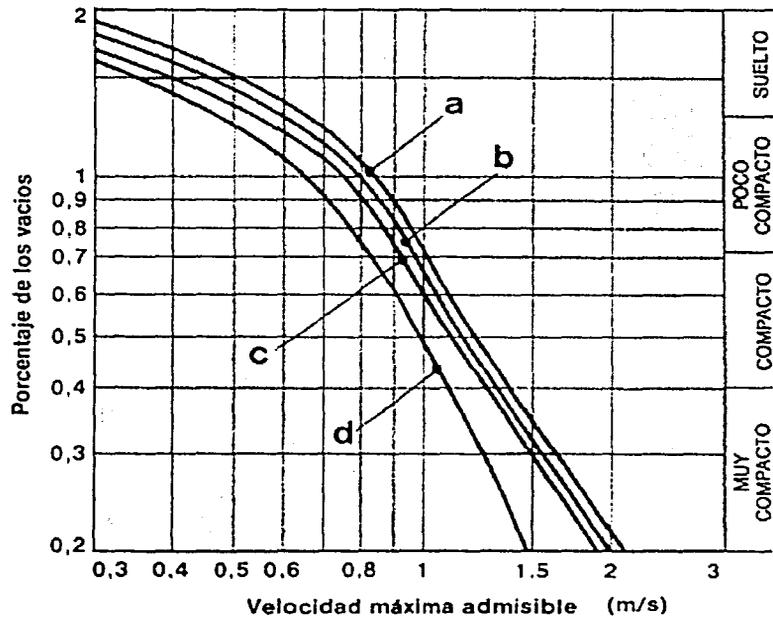


Fig. 4.5 Curvas de velocidades máximas admisibles para terrenos cohesivos: a. Arcilla arenosa, b. Tierra muy arcillosa, c. Arcilla, d. Tierra poco arcillosa

#### 4.4 Condiciones hidráulicas

Como se mencionó en el punto 4.3 la ecuación de flujo uniforme es aplicable, sólo después de que se tiene una sección de canal estable erosionable. En esta parte, sólo basta realizar la verificación en términos de la velocidad. Por medio de la obtención del Número de Froude, mediante la siguiente expresión (Ref.8):

$$F = \frac{v}{\sqrt{g \left( \frac{A}{B} \right)}}$$

Donde:

$v$  = velocidad media obtenida de la ecuación de Manning.

$g$  = tiene un valor de  $9.81 \text{ kg/s}^2$ .

$A$  = Área hidráulica.

$B$  = Ancho de la superficie libre del canal.

De las figuras 4.6 y 4.7 se calcula la velocidad crítica  $V_c$ , para que posteriormente se realice la verificación:

$$V < V_c$$

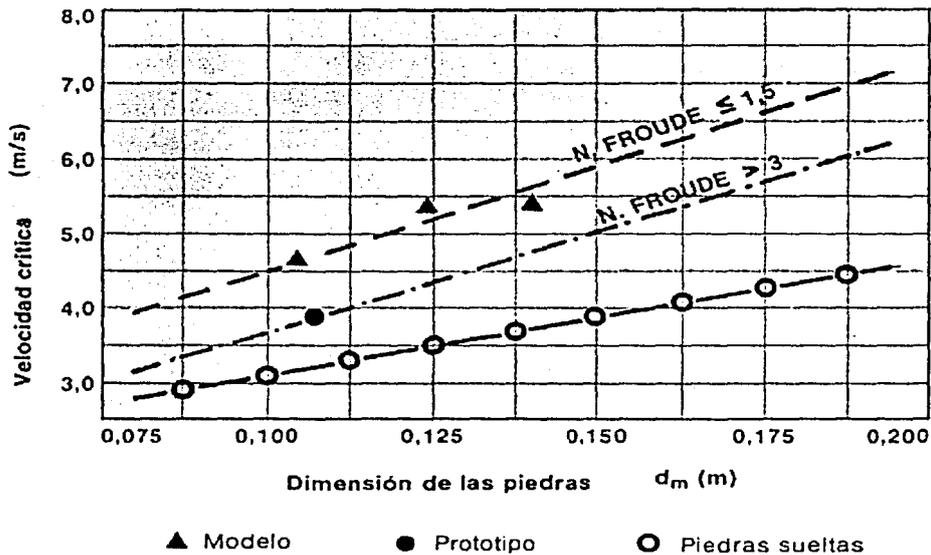


Fig. 4.6 Velocidad crítica que causa el comienzo del movimiento de las piedras en función del espesor del colchón Reno (Ref.8)

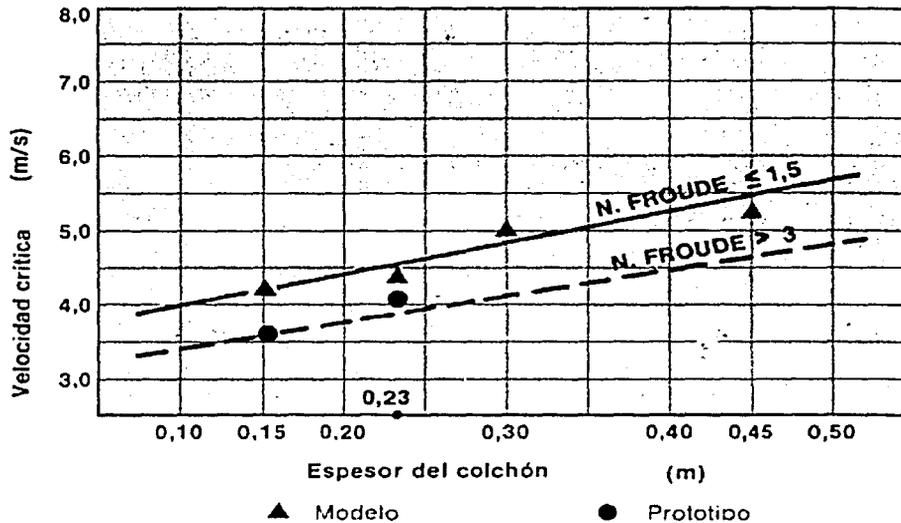


Fig. 4.7 Velocidad crítica que causa el movimiento de las piedras en función del espesor del colchón Reno (Ref.8)

#### 4.4.1 Ejemplo de diseño

El procedimiento anterior se explica mediante el ejemplo práctico que se describe a continuación

**PROBLEMA.** Se requiere que construir un canal para aguas de riego cuya sección está representada en la figura 4.8 con un tirante de agua máximo de 3.00 m. La pendiente de fondo es  $i = 0.008$ . El suelo del canal es arenoso con  $d_{50} = 0.50$  mm. Determinar los requisitos de un revestimiento en colchones Reno.

**Solución.** El diseño se hace mediante iteraciones sucesivas, proponiendo diferentes características de colchón y su revisión como se indica. Por cuestiones de espacio sólo se representa una iteración y se considera como viable, el análisis se hace únicamente al final de la instalación y se considera que el canal estará sujeto a un mantenimiento frecuente.

##### a) propuesta de las características del revestimiento

Se propone un revestimiento en colchones Reno con espesor 0.25 m en malla 5x7, diámetro de alambre 2.00 mm, dimensiones de las piedras para el relleno 100-180 mm,  $d_m = 140$  mm y  $d_{90} = 170$  mm con peso específico de  $2500 \text{ kg/m}^3$ .

En el fondo se fijarán 6 colchones Reno colocados longitudinalmente; sobre las orillas los colchones Reno estarán colocados transversalmente y serán necesarios dos elementos largos de 4.00 m, como se muestra en la figura 4.8.

a) Obtención del coeficiente de Manning

El coeficiente de Manning  $n$  puede ser obtenido utilizando la tabla 3.4 del capítulo 3 o aplicando la fórmula:

$$n = \frac{d_{90}^{1/6}}{26} = \frac{0.170^{1/6}}{26} = 0.0296 \text{ s/m}^{1/3}$$

De la tabla 3.4,  $n$  vale  $0.035 \text{ s/m}^{1/3}$  al final de la instalación

Se obtiene  $n$  como un promedio geométrico entre dichos valores obteniendo:

$$n = 0.0323 \text{ s/m}^{1/3}$$

b) variables geométricas

el área hidráulica  $A$ , el perímetro mojado  $P$ , el radio hidráulico  $R$  y el ancho de superficie libre  $B$  valen:

$$A = by + y^2 \cot \theta = 12 \times 3 + 3^2 \times 2 = 54 \text{ m}^2$$

$$P = b + 2y / \text{sen} \theta = 12 + 2 \times 3 / 0.447 = 25.42 \text{ m}$$

$$R = A / P = 2.124 \text{ m}$$

$$B = b + 2y \cot \theta = 12 + 2 \times 3 \times 2 = 24 \text{ m}$$

c) Variables del flujo

La velocidad  $v$ , el gasto  $Q$ , la tensión de arrastre en el fondo  $\tau_{pb}$ , la tensión de arrastre en los taludes  $\tau_{pt}$  y el número de Froude  $F$  se obtienen de la siguiente forma:

$$v = \frac{1}{n} R^{2/3} i^{1/2} = \frac{1}{0.0323} \times 2.124^{2/3} \times 0.008^{1/2} = 4.5 \text{ m/s}$$

$$Q = vA = 4.5 \times 54 = 243 \text{ m}^3 / \text{s}$$

$$\tau_{pb} = \gamma_w y i = 1000 \times 3 \times 0.008 = 24 \text{ kg/m}^2$$

$$\tau_{pl} = 0.75 \gamma_{pl} y i = 0.75 \times 1000 \times 3 \times 0.008 = 18 \text{ kg/m}^2$$

$$F = \frac{v}{\sqrt{\frac{gA}{B}}} = \frac{4.5}{\sqrt{\frac{9.81 \times 54}{24}}} = 0.95$$

d) Variables del material

De la figura 4.6 se obtiene  $v_c \cong 5.18 \text{ m/s}$ , entonces:

$$v < v_c \text{ verificación positiva}$$

La tensión de arrastre crítica vale para  $\gamma_s = 2500 \text{ kg/m}^3$

$$\tau_c = 0.10 (\gamma_s - \gamma_w) d_m = 0.10 (2500 - 1000) 0.14 = 21 \text{ kg/m}^2$$

Para el revestimiento de las orillas:

$$\tau_s = \tau_c \cdot \frac{1 - \frac{\text{sen}^2 \theta}{\text{sen}^2 41^\circ}}{1 - \frac{\text{sen}^2 26.5^\circ}{\text{sen}^2 41^\circ}} = 21 \times \frac{1 - \frac{\text{sen}^2 26.5^\circ}{\text{sen}^2 41^\circ}}{1 - \frac{\text{sen}^2 26.5^\circ}{\text{sen}^2 41^\circ}} = 15.4 \text{ kg/m}^2$$

entonces:

En el fondo:  $\tau_{pb} < 1.2 \tau_c$        $24 < 25.2$  verificación positiva

En las orillas:  $\tau_{pl} < 1.2 \tau_s$        $18 < 18.5$  verificación positiva

las verificaciones son positivas, el colchón de 0.25 m resulta por lo tanto suficiente para la protección el fondo y de las orillas.

e) Verificación de deformaciones

las deformaciones del revestimiento del fondo se valúan calculando el coeficiente:

$$C^* = \frac{\tau_{pb} - \tau_c}{(\gamma_s - \gamma_w) d_m} = \frac{24 - 21}{(2500 - 1000) 0.14} = 0.140$$

y en las orillas:

$$C^* = \frac{\tau_{pt} - \tau_s}{(\gamma_s - \gamma_w) d_m} = \frac{18 - 15.4}{(2500 - 1000) 0.140} = 0.012$$

De la figura 4.4, con  $C^* = 0.014$  se obtiene  $\Delta z / d_m = 1.10$

Se tiene:

$$\Delta z = 1.1 \times 0.14 = 0.154 \text{ m.}$$

Esto significa que el espesor de la parte aguas arriba de la bolsa del colchón se reducirá de  $\Delta z / 2 = 0.077 \text{ m}$  y quedará por lo tanto  $0.25 - 0.077 \text{ m} = 0.173 \text{ m}$  de espesor. Tal espesor es suficiente para no exponer el material de base a la acción erosiva de la corriente.

f) Verificación de la velocidad el agua bajo el colchón Reno  $V_b$

La velocidad  $V_b$  en el lado colchón-filtro se determina como:

$$v_b = \frac{1}{0.02} \left( \frac{d_m}{2} \right)^{2/3} i^{1/2} = \frac{1}{0.02} \left( \frac{0.140}{2} \right)^{2/3} (0.008)^{1/2} = 0.76 \text{ m/s}$$

Dado que se trata de un suelo arenoso, la velocidad que produce erosión  $V_e$  se puede calcular de la siguiente forma:

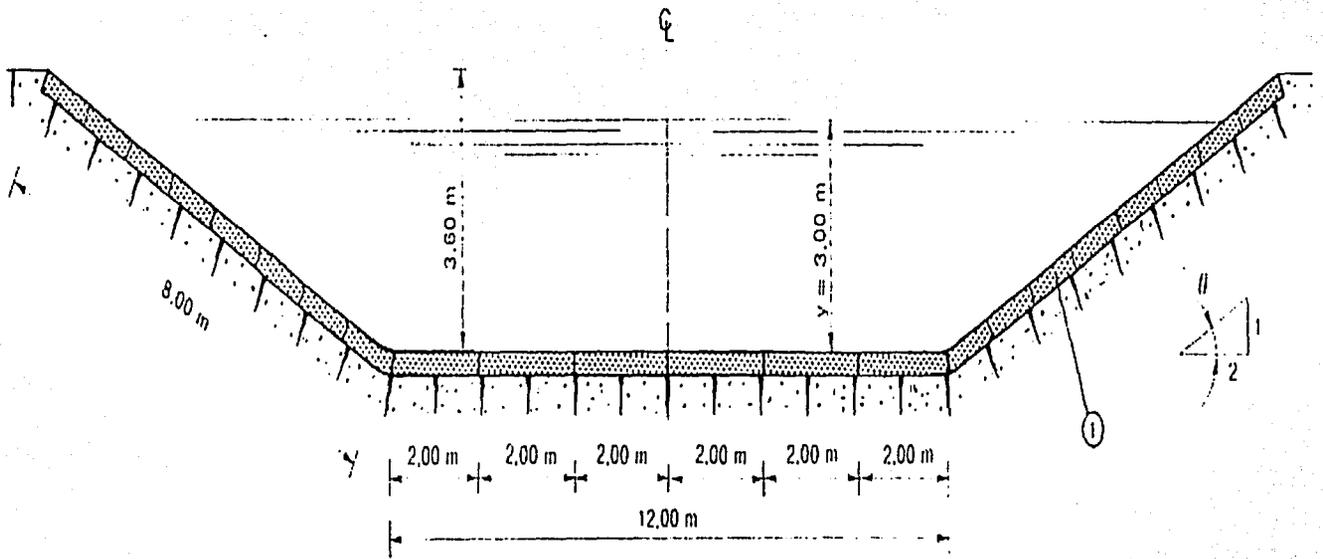
$$V_e = 16.1 d_{50}^{1/2} = 16.1 (0.0005)^{1/2} = 0.26 \text{ m/s}$$

Revisión. Al usarse un filtro geotextil se considera que la velocidad bajo el colchón  $V_b$  se reduce la tercera parte, por lo que

$$v_b \leq 3v_e \Rightarrow 0.76 \leq 3 \times 0.26 \Rightarrow 0.76 \leq 0.78 \quad \text{la verificación es positiva}$$

Dado que la velocidad bajo el revestimiento  $V_b$  es menor que la velocidad bajo la cual el suelo es arrastrado  $V_e$ , se considera como satisfactorio dicho revestimiento.

El diseño está terminado y las características se muestran en la figura 4.8; sin embargo la revisión de la velocidad bajo el colchón está muy justa y dependiendo del grado de importancia de la obra se puede prever el empleo de otro sistema de filtro por ejemplo de grava, para reducir más  $V_b$  y obtener un margen de seguridad mayor.



1 - Colchones Reno en malla tipo 5X7 - Diámetro alambre 2.00 mm - Espesor de 0.25 m

Fig. 4.8 Revestimiento de fondo y taludes del canal de riego mediante el uso de colchones Reno

#### 4.5 Diseño mediante software

Como una herramienta del proyectista se presenta el software de protección de márgenes MACRA1, que opera en un ambiente de windows. MACRA1, es una herramienta que permite al usuario, en caso de trabajos longitudinales, la verificación y planeación de los cursos de agua con relación a:

- Contención de la avenida: El rango de curva de gastos para la geometría del cauce la cual previene el desbordamiento.
- Protección contra la erosión de las márgenes: el esfuerzo cortante permisible del material o técnica usada en la estabilización de la margen debe ser mayor que el esfuerzo cortante máximo originado por el flujo de agua.

MACRA1 proporciona al usuario la rugosidad y valores de esfuerzos resistentes para la situación en el fin de instalación, el usuario debe hacer la verificación para la situación con vegetación completamente crecida. Na descripción superficial de la barra de herramientas del software se desarrolla a continuación.

Una vez que se entra a MACRA1, se presenta la barra del menú (Fig. 4.9), con cinco diferentes opciones que son:

*Menú file.* Con funciones muy parecidas a las de Word como: nuevo análisis, abrir archivo, cerrar archivo, guardar archivo, imprimir, entre otras.

*Menú opciones.* Cuenta con funciones de cambio de idioma (Italiano, ingles, francés y español), sistema de unidades (internacional e ingles) y color de pantalla.

*Menú de calculo.* Se encuentra la opción grado de curva (gráfica Y Vs Q), otra función realiza los cálculos indicados en 4.3.1.

*Menú fórmula.* Función peso específico del flujo, si no corresponde a 1000 Kg/m<sup>3</sup>.

*Menú ayuda (help).* Es una guía sobre el software de protección de márgenes. Para entrar solo presionar la tecla F1.

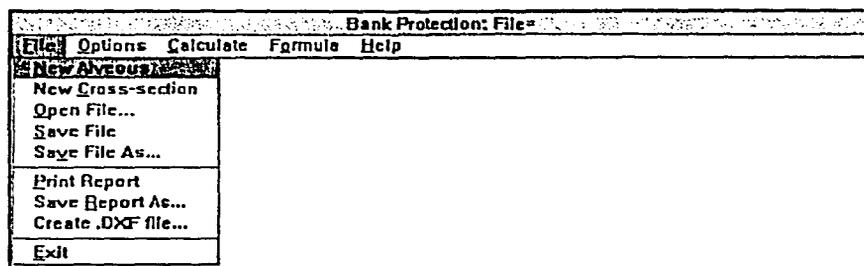


Fig. 4.9 Barra de herramientas (Ref.17)

#### 4.5.1 Variables de entrada

Se requiere del diseñador para introducir los datos generales y los parámetros específicos al programa que se mencionan a continuación:

Datos generales del cauce:

Gasto de diseño ( $Q_p$ )  
Pendiente del lecho del cauce ( $i$ )  
Geometría del cauce.

Parámetros específicos:

Una vez seleccionada la sección transversal y dividida en segmentos (la Fig. 4.9 muestra un canal dividido en 6 segmentos) se requiere proporcionar los parámetros específicos para cada segmento, en particular:

*Altura.* Elevación de la parte más baja al segmento seleccionado (m), referido al lecho del cauce.

*Pendiente.* Pendiente del segmento en términos de  $y/x$ .

*Longitud.* Longitud efectiva del segmento

*Grado de curvatura.* El programa automáticamente da un valor de uno, en caso de que exista se debe especificar el grado.

*Velocidad límite.* Velocidad máxima admisible para el material de protección

*Ángulo de fricción.* Ángulo de fricción del material del material.

#### 4.5.2 Desarrollo

Una vez que se tienen los datos anteriores se indica el número de subsegmentos (Fig. 4.9). Aquí se especifica la longitud y tipo de material (colchones Reno, gaviones u otras técnica de bioingeniería). Dependiendo del tipo de revestimiento el programa automáticamente proveerá el coeficiente de rugosidad más relevante, el espesor y el diámetro promedio del material de protección. El programa sugiere introducir un valor para el coeficiente de rugosidad y esfuerzos permisibles, los cuales pueden ser el resultado de la experiencia personal. La tabla 3.2 puede ser usada para obtener el coeficiente de rugosidad para corrientes naturales, de acuerdo a los materiales constituyentes de cauce. Cuando el material no esta en alguna de las tablas, el usuario puede introducir algún material el cual sea conocida su rugosidad y su esfuerzo crítico.

Cuando se divide la sección en segmentos, cada uno de éstos tiene sus propias características de flujo y de material. El gasto total será obtenido como la suma de las contribuciones de cada segmento. Durante los cálculos, el programa considera diferentes canales paralelos con el mismo nivel de agua y cero esfuerzos a lo largo de sus márgenes.

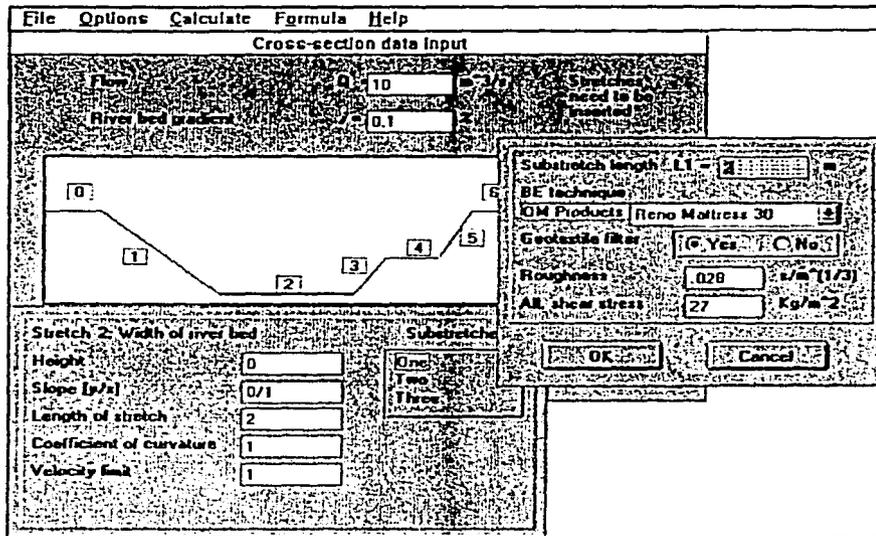


Fig. 4.9 Sección transversal del canal dividida en 6 segmentos (Ref. 19)

Este programa conduce los cálculos del rango de curva de gastos paso por paso, dividiendo la altura total entre la pendiente del cauce y el nivel del suelo en 20 segmentos iguales. Por lo tanto inicia un nivel del agua igual  $f_p/20$  el programa calcula la descarga para cada segmento. Antes de proceder al siguiente nivel de agua, el programa revisa si  $Q_k$  es más bajo que  $Q_p$ ; si la condición no se satisface el programa busca, por iteraciones sucesivas, para el nivel del agua,  $Y_{m\acute{a}x}$  corresponde a  $Q_p$ . Si existe un error se desplegará un mensaje informando al usuario que la sección seleccionada no podrá conducir el gasto de diseño.

#### 4.5.3 Resultados

Una vez completada la serie de parámetros para cada uno de los segmentos, el programa automáticamente hace la corrida. A manera de ejemplo se muestra la figura 4.10 con los diferentes segmentos (números) y subsegmentos (letras). La Fig. 4.11 es un ejemplo de la gráfica (curva de gastos) que se obtiene como resultado de los datos de entrada.

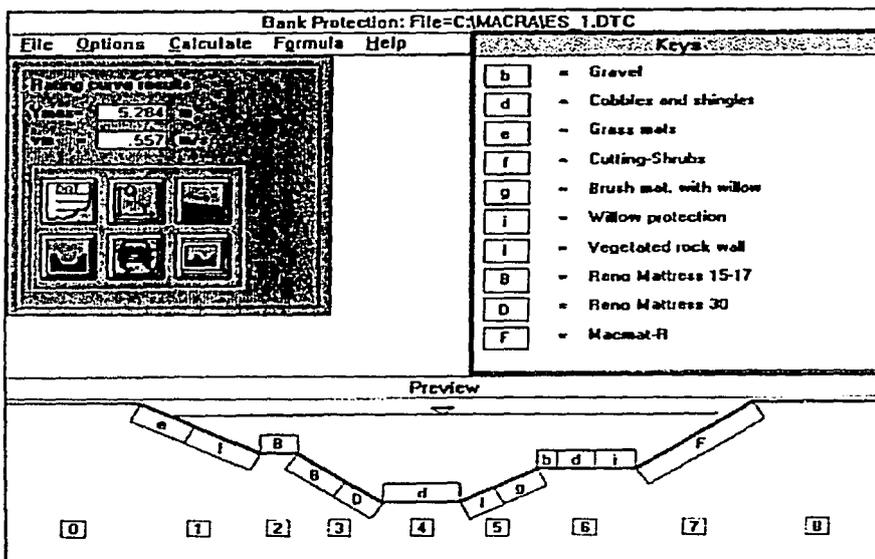


Fig. 4.10 Ejemplo de segmentos y subsegmentos para la sección transversal (Ref. 19)

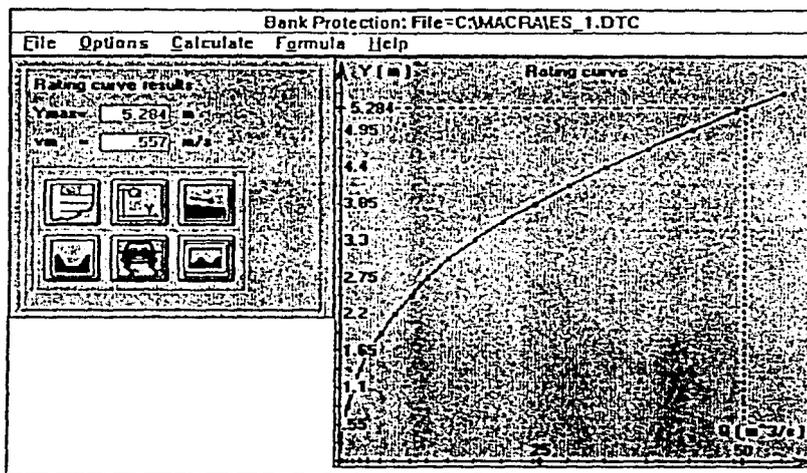


Fig. 4.11 Grado de curva del gasto (Ref. 19)

#### 4.5.4 Análisis de resultados.

La Fig. 4.12 corresponde a un ejemplo de revisión de resultados para cada segmento. Dicha revisión se hace tomando en cuenta lo especificado en los puntos 4.3 y 4.4 de este capítulo. Será finalmente el diseñador quien evalúe los segmentos

de mayor importancia, los cuales deberán estar más protegidos de las corrientes de agua asignando valores que garanticen dicha protección.

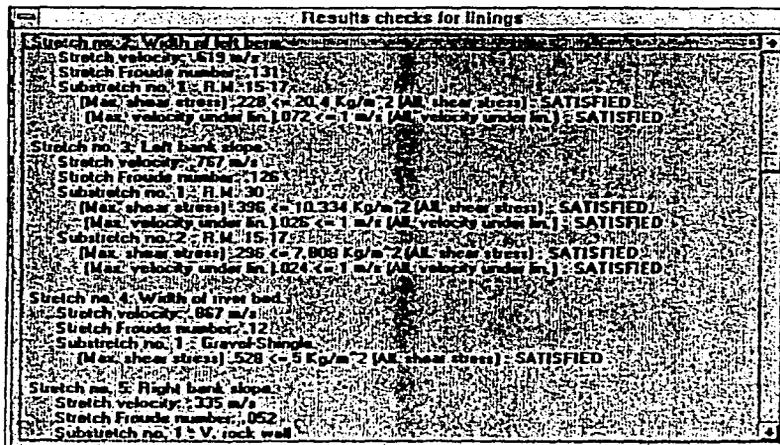


Fig. 4.12 Verificación de resultados (Ref. 19)

En este apartado se han dado los elementos de diseño de revestimientos usando colchones Reno, tomando como base el método de la fuerza tractiva que es fácil de aplicar y que ha dado resultados muy satisfactorios demostrados en laboratorio. Existen otros métodos de diseño de revestimientos mucho más complejos que involucran mucho más características tanto del suelo como del flujo como por ejemplo el propuesto por Pilarhsky (Ref. 25) que ofrece resultados muy parecidos.

En un proyecto de revestimiento de un canal es imprescindible conocer las características de dicho canal, particularmente su geometría, su régimen hidrológico y el de avenidas y si transporta sólidos o no. La geometría e hidrología deben estar presentes en la concepción del trazado y de las secciones, anchura, pendiente, curvatura. El transporte de sólidos y el estados de equilibrio nos informa de la estabilidad del encauzamiento.

Un cauce natural es un sistema dinámico, por lo que se tiene que estudiar las condiciones nuevas impuestas por el revestimiento. Una protección parcial puede engendrar más inestabilidad que la protección que pretende. Así pues, puede ocurrir con un revestimiento corto: el flujo a la salida del tramo recupera sus condiciones de flujo anteriores y esta transición de uno a otro flujo puede ser más destructiva que el flujo anterior. El problema se agrava cuanto más aumenta la velocidad media del tramo encauzado respecto a la que prevalece fuera del tramo protegido.

5

COMPARACIÓN ENTRE UN REVESTIMIENTO EN  
COLCHONES RENO Y GAVIONES Y UN  
REVESTIMIENTO EN RIP-RAP

En el capítulo anterior se realizó un diseño de revestimientos con colchones Reno, en esta parte se realizará el diseño del revestimiento en rip-rap (llamado así en la literatura inglesa, algunos sinónimos de este término considerados en este trabajo son; enrocamiento y piedras sueltas), usando los mismos datos y el mismo método de diseño (fuerza tractiva).

### 1. Diseño de un revestimiento en rip-rap

Del ejemplo anterior se tienen las parámetros geométricos:

$$\begin{aligned} A &= 54 \text{ m}^2 \\ P &= 25.42 \text{ m} \\ R &= 2.124 \text{ m} \\ B &= 24 \text{ m} \end{aligned}$$

El esfuerzo sobre el canal:  $\tau_b = 24 \text{ kg/m}^2$

#### a) Características del rip-rap

Según Simón (Ref.31), recomienda usar un factor de 1.3, de tal forma que:

$$\tau_c = 1.3\tau_b$$

$$\text{Diámetro medio de las piedras: } d_m = \frac{\tau_c}{C_s(\gamma_s - \gamma_w)} = \frac{1.3 \times 24}{0.04(2500 - 1000)} = 0.51 \text{ m}$$

se asume un valor de  $d_m = 0.5 \text{ m}$ .

El espesor del revestimiento ( $s$ ), puede ser calculado de la siguiente manera, según Gianluigi (Ref.31):

$$\text{Espesor del revestimiento: } s = 2 d_m = 2 \times 0.5 = 1 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} d_{\min} &= 0.50 d_m = 0.25 \text{ m} \\ d_{\max} &= 1.5 d_m = 0.75 \text{ m} \\ d_{90} &= 0.97 d_{\max} = 0.73 \text{ m} \end{aligned}$$

donde;  $d_{\min}$  y  $d_{\max}$  son los diámetros de las piedras a utilizar mínimo y máximo respectivamente.

$$\text{Coeficiente de rugosidad: } n = \frac{d_{90}^{1/6}}{26} = 0.0365 \text{ s/m}^{1/3}$$

$$\text{Velocidad y gasto: } V = \frac{R^{2/3} i^{1/2}}{n} = \frac{2.124^{2/3} \times 0.008^{1/2}}{0.0365} = 4 \text{ m/s}; Q = VA = 216 \text{ m}^3/\text{s}$$

b) Revisión de estabilidad

Esfuerzo actuando sobre el revestimiento en el fondo:  $\tau_b = 24 \text{ kg/m}^2$

Esfuerzo crítico sobre el fondo:  $\tau_c = C \cdot (\gamma_s - \gamma_w) d_m = 0.04(2500 - 1000)0.5 = 30 \text{ kg/m}^2$

Esfuerzo actuando sobre el revestimiento en el talud:  $\tau_m = 0.75\tau_b = 18 \text{ kg/m}^2$

Esfuerzo crítico del revestimiento en los taludes:

$$\tau_s = \tau_c \cdot \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta}{\sin^2 \phi}} = 30 \cdot \sqrt{1 - \frac{\sin^2 26.56}{\sin^2 41}} = 21.95 \text{ kg/m}^2$$

Verificación:  $\tau_b = 24 < 30 = \tau_c$ ;  $\tau_m = 18 < 21.95 = \tau_s$ . La verificación es positiva, por lo que el revestimiento es estable.

c) Revisión contra erosión

Velocidad bajo el revestimiento ( $V_b$ )

Asumiendo que el flujo pasa por los huecos de entre las rocas, se puede usar la ecuación de Manning con un nuevo valor de  $R_h$  y  $n_f$  que corresponde a la rugosidad del filtro. Donde:  $R_h = d_m/2$  y  $n_f = 0.025$  según recomendaciones de Simón (Ref.31)

$$V_b = \frac{1}{n_f} \left( \frac{d_m}{2} \right)^{2/3} i^{1/2} = \frac{1}{0.025} \left( \frac{0.5}{2} \right)^{2/3} \times 0.008^{1/2} = 1.42 \text{ m/s}$$

Velocidad mínima ( $V_{es}$ ) que causa erosión en la base del suelo, donde  $d_{50} = 0.50 \text{ mm}$ , se obtiene de la siguiente manera:

$$V_{es} = 16.1 \sqrt{d_{50}} = 16.1 \sqrt{0.0005} = 0.26 \text{ m/s}$$

Verificación:  $V_{es} < V_b$  por lo que se tiene que predisponer un filtro, de tal forma que  $V_b < V_{es}$  y de esta forma evitar erosión de suelo bajo el revestimiento.

Un filtro de geotéxtil reduce de 2 a 4 veces la  $V_b$ ; por lo que se obtiene para el valor máximo de reducción:  $V_b / 4 = 0.355 \text{ m/s}$  que no es menor que  $0.26 \text{ m/s}$ , por lo que tendrá que diseñar un filtro de grava. Aclarando que cuando se usaron colchones Reno no se diseñó un filtro de grava, ya que fue suficiente un filtro geotéxtil. En este diseño el revestimiento es estable para las condiciones hidráulicas.

2. Gasto máximo que puede transportar el canal antes de que ocurra la falla en el revestimiento de rip-rap.

La condición que define esta falla es cuando:  $\tau_m = \tau_s = 22 \text{ kg/m}^2$

$$\text{Tirante para la situación crítica de falla es: } y_c = \frac{\tau_s}{0.75\gamma_w i} = \frac{22}{0.75 \times 1000 \times 0.008} = 3.6 \text{ m}$$

con este tirante se obtienen los siguientes parámetros geométricos:

$$B_c = 26 \text{ m}; A_c = 69.12 \text{ m}^2; P_c = 28.1 \text{ m}; R_c = 2.46 \text{ m}$$

$$\text{La velocidad y el gasto son: } V_c = \frac{R^{2/3} i^{1/2}}{n} = \frac{2.46^{2/3} \times 0.008^{1/2}}{0.0365} = 4.46 \text{ m/s}$$

$$Q_c = V_c A_c = 308.66 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{Coeficiente de seguridad respecto al gasto: } \eta = \frac{Q_c}{Q} = \frac{308.66}{216} = 1.43$$

3. Gasto máximo que puede conducir antes de la falla del revestimiento en colchones Reno.

En este caso se toma en cuenta la máxima deformación máxima permisible del colchón y se obtiene de la siguiente forma:

$$\frac{\Delta z}{dm} = 2 \left( \frac{s}{d_m} - 1 \right) = 2 \left( \frac{0.25}{0.14} - 1 \right) = 1.57$$

Esfuerzo crítico en el talud:

$$\tau_{mc} = C_s (\gamma_s - \gamma_w) d_m + \tau_s = 0.10(2500 - 1000)0.14 + 15.4 = 36.4 \text{ kg/m}^2$$

Esfuerzo crítico en el fondo:

$$\tau_{bc} = C_s (\gamma_s - \gamma_w) d_m + \tau_{cs} = 0.10(2500 - 1000)0.14 + 21 = 42 \text{ kg/m}^2$$

Tirante crítico con deformación del colchón en el talud:

$$y_c = \frac{\tau_{mc}}{0.75\gamma_w i} = \frac{36.4}{0.75 \times 1000 \times 0.008} = 6 \text{ m}$$

Tirante crítico con deformación del colchón en el fondo:

$$y_c = \frac{\tau_{mc}}{\gamma_w i} = \frac{42}{1000 \times 0.008} = 5.25 \text{ m}$$

A partir del tirante crítico de 5.25 m se obtienen los parámetros geométricos:

$$A_c = 118.125 \text{ m}^2; P_c = 35.49 \text{ m}; R_c = 3.3 \text{ m}$$

Debido a la deformación el coeficiente de rugosidad de Manning, se incrementa en un 5% aproximadamente, obteniéndose

$$n_c = 1.05 \times 0.0323 = 0.0339$$

$$\text{La velocidad y el gasto son: } V_c = \frac{R^{2/3} i^{1/2}}{n} = \frac{3.3^{2/3} \times 0.008^{1/2}}{0.0339} = 5.85 \text{ m/s};$$

$$Q_c = V_c A_c = 691 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{Coeficiente de seguridad respecto al gasto: } \eta = \frac{Q_c}{Q} = \frac{691}{243} = 2.8$$

La limitación del gasto es la capacidad de la sección transversal total ( $y = 3.6 \text{ m}$ ), no de eficiencia del revestimiento.

$$\text{Para } y_{\text{máx}} = 3.6 \text{ m, se tiene: } A_{\text{máx}} = 69.12 \text{ m}^2; P_{\text{máx}} = 28.1 \text{ m}; R_{\text{máx}} = 2.46 \text{ m}$$

La velocidad y gasto máximo del flujo es:

$$V_{\text{máx}} = \frac{R^{2/3} i^{1/2}}{n} = \frac{2.46^{2/3} \times 0.008^{1/2}}{0.0339} = 4.8 \text{ m/s}; Q_{\text{máx}} = V_{\text{máx}} A_{\text{máx}} = 332 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{Esfuerzo máximo en el fondo: } \tau_{b\text{máx}} = \gamma_w y_{\text{máx}} i = 1000 \times 3.6 \times 0.008 = 28.8 \text{ kg/m}^2$$

$$\text{Esfuerzo máximo en los taludes: } \tau_{m\text{máx}} = 0.75 \tau_{b\text{máx}} = 21.6 \text{ kg/m}^2$$

### 3.1 Análisis de deformaciones

parámetro de máxima deformación en el fondo:

$$C_{*máx} = \frac{\tau_{smáx} - \tau_c}{(\gamma_s - \gamma_w) d_m} = \frac{28.8 - 21}{(2500 - 1000) 0.14} = 0.037; \text{ de la figura 4.4 } \Rightarrow \frac{\Delta z}{d_m} = 1.36$$

Parámetro de máxima deformación en los taludes:

$$C_{\text{máx}} = \frac{\tau_{\text{máx}} - \tau_s}{(\gamma_s - \gamma_w) d_m} = \frac{21.6 - 15.4}{(2500 - 1000) 0.14} = 0.029; \text{ de la figura 4.4} \Rightarrow \frac{\Delta z}{d_m} = 1.28$$

la máxima deformación se presenta en el fondo, donde:

$$\Delta z = 1.36 d_m = 1.36 \times 0.14 = 0.19 \text{ m}; \frac{\Delta z}{2} = 0.095 \text{ m}$$

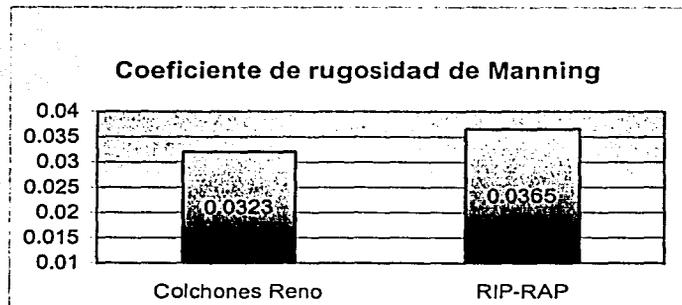
$$\text{mínimo espesor permitido: } S_{\text{min}} = s - \frac{\Delta z}{2} = 0.25 - 0.095 = 0.155 \text{ m}$$

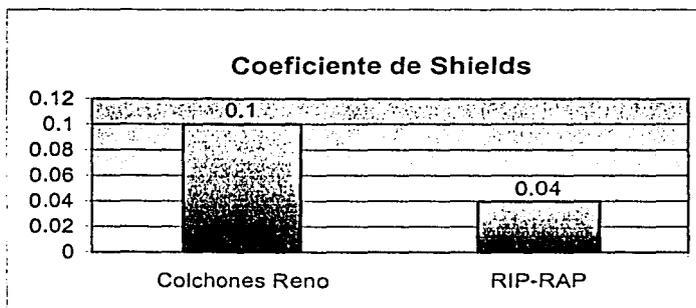
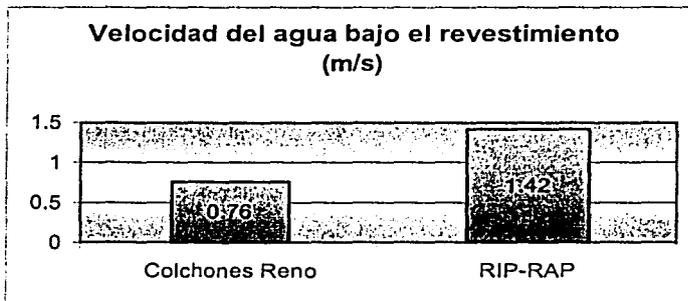
$$\frac{S}{2} = \frac{0.25}{2} = 0.125 \text{ m}; S_{\text{min}} = 0.155 > 0.125 = S / 2$$

El espesor es suficiente para evitar que el suelo quede desprotegido ante la deformación para el gasto máximo.

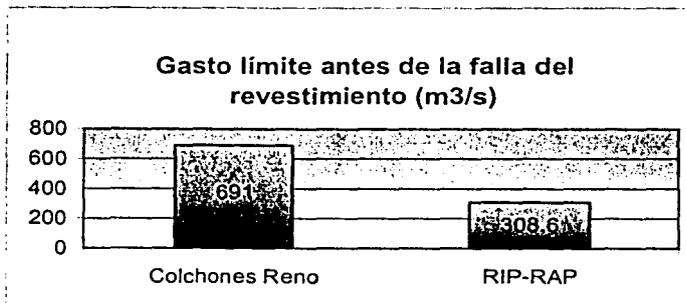
Los resultados del análisis anterior se representan en las siguientes gráficas para las condiciones normales, condiciones máximas considerando la capacidad máxima del revestimiento (falla por erosión de partículas) y los factores de seguridad para los revestimiento en rip-rap y en colchones Reno.

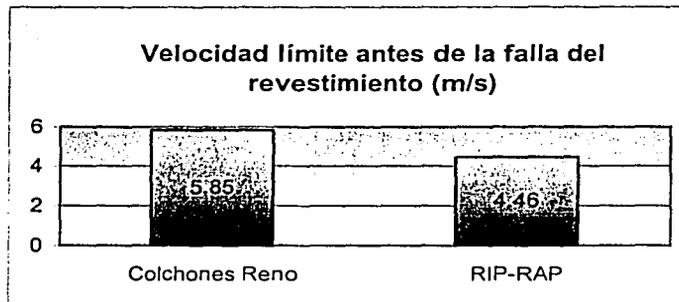
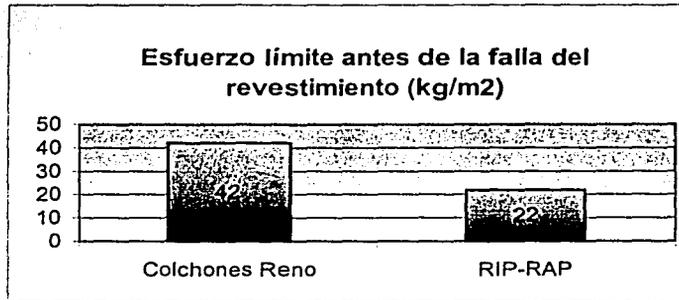
Condiciones normales



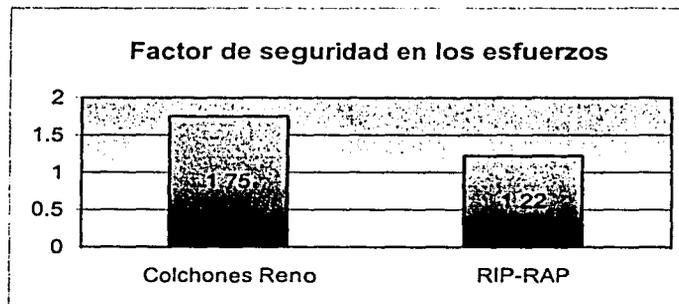


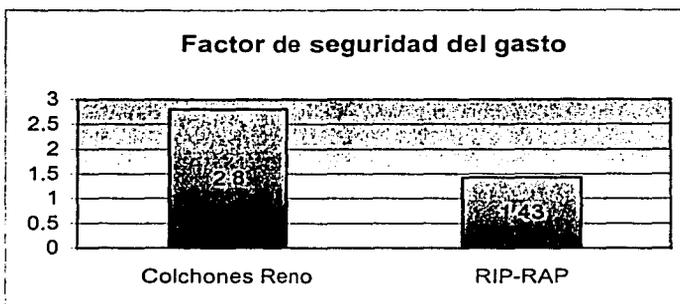
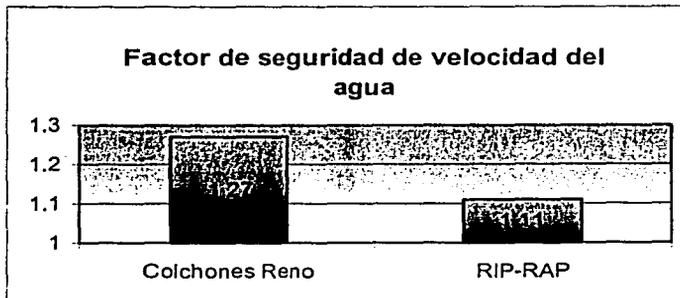
Condiciones máximas considerando la capacidad máxima del revestimiento (falla por erosión de partículas).





**Factores de seguridad**





Como puede observarse el revestimiento hecho mediante colchones Reno tiene mejores características que los hechos en rip-rap.

A continuación se presenta una serie de ventajas del colchón Reno y gavión en lo referente a los aspectos: social, ambiental y estético, técnico, construcción y mantenimiento sobre revestimientos en rip-rap.

#### ASPECTO SOCIAL

- La construcción de colchones Reno no requiere mano de obra calificada.
- La construcción de gaviones y colchones Reno es muy sencilla y rápida. Los costos de mano de obra son menores, es posible capacitar rápidamente trabajadores calificados para armar los gaviones, rellenarlos y sujetarlos. Todo esto hace que esta forma de revestir sea factible de ser utilizada entre la población rural, que puede participar en la construcción y mantenimiento.

## ASPECTO AMBIENTAL Y ESTETICO

- Los revestimientos realizados mediante colchones Reno y gaviones son ambientalmente y estéticamente la mejor opción, protegiendo la margen del cauce sin alterar el contorno natural, sin poner en riesgo el desarrollo de la flora y fauna local; ya que es posible la siembra de pasto o hierba para acelerar el reestablecimiento natural sin poner en riesgo la estabilidad del revestimiento.

## ASPECTO TÉCNICO

- El espesor del revestimiento es uniforme.
- El coeficiente de Shields es mayor que el del rip-rap lo que significa que el esfuerzo crítico de la estructura es mas alto y por consiguiente resiste un mayor esfuerzo provocado por la corriente; en piedras sueltas es de 0.04 aproximadamente; mientras que en colchones Reno es de 0.10.
- De la condición anterior se deduce, que bajo las mismas condiciones hidráulicas, las dimensiones de las piedras a utilizar en los colchones Reno y gaviones, son la mitad o menores con respecto a las de un revestimiento en rip-rap. Por la misma razón, utilizando las mismas piedras, la velocidad que puede soportar los gaviones y los colchones Reno es de dos a tres veces mas a la que puede soportar el rip-rap.
- Para la condición de inicio de movimiento de las piedras para el rip-rap, es la condición límite, cuando se sobrepasa este límite el revestimiento se destruye progresivamente porque sus elementos son arrastrados por la corriente. En cambio; en estructuras de colchones Reno y gaviones, después de los primeros movimientos adquiere mayor influencia a la acción de contención de la red metálica hasta obtener otra nueva situación de equilibrio.
- Debido a las menores dimensiones de las piedras utilizadas en los colchones Reno y gaviones, la velocidad residual, que efectivamente actúa sobre el material del fondo, es menor y, por lo tanto, aumenta la seguridad, permitiendo reducir la capa de filtración bajo el revestimiento.
- Debido a las dimensiones menores de las piedras en los colchones Reno y en los gaviones y a su buena ordenación se reduce la rugosidad, aumentando por lo tanto, el gasto del cauce.
- Los revestimientos en colchones Reno y gaviones pueden tener un espesor muy reducido. De las curvas de la figura 5.2 se deduce que las probabilidades de ruptura, por socavación al pie del revestimiento en colchones Reno y gaviones son muy inferiores con respecto al rip-rap.

- La descarga máxima que puede soportar un revestimiento tomando en cuenta la deformidad máxima del colchón es de alrededor 2 a 3 veces el gastos que se toma como de diseño para cada caso en estudio.
- El efecto de traslación, en rip-rap la resistencia de fricción a lo largo de la interfase entre el revestimiento y la base del material se ve reducida lo que ocasiona la traslación de piedras ocasionando la rápida erosión. En cambio las estructuras en colchones Reno y gaviones son continuas (monolíticas) lo que evita que la traslación individual de la estructura, cuando existe el riesgo de posibles traslaciones se coloca un *diente de gavión*, ya sea continuo o escalonado en el perímetro mojado de la sección revestida.
- Dado que, el espesor del revestimiento en rip-rap es mayor que el colchones Reno bajo las mismas condiciones hidráulicas, el espesor del filtro hecho con elementos pétreos es también superior.
- El efecto de vorticidad es menor, el buen acomodo y el tamaño menor de las piedras disminuyen dicho efecto.
- Los taludes de los canales a proteger pueden ser desde casi horizontales hasta verticales.

#### CONSTRUCCIÓN Y MANTENIMIENTO

- Los elementos de relleno del colchón y gavión, generalmente se encuentran muy cercanos a la obra e incluso dentro del mismo río y pueden ser colocadas directamente por equipos mecánicos o peones, ya que son de dimensiones pequeñas.
- El gado de mantenimiento consiste básicamente en quitar los arbustos que estén fuera de lo permitido y la colocación de tapas.
- Los costos de excavación y relleno son menores hasta de un 50%.
- Los espesores de los filtros de elementos pétreos son menores, disminuyendo el tiempo de construcción.
- La vida útil es función de la calidad de la malla, rocas y de su procedimiento de construcción. Cuando se tiene un mantenimiento adecuado se tiene vidas útiles de entre 15 y 30 años; aunque se tiene registros de hasta 100 años siendo económicamente factibles (*Ref.6*).

#### Desventajas de los colchones Reno y gaviones.

- La malla de los colchones Reno y gaviones esta sujeta a la corrosión, a pesar de estar galvanizada, cubierta de PVC y otros elementos, debido a malos manejos y descuidos en la colocación de las piedras.
- La falta de información suficiente para tener una mejor visión de los procedimientos.
- De lo anterior se desprende la muy poca experiencia en revestimientos en cauces naturales y artificiales usando estas técnicas.
- Requieren gran cantidad de jornaleros. En algunas zonas la mano de obra es muy reducida, lo que puede originar grandes intervalos de tiempo en realizar la obra y acrecentar su costo.

#### Ventajas del rip-rap sobre los colchones Reno

- La mano de obra en la construcción es menor.
- Permite el uso de equipo mecánico (retroexcavadoras, palas mecánicas, etc) en todo el procedimiento de construcción. En los colchones Reno y gaviones las operaciones de amarre se realizan manualmente.
- El efecto de la rugosidad en los taludes no siempre es negativa. El incremento de rugosidad reduce la velocidad del agua en la parte exterior de las curvas y aleja de la orilla a las líneas de corriente con mayor velocidad. El efecto señalado, es favorable para el recubrimiento, ya que se reduce la magnitud de la erosión al pie de su talud y la zona más profunda del río se aleja de la orilla exterior.

En este apartado se realizó una comparación entre dos formas de revestir muy parecidas, ya que ambas requieren del mismo material (piedras), por lo que su aplicación estará condicionada a la calidad y cantidad de material existente en la zona donde se realicen los trabajos de revestimiento.

6

PROCESO CONSTRUCTIVO DEL GAVIÓN Y DE LOS  
COLCHONES RENO

El proceso de construcción de estructuras hechas mediante gaviones y colchones Reno puede ser de diferentes maneras, pero cada una de ellas deberán de garantizar su integridad al presentarse las solicitudes del Proyecto. A continuación se desarrolla una sugerencia para la construcción de Gaviones y Colchones Reno.

### 6.1 Requerimiento de personal

La cantidad de personal para realizar los trabajos esta en función entre otros factores al tamaño de la obra, y el tiempo para realizar la obra. A continuación se hace referencia a una cuadrilla habitual de trabajadores, tomando en cuenta las siguientes consideraciones:

- Que el terreno esta completamente afinado
- Los materiales se encuentran a pie de obra

Una cuadrilla para la instalación de los gaviones se compone habitualmente de 12 peones para lograr un rendimiento de 36 m<sup>3</sup> por jornal (sin utilizar equipo mecánico en el relleno), distribuida de la siguiente manera (Ref.26):

2 peones en desempaque y armado  
2 peones colocando el gavión en sitio y cosiéndolos  
6 peones llenando los gaviones y colocando los tensores  
2 peones cerrando las tapas

### 6.2 Herramienta y equipo

La herramienta y equipo es de suma importancia y de estos dependerá la rapidez y calidad de los trabajos.

entre la herramienta tenemos:

1 zapapico  
1 pala cuadrada  
6 pinzas de corte no. 9  
2 ganchos de acero  
1 barra de línea de 60 cm

### 6.3 Propuesta de preparación y puesta en obra

Las distintas operaciones de amarre y relleno de los gaviones y colchones Reno pueden ser resumidas brevemente en los siguientes párrafos, dividiéndose el proceso constructivo en dos partes; la primera para gaviones la cual se identifica con la letra "g" y la segunda con la letra "c" para colchones Reno.

1 Abrir el paquete y extender las piezas

g y c. Primeramente desempacar y desplegar cada uno de los gaviones. Una vez libre de flejes, comience por extenderlo para armarlos (ver Fig.6.1).

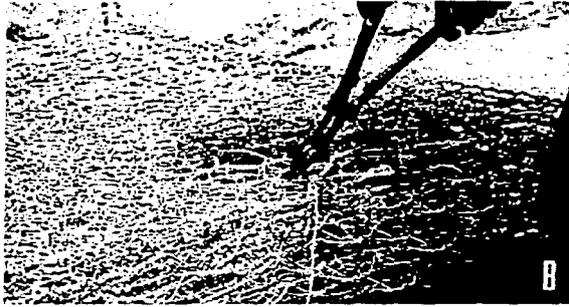


Fig.6.1 Paquete de gaviones

2. Extendido y preparación de los elementos del gavión y del colchón Reno

g. Desdoblar cada gavión sobre una superficie dura y plana, extenderlo y eliminar cualquier curvatura. Utilizando los alambres de refuerzo de las aristas, unirlos para formar el gavión, así como fijar los diafragmas o separadores interiores. Cuidando que el diafragma quede en la misma escuadría de la malla en que este colocado (Fig.6.2).



Fig.6.2 Extendido y preparación del gavión

c. Colchones Reno. Primero levantar los lados estrechos y largos, los paneles extremos y los diafragmas como se muestra en la figura 6.3.

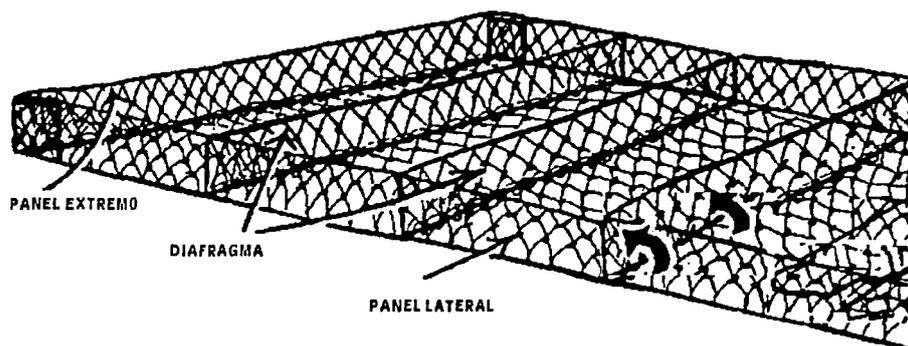


Fig. 6.3 Extendido y preparación del colchón

### 3. Forma de sujetar aristas y diafragmas

- g. Posteriormente se sujetan las aristas, utilizando alambre galvanizado de la misma calidad que el de la malla. La forma de hacer esta maniobra es haciendo un hilván sencillo, y a cada 10 o 15 cm hacer uno doble, con una vuelta ahorcando el alambre. Este tipo de alambre se utiliza en las cuatro esquinas del gavión, para unir los diafragmas al cuerpo de la malla, se usa un amarre sencillo, solamente fijando el diafragma al cuerpo del gavión. La unión de las aristas debe estar bien reforzada, alternado torsiones dobles y sencillas como se muestra en la figura 6.4.

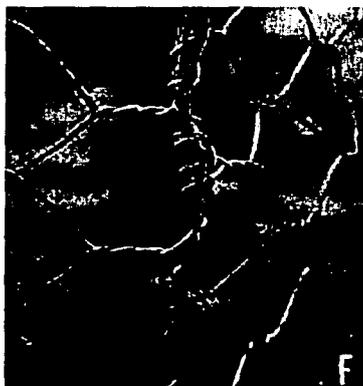


Fig.6.4 Forma de realizar hilvanes sencillos y dobles en el gavión

- c. Sobreponer las esquinas y se unen con el alambre grueso que sobresale de cada una, se usan torsiones dobles como se muestra en la figura 6.5. Se dobla el alambre grueso en la parte superior de los diafragmas, sobre el

alambre grueso de los lados; después cortar suficiente alambre para fijar el diafragma al panel lateral. Finalmente se doblan hacia dentro del colchón las puntas sobrantes (ver Fig.6.5).

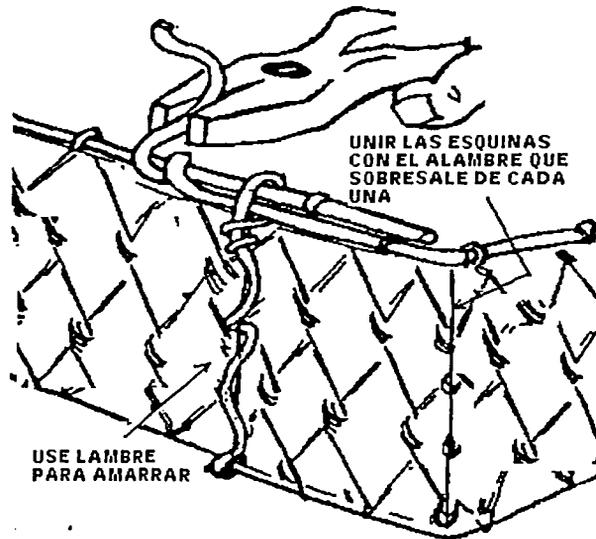


Fig.6.5 Forma de realizar las uniones en el colchón

#### 4. Puesta en obra y unión de los gaviones y colchones Reno

- g. Una vez que se tienen los gaviones armados, se procede a colocarlos en el sitio como se muestra en la figura 6.6 (se recomienda hacer tendidos de los gaviones que se calcule llenar en una jornada), en este momento se unen todos entre sí, primero con puntos de amarre como los utilizados para amarrar acero en la construcción y posteriormente se realiza un amarre igual al de las aristas, esto es muy importante, ya que de esta manera tenemos la unión requerida para hacer una obra monolítica.

Antes de llenarlos, por razones técnicas y estéticas, es muy importante tensar el gavión ver figura 6.8. Así se comprueba si no existen deficiencias en la unión, se logra optimizar el relleno y se obtiene un mejor rendimiento en la aplicación.

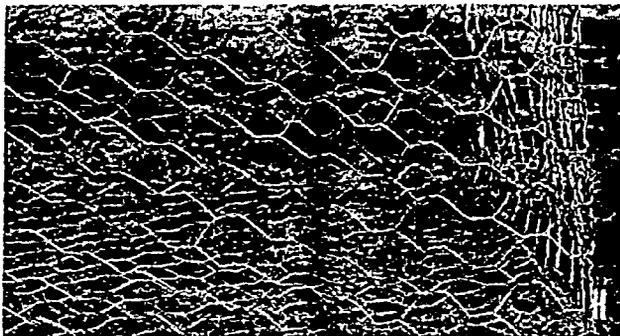


Fig.6.6 colocación del gavión en el terreno

- c. Colocación de los colchones Reno a su posición de trabajo. Se colocan los diafragmas transversalmente a la inclinación del talud y se unen las secciones individuales enlazando los alambres gruesos de cada pieza (Fig.6.7), en la parte más alta del talud protegido realizar anclajes a una distancia de 3 a 6 metros, para evitar posibles deslizamientos de la estructura. De igual forma antes de colocar las piezas en su posición final se debe tensar las piezas.

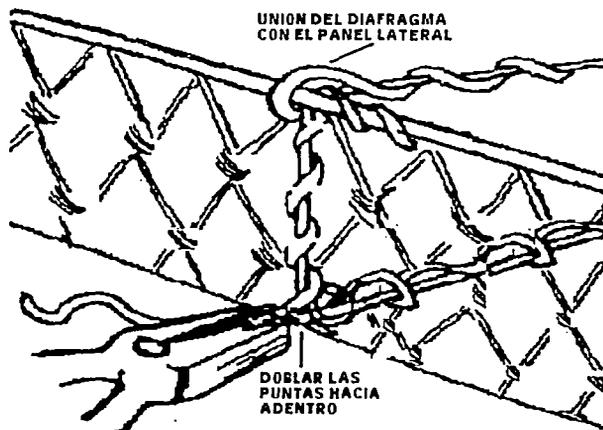


Fig.6.7 Unión del diafragma con el panel lateral

## 5. Relleno de los elementos

- g. Se procede al llenado de los gaviones, utilizando para ello *piedra sana* no intemperizable con una granulometría recomendada de 4" a 8" de diámetro y un peso específico de 2300 a 2900 kg/m<sup>3</sup>. La piedra debe ir acomodada de tal forma que evite al máximo el número de huecos, para dar el mayor peso específico en la obra. Se recomienda respetar la capacidad del gavión ya que una de las fallas habituales consiste en sobrellenar los gaviones, motivando la malformación de los mismos y además utilizando de más material de relleno, se permite sobrepasar 1" a 2" el nivel de los lados. El llenado puede ser manualmente o mecánicamente con distintos equipos, por ejemplo el sistema grúa-malacates, palas mecánicas, retroexcavadoras, etc., como se muestra en la figura 6.9.

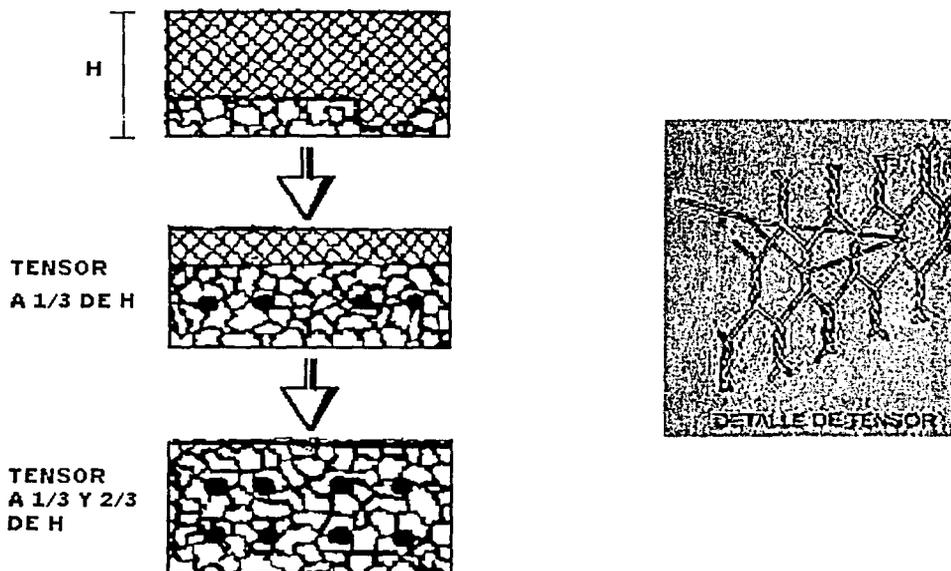


Fig.6.8 Relleno del gavión y la colocación de tensores

**Tensores.** En los gaviones se recomienda el uso de tensores que se hacen con el mismo alambre que se utiliza en los amarres. Se colocan dos tensores por metro lineal, pasando el alambre de una cara del gavión a la puesta, cuidando que el tensor pase por lo menos por dos escuadrias de la malla. Llenar solamente  $1/3$  de los gaviones nivelando la superficie; colocar los alambres directamente encima del relleno; enlazarlos a través de la malla y doblarlos para apretarlos y llenar hasta  $2/3$

del gavión, nivelando la superficie y después asegurar nuevos alambres de refuerzo y finalmente terminar de llenar el gavión ver figura 6.8.

- c. De la misma forma que en los gaviones el llenado puede ser manualmente o mecánicamente. El llenado de los colchones Reno se hace siempre desde abajo, para evitar el deslizamiento de rocas que pudiesen poner en riesgo al personal de acomodo final y al mismo equipo mecánico en dado caso de que se utilice. Se recomienda sobrellenar un poco los colchones Reno cuando se usa equipo mecánico (Fig.6.9 y 6.10), teniendo en cuenta que existe asentamiento del relleno al momento de realizar el reacomodo manual; cuando la colocación se hace manualmente y con cuidado, no se sobrellenan los colchones Reno.

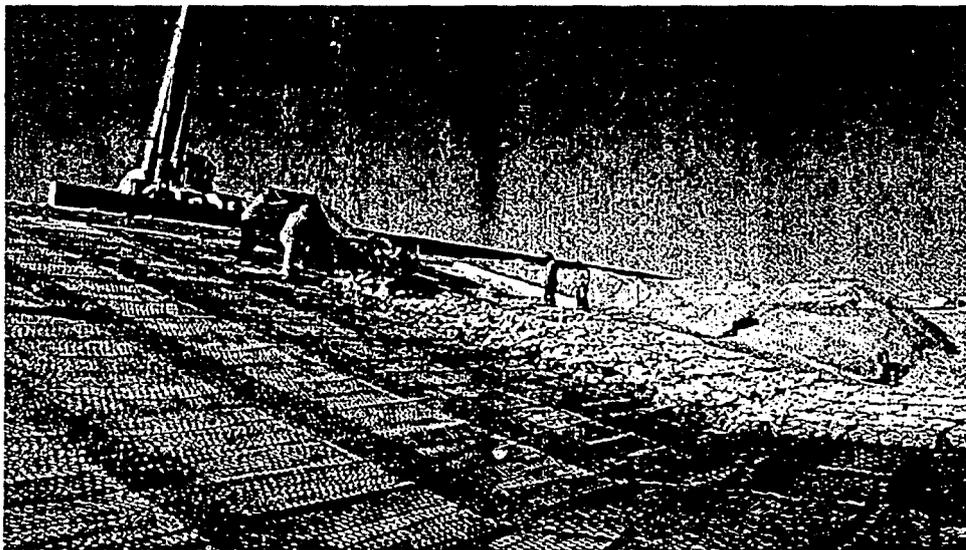


Fig.6.9 Ejecución del relleno de colchones Reno con grúa y un malacate.

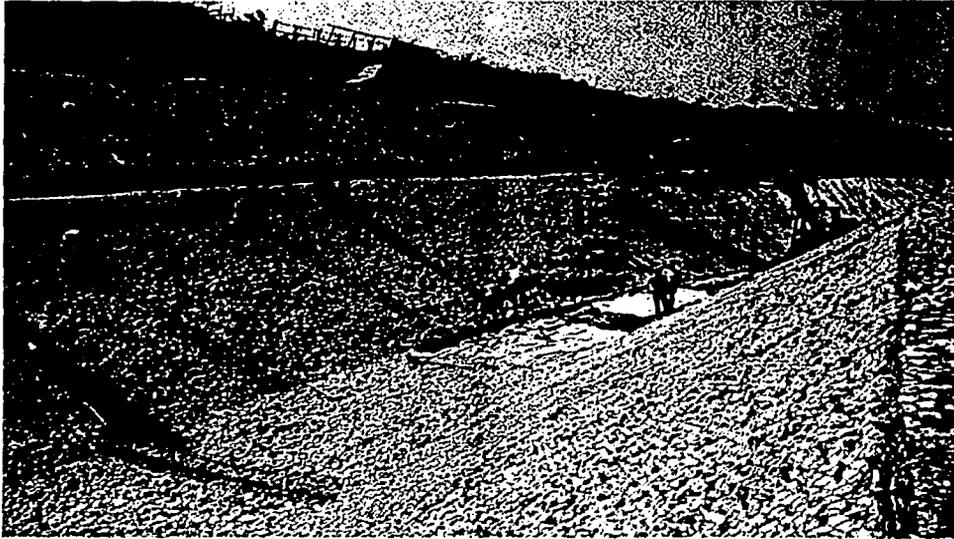


Fig. 6.10 Ejecución de relleno de colchones Reno mediante retroexcavadora

## 6. Colocación de tapas

- g. Para cerrar las tapas se auxilia con una barra de línea (Fig.6.11). Para hacer palanca y que la tapa llegue a la cara del gavión, se hacen puntos de amarre a cada 30 cm aproximadamente y enseguida se cose a todo lo largo del gavión. Para los diafragmas solo se utilizan los puntos de amarre, para fijar las tapas, sin hacer el cosido continuo.



Fig.6.11 Punto de amarre de la tapa del gavión

- c. Después de llenar varias unidades, se colocan las tapas (que pueden ser individuales o en rollos como se muestra en la figura 6.12) en posición y se sujetan de la misma manera que en los gaviones, ver figura 6.7. Lo más importante, las tapas deben atarse firmemente a los lados extremos y diafragmas, usando torsiones simples y luego dobles con espacio de 4" (10cm) aproximadamente entre ellas. El primer bloque esta completo.

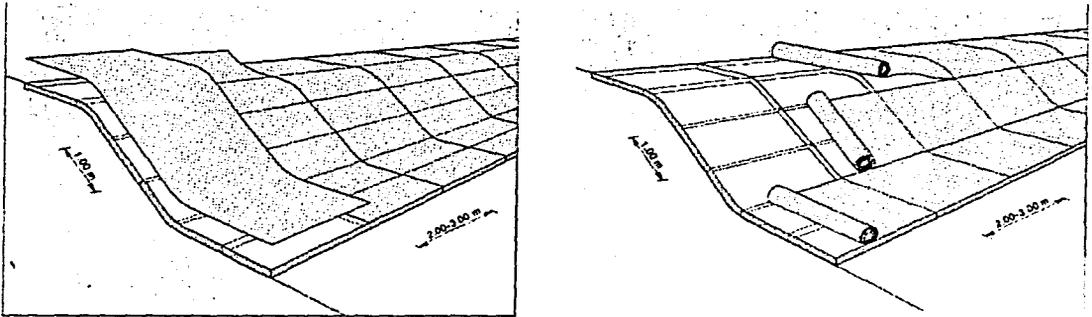


Fig.6.12 Ejemplos de cierre de colchones Reno con rollos y tapas individuales

Terminado el primer bloque de gaviones, se repite el proceso, colocando el siguiente bloque, uniéndolo firmemente con los gaviones contiguos o con el de abajo (según corresponda) de abajo para después grapar e hilvanar. Los siguientes niveles de gavión se unen con el alambre que se utiliza en los pasos anteriores, ver figura 6.13



Fig.6.13 Preparación del siguiente nivel de gaviones

La construcción de gaviones y colchones Reno es de suma importancia, ya que la eficiencia del revestimiento depende en gran parte de la calidad de los trabajos, por lo que se recomienda siempre tener una muy buena supervisión durante todo el proceso, sobre todo en la elaboración de amarres de diafragmas y tapas por parte de personal calificado.

7

## CONCLUSIONES

Los gaviones y los colchones Reno tienen una amplia gama de aplicaciones dentro de la ingeniería civil; las estructuras hidráulicas hechas a base de estos elementos ofrecen muchas ventajas como es flexibilidad del armazón de los gaviones, sujetos a tensión y compresión alternantes. Como estructura deformable, todo cambio en su forma, debido a movimientos de tierra o por presión interna, es una característica funcional y no un defecto.

Como los colchones Reno y gaviones se sujetan entre sí, la malla metálica resiste esfuerzos de tensión, a diferencia de las estructuras rígidas hechas de mampostería y concreto. La forma de hexágonos de la malla es de triple torsión, galvanizada para darle resistencia y disminuir los efectos de corrosión.

Los revestimientos hechos mediante colchones Reno y almáciga bituminosa, ya sean consolidados o sellados, tienen características favorables desde el punto de vista mecánico (flexibilidad, gran resistencia a esfuerzos de compresión en tiempos largos), pero son mal vistos desde el ambiente ecológico. El almáciga bituminosa protege la malla contra la corrosión y permite un aumento de capacidad del canal, debido a la disminución del coeficiente de rugosidad. Pueden utilizarse en canales de riego, canales que transporten aguas sucias o peligrosas, ya que en estos casos se requiere evitar filtraciones que pudiesen contaminar el subsuelo y los mantos freáticos.

Los gaviones y colchones Reno deben emplearse en lugares donde:

- Existan materiales disponibles y adecuados para el relleno.
- Dificultad de transporte de otros materiales que no sean gaviones y colchones Reno vacíos, perfectamente manejables y de reducido peso.
- Disponibilidad de mano de obra. En zonas donde se promueve la participación de la ciudadanía en la realización de las obras.
- Los suelos estén sujetos a hundimientos diferenciales ocasionados por la extracción de agua del subsuelo. En las zonas agrícolas del centro y norte de México la extracción de agua cada vez es mayor, esto a creado que canales hechos mediante estructuras rígidas tengan un mal funcionamiento.
- Suelos sujetos a ondas vibratorias de gran intensidad y amplitud, como puede ser un sismo. Estos fenómenos son muy frecuentes en gran parte de nuestro territorio por lo que su aplicación de técnicas flexibles debe implantarse.
- Se requiera conservar el entorno natural. Los revestimientos en colchones Reno y gaviones, después de poco tiempo son cubiertos por la vegetación. Este aspecto no sólo es favorable por el incremento de resistencia de la obra sino que permite el desarrollo de la flora y fauna, restableciéndose así el equilibrio del ecosistema. Para acelerar el proceso natural de integración se rellenan los huecos de a estructura con tierra vegetal, sembrar o plantar

especies de crecimiento rápido. En este caso, se tendrá que revisar las condiciones del flujo para un canal con vegetación completamente crecida.

- En los tramos donde los ríos atraviesan poblaciones y hay una gran variación entre el gasto de estiaje y el de la época de lluvias y si el entubamiento resulta muy costoso, se debe canalizar el cauce, con una sección compuesta que forme tanto el cauce principal como el de avenidas. Las orillas de ambos cauces deberán estar protegidas con gaviones o colchones Reno.

La altura de protección marginal se hace hasta alcanzar la elevación de la margen en ríos de planicie o hasta la elevación de la superficie del agua asociada al gasto de diseño. Si la margen tiene una elevación mayor que la del agua para el gasto de diseño, la zona superior, arriba de la protección se debe perfilar con un talud menor y sembrar sobre ella pasto o vegetación que la proteja.

Los diseños de revestimientos pueden variar según el criterio y experiencia del ingeniero proyectista. El mejor diseño depende del costo de la obra, de los equipos de construcción, materiales disponibles, del tiempo de ejecución, características hidráulicas y geotécnicas. El ingenio del proyectista se puede reflejar en la ubicación y trazo, dimensionamiento de las obras y de los elementos que la forman.

El éxito de una protección marginal depende de su protección contra la erosión local que ocurre al pie del talud.

Un filtro puede elaborarse de materiales granulares y de materiales sintéticos, su función es disminuir la velocidad de filtración y no permitir el arrastre de partículas de suelo hacia el exterior. Los filtros sintéticos pueden ser la mejor solución en muchas obras de protección, tanto por su facilidad y rapidez de colocación, por su resistencia y espesor pequeño que tienen; sin embargo, son costosos, por lo que se deberá hacer un estudio de factibilidad.

La colocación de los filtros depende de la elevación del agua y sobre todo de su velocidad, así como del equipo de construcción. Si las velocidades del agua arrastran los elementos de un filtro granular no deben colocarse. En su lugar se puede usar, con ayuda de equipo mecánico, un geotextil o simplemente no colocar filtro y en su lugar se debe incrementar el espesor del enrocamiento (rip-rap) llegando a ser a veces de 1 m o más. El enrocamiento (rip-rap) debe ser bien graduado y tener una gran cantidad de finos a pesar de que gran parte de ellos sean arrastrados por la corriente.

El diseño y fabricación de las estructuras de gaviones no siempre han satisfecho las normas y, en consecuencia, han fallado en parte o por completo las obras por el excesivo hundimiento de los cimientos y, más a menudo, por la gradual filtración de agua entre los gaviones y la tierra y los cimientos adyacentes

Los revestimientos realizados en colchones Reno y gaviones ofrecen una mejor estabilidad de las márgenes en comparación a los revestimientos en rip-rap, solo

que son ligeramente más costosos en su etapa inicial, mientras que a largo plazo resultan ser más económicos.

Los piedras de relleno ofrecen un grado de permeabilidad en toda la estructura, lo que elimina la necesidad de un sistema de desagüe. También se eliminan así las presiones contrarias ejercidas en las orillas de los cauces por la variación de la profundidad del agua debida a las crecidas y estiajes.

Dado que la naturaleza es muy compleja ningún canal es igual a otro, por lo que siempre se deben buscar las mejores alternativas de solución teniendo en cuenta la seguridad del canal, economía y los efectos al ambiente que pudiesen presentarse.

Al revestir un canal ya sea natural o artificial con el fin de hacerlo seguro, no tiene que olvidarse que son entes dinámicos y que el riesgo hidrológico siempre existe. Por desgracia a veces se desarrolla un efecto psicológico de seguridad por el solo hecho de haber intervenido en el cauce, lo cual puede engendrar un crecimiento de los daños en caso de que los trabajos sean superados.

APÉNDICE A1

En tanto no se elaboren las normas mexicanas correspondientes, deben consultarse las siguientes normas extranjeras:

A1.1 ASTM A 641	Especificaciones para el alambre de acero (galvanizado) zinc-revestido.
A1.2 ASTM A 856/A 856M	Especificación para el alambre de acero revestido con aleación de zinc-5% aluminio
A1.3 ASTM A 809	Especificación para el alambre de acero (aluminizado) aluminio-revestido
A1.4 ASTM A 764	Especificación para el alambre de acero revestido metálico, para clasificarlo por resortes mecánicos
A1.5 ASTM A 313	Especificación para el alambre de acero inoxidable y de cromo y níquel
A1.6 ASTM D 792	Métodos de prueba para la gravedad específica (densidad relativa) y la densidad de los plásticos por dislocación
A1.7 ASTM D 412	Métodos de prueba para los cauchos, gomas, termoplásticos vulcanizados y elastómeros a tensión
A1.8 ASTM D 2240	Métodos de prueba para las propiedades de dureza de gomas
A1.9 ASTM D 746	Método de prueba para la temperatura de la fragilidad de plásticos y elastómeros por impacto
A1.10 ASTM D 1242	Método de prueba para la resistencia de materiales plásticos a la abrasión
A1.11 ASTM B 117	Método de prueba del aerosol de sal (niebla)
A1.12 ASTM D 1499	Prueba para la exposición a la luz-agua de plásticos
A1.13 ASTM G 23	Prácticas para obtener los efectos de la exposición de materiales no metálicos a la luz con y sin agua
A1.14 ASTM A 90/ A 90M	Métodos de prueba para el peso (masa) de protección en los artículos de hierro y acero con capa de zinc o aleaciones de zinc
A1.15 ASTM A 428	Métodos de prueba para estimar el peso de las capas del revestimiento de aluminio en el acero

## APÉNDICE A2 Índice de figuras y tablas

### Figuras

- Fig. 1.1 Elementos geométricos de un canal (Pág. 9)
- Fig. 1.2 Aplicación de las ecuaciones fundamentales de la hidráulica a un volumen de control en un canal (Pág. 11)
- Fig. 1.3 Distribución de velocidades en un sección (Pág. 13)
- Fig. 1.4 Sección de control de un canal en flujo uniforme (Pág. 18)
- Fig. 1.5 Elementos principales del gavión (Pág. 26)
- Fig. 1.6 Elementos principales del colchón Reno (Pág. 27)
- Fig. 1.7 Revestimiento en colchones Reno del canal Fissero-Tartaro, Italia (Pág. 30)
- Fig. 1.8 A distancia de un solo año, la obra presenta un integración casi perfecta al ambiente (Pág. 30)
- Fig. 1.9 Tipologías más frecuentes de revestimiento mediante colchones Reno y gaviones (Pág. 33)
- Fig. 2.1 Dimensión nominal "D" de la abertura de la malla de alambre (Pág. 36)
- Fig. 3.1 Ubicación de los colchones Reno sobre el terreno (Pág. 49)
- Fig. 3.2 Revestimiento total de un canal (Pág. 50)
- Fig. 3.3 Ejemplo de empotramiento escalonado realizado en obra, mediante gaviones (Pág. 51)
- Fig. 3.4 Ejemplo de empotramiento continuo realizado en obra, mediante gaviones (Pág. 51)
- Fig. 3.5 Pontones flotantes en la fase de puesta en obra de los colchones Reno en agua (Pág. 57)
- Fig. 3.6 Puesta en obra de los colchones Reno mediante el uso de una grúa y un sujetador (Pág. 58)
- Fig. 3.7 Colchón Reno consolidado con almaciga bituminosa (Pág. 62)
- Fig. 3.8 Colchón Reno sellado con almaciga bituminosa (Pág. 63)
- Fig. 3.9 Canal de descarga revestido con colchones Reno consolidados con almaciga bituminosa (Pág. 64)
- Fig. 3.10 Colchón Reno combinado con una membrana impermeable (Pág. 65)
- Fig. 3.11 Canalización del canal Pedra do Cavallo, Brasil. Utilizando colchones Reno combinados con membrana impermeable (Pág. 68)
- Fig. 3.12 Trazo del eje del cauce y de la línea del pie del talud de la protección (Pág. 70)
- Fig. 3.13 Recubrimiento marginal para fijar el cauce actual (Pág. 71)
- Fig. 3.14 Falla de un recubrimiento no protegido el pie del talud (Pág. 73)
- Fig. 3.15 Formas de proteger un revestimiento marginal contra la erosión (Pág. 75)
- Fig. 4.1 Movimiento de las rocas dentro de los colchones Reno al paso del agua (Pág. 81)

- Fig. 4.2 Fuerzas actuando sobre una partícula de suelo del talud (Pág. 83)
- Fig. 4.3 Ábacos para obtener el ángulo de fricción interna para suelos no cohesivos (Pág. 87)
- Fig. 4.4 Relación entre el parámetro y el coeficiente eficaz de Shields (Pág. 88)
- Fig. 4.5 Curvas de velocidades máximas admisibles para terrenos cohesivos (Pág. 90)
- Fig. 4.6 Velocidad crítica que causa el movimiento de las piedras en función del espesor del colchón Reno (Pág. 91)
- Fig. 4.7 Velocidad crítica que causa el movimiento de las piedras en función del espesor del colchón Reno (Pág. 92)
- Fig. 4.8 Revestimiento de fondo y taludes del canal de riego mediante colchones Reno (Pág. 96)
- Fig. 4.9 Barra de herramientas (Pág. 97)
- Fig. 4.10 Sección transversal del canal dividida en seis segmentos (Pág. 99)
- Fig. 4.11 Ejemplo de segmentos y subsegmentos para la sección transversal (Pág. 100)
- Fig. 4.12 Grado de curva del gasto (Pág. 100)
- Fig. 4.13 Verificación de resultados (Pág. 101)
- Fig. 6.1 Paquete de gaviones (Pág. 116)
- Fig. 6.2 Extendido y preparación del gavión (Pág. 116)
- Fig. 6.3 Extendido y preparación del colchón Reno (Pág. 117)
- Fig. 6.4 Forma de realizar hilvanes sencillos y dobles en el gavión (Pág. 117)
- Fig. 6.5 Forma de realizar las uniones en el colchón (Pág. 118)
- Fig. 6.6 Colocación del gavión en el terreno (Pág. 119)
- Fig. 6.7 Unión del diafragma con el panel lateral (Pág. 119)
- Fig. 6.8 Relleno del gavión y la colocación de tensores (Pág. 120)
- Fig. 6.9 Ejecución del relleno de colchones Reno con grúa y malacate (Pág. 121)
- Fig. 6.10 Ejecución del relleno de colchones Reno mediante retroexcavadora (Pág. 122)
- Fig. 6.11 Punto de amarre de la tapa del gavión (Pág. 122)
- Fig. 6.12 Ejemplo de cierre de colchones Reno con rollos y tapas individuales (Pág. 123)
- Fig. 6.13 Preparación del siguiente nivel de gaviones (Pág. 123)

## Tablas

- Tabla 1.1 Coeficiente  $\alpha$  y  $\beta$  en canales (Pág. 15)
- Tabla 1.2 Coeficientes  $A_l$  y  $A_r$  para el cálculo de la velocidad media en canales lisos y rugosos obtenidos de la referencia 9 (Pág. 17)
- Tabla 1.3 Factores para el cálculo de  $n$ , según el SCS (Pág. 22)
- Tabla 1.4 Valores del coeficiente de rugosidad de Manning en canales en cauces

- naturales (Pág. 24)
- Tabla 1.5 Fuerza tractiva y coeficientes de rugosidad al final de la instalación (Pág. 24)
- Tabla 1.6 Fuerza tractiva permisible y coeficientes de rugosidad  $n$  con vegetación completamente desarrollada (Pág. 25)
- Tabla 2.1 Clase de malla comercial (Pág. 36)
- Tabla 2.2 Medidas estándar del colchón Reno para revestimiento de cauces (Pág. 37)
- Tabla 2.3 Medidas estándar para gaviones en las canalizaciones (Pág. 38)
- Tabla 2.4 Resistencia a tensión de la malla para gaviones y colchones Reno (Pág. 40)
- Tabla 2.5 Recubrimiento para diferentes tipos de malla y sus componentes (Pág. 41)
- Tabla 3.1 Clasificación de los materiales sedimentario en un río (Pág. 52)
- Tabla 3.2 Datos para estimar el cambio volumétrico probable en arcillas (Pág. 60)
- Tabla 3.3 Cantidades unitarias mínimas de almaciga bituminosa colable para penetración parcial y/o total de los colchones Reno y gaviones (Pág. 63)
- Tabla 3.4 Propiedades de membranas en el uso de revestimientos (Pág. 66)
- Tabla 4.1 Velocidades máximas, para canales de lecho y paredes fijas o recubiertos, según Mastkow (Pág. 80)
- Tabla 4.2 Espesores indicativos de los revestimientos en colchones Reno y en gaviones en función de la velocidad de la corriente (Pág. 82)
- Tabla 4.3 Velocidad límite del agua en algunos materiales (Pág. 82)

Bibliografía

1. Página electrónica: [www.faohidra.com](http://www.faohidra.com)
2. Página electrónica: [www.maccaferri.com](http://www.maccaferri.com)
3. Russel Wilson. Recursos hidráulicos. Ed. cecsa, México D.F. 1975
4. Maza Álvarez, José Antonio. García Flores, Manuel. Estabilización y rectificación de ríos del manual de Ingeniería de ríos. Instituto de Ingeniería, UNAM. 1996
5. Fisher W. Hidráulica de canales abiertos, Ed. cecsa, México D.F. 1986
6. Revista: Maccaferri Gabions Inc . Canalizaciones. Colorado USA.
7. Martín Vide, Juan P. Ingeniería Fluvial, Universitat Politècnica de Catalunya, Politext 58, UPC, Barcelona España 1997
8. V.T.Chow. Hidráulica de canales abiertos, Ed. McGraww-Hill, México D.F.1985.
9. Sotelo Ávila, Gilberto. Hidráulica de canales, Facultad de ingeniería, UNAM, 2001
10. Gardea Villegas, Humberto. Hidráulica de canales, Facultad de Ingeniería, UNAM, 1993
11. Sotelo Ávila, Gilberto. Hidráulica básica Volumen 1, Editorial Trillas, México D.F.
12. MAC.R.A.1-BANK PROTECTION, Reference Manual, Maccaferri gabions inc. Bologna Italia
13. Proyecto de norma NMX-B-085-SCFI-2000, Elaborado por MACCAFERRI Gabions Inc
14. López Cadena de Llano, F. Corrección de torrentes y estabilización de cauces. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Colección FAO No.9. Roma Italia 1988
15. Usos de la malla. Maccaferri Gabions, edición en español, Colorado USA.
16. Página electrónica: [www.lemac.com](http://www.lemac.com)
17. Juárez Badillo, Eulalio. Mecánica de suelos Vol.1 Editorial Trillas, México D.f. 1977

18. Proyecto de zonas de riego. Dirección de proyectos de irrigación. Departamento de canales de la Secretaría de Recursos Hidráulicos 1973
19. González R. Carlos. Mecánicas de suelos. Editorial Politext, Madrid España 1986
20. Romero J., Ángel. Geología aplicada a la ingeniería civil. Editorial Trillas. México D.F. 1995
21. Página electrónica: [www.hfc.com](http://www.hfc.com)
22. Juárez Badillo, Eulalio. Mecánica de suelos Vol.3 Editorial Trillas, México D.f. 1977
23. Wright H., Paul, Paquette J., Rodnor. Ingeniería de carreteras. Editorial Limusa. Primera edición México D.F. 1993
24. Oglesby H., Clarkson. Ingeniería de carreteras. Editorial Continental. Primera edición México D.F. 1976
25. Pilarczyk K.W., Blaze R. Jewski. River Training techniques. Balkema, Brookfield USA 1995
26. Geotechnical fabrics report, edición en español. El solucionar de problemas 1990
27. Simposion 1993. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos SMMS. México
28. Bouneth Impermeabilización de lagunas artificiales. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos SMMS, México D.F. 1992
29. Página Electrónica: [www.tcmirafi.com](http://www.tcmirafi.com)
30. Página Electrónica: [www.filterweave.jkt](http://www.filterweave.jkt)
31. B. E. Van Den Bosch. Manejo del agua de riego. Manual de campo No 7 Canales. Instituto Internacional de Recuperación y Mejora Técnica de Tierras. Dirección de Fomento de Tierras y Aguas, FAO 1990
32. Bregoli, Gianluigi. Flexible channel linings design and estimate. Maccaferri Gabions inc. Bologna Italia.
33. Construcción de gaviones y colchones Reno. Maccaferri gabions inc. Colorado USA.