

4. ESTABILIDAD Y RECTIFICACION DE CAUCES

4.1 Introducción

Para evitar totalmente o reducir la erosión lateral que se presenta en las márgenes de los ríos, y con mayor frecuencia en las orillas exteriores de las curvas, se pueden utilizar, por ejemplo, espigones y recubrimientos marginales (protección marginal), ver fig 4.1

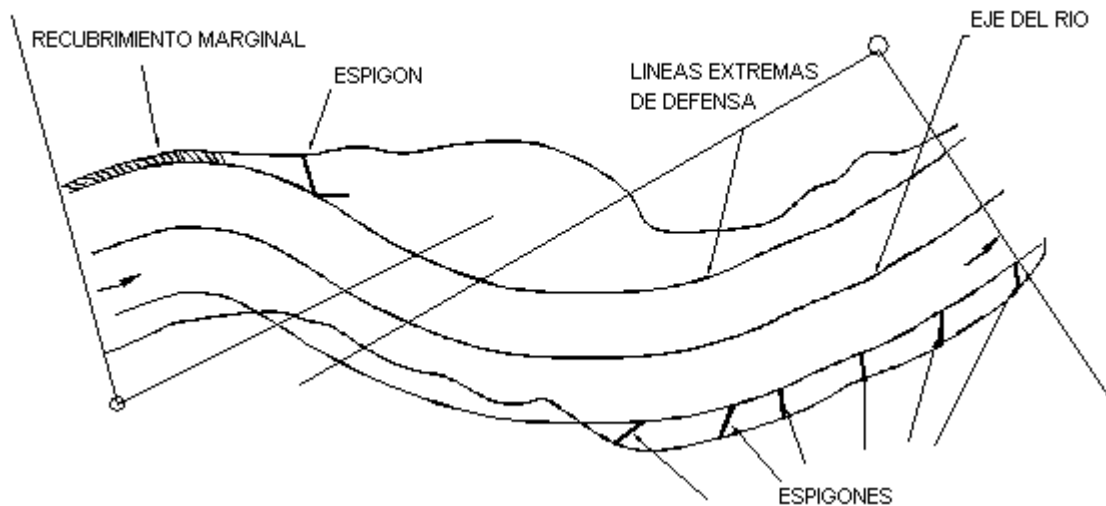


fig 4.1 Obras de protección marginal

Algunas diferencias entre estos tipos de obra consisten en que los recubrimientos marginales evitan por completo los corrimientos laterales de las márgenes, tanto en tramos rectos como en las curvas más forzadas, o fijan completamente las márgenes, mientras que los espigones permiten que la orilla entre ellos pueda ser ligeramente erosionada inmediatamente después de su construcción. Por otra parte, los recubrimientos marginales son más costosos y requieren mayor cuidado en su proyecto y construcción. Además, cuando falla una parte de un recubrimiento marginal puede extenderse esa falla y destruirse toda la obra, sobre todo si la avenida tiene varios días de duración. En cambio, los espigones permiten que la obra en su conjunto continúe trabajando aunque uno o dos de los espigones hayan sido socavados en sus extremos o destruidos o separados de la margen. Por último, el costo del mantenimiento de los espigones disminuye con el tiempo.

Las principales desventajas de los espigones consisten en que disminuyen el área hidráulica y aumentan la rugosidad de las orillas. Por otra parte, ellos no se pueden utilizar en curvas con radio de curvatura muy reducido.

4.2 Espigones

Los espigones son estructuras interpuestas a la corriente, uno de cuyos extremos está unido a la margen. Sirven para alejar las líneas de corriente con alta velocidad de la orilla, y evitar así que el material de la margen pueda ser transportado y ella se erosione. Además, los espigones facilitan que los sedimentos se depositen entre ellos, con lo que se logra una protección adicional de la orilla.

4.2.1 Datos para su diseño

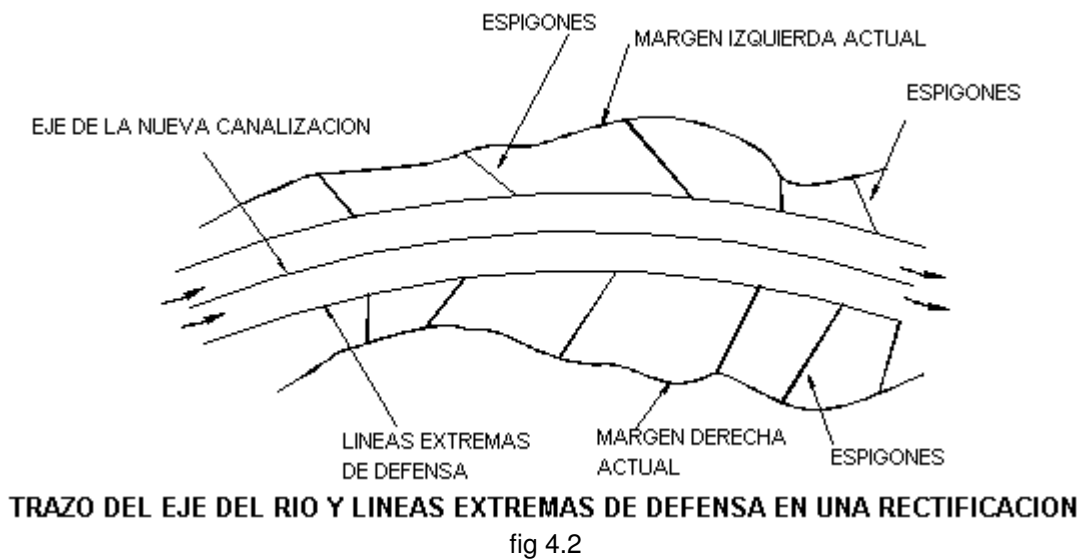
Los datos necesarios para el diseño de los espigones son la topografía y batimetría del río en la zona por proteger, secciones transversales a lo largo de las orillas que serán protegidas, características hidráulicas de la corriente como son, por ejemplo, el gasto dominante y el gasto asociado a un periodo de retorno entre 50 y 100 años, la elevación de la superficie del agua correspondiente a esos gastos, así como las velocidades medias de los escurrimientos y la velocidad del flujo a lo largo de las orillas por proteger; la granulometría y peso específico de los materiales del fondo y orillas del cauce, y finalmente los materiales de construcción disponibles.

4.2.2 Recomendaciones de diseño

Los aspectos más importantes a tomar en cuenta al diseñar una protección a base de espigones, a continuación se comentan algunos de ellos y que están relacionados e influyen entre sí.

a. Localización en planta

Al ubicar una obra de defensa, ya sea respecto de la orilla actual, o bien en una nueva margen (al hacer una rectificación se requiere trazar en planta el eje del río y en las orillas delinear una frontera, generalmente, paralela a dicho eje, a la cual llegarán los extremos de los espigones, ver figs 4.2 y 4.3. La longitud de cada espigón estará dada por la distancia de la orilla real a esa línea.



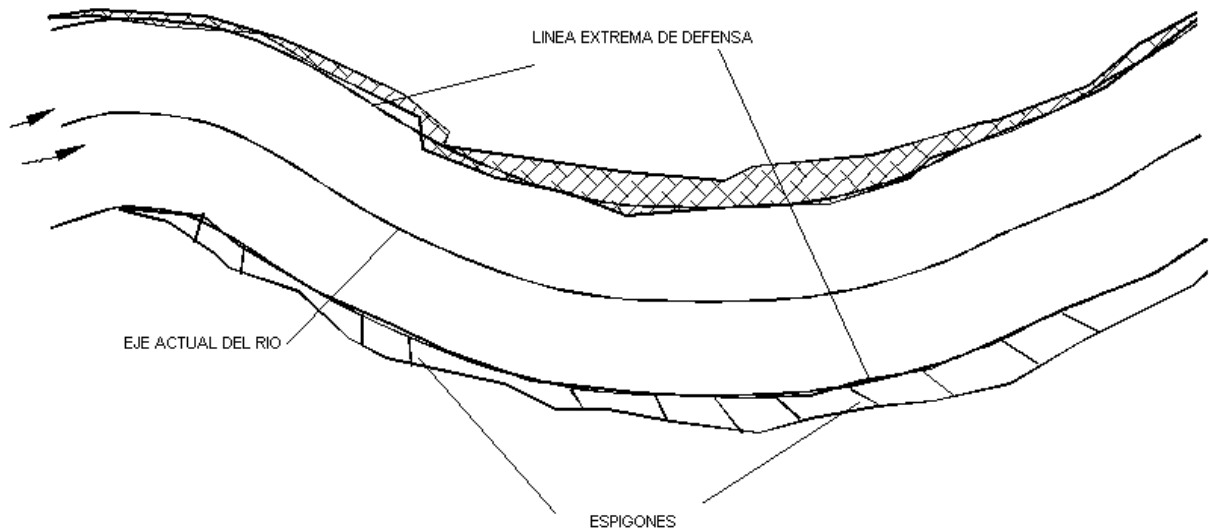


Fig 4.3 Trazo del eje del río y líneas extremas de defensa para proteger los márgenes actuales

La separación entre las nuevas orillas de defensa podrá ser igual al ancho estable del río teniendo en cuenta el cambio de pendiente, si se rectificó el río o sí el río va a ser navegable o no. Analíticamente el ancho estable se obtiene en función del gasto dominante, características físicas del material del fondo y orillas, y de la pendiente del río; para hacer lo mencionado se utilizan los métodos descritos en el capítulo dos de este manual.

Cuando se trata de rectificar un tramo de río o defender sus curvas y si las márgenes son arenosas o ligeramente limosas, los radios de curvaturas r , medidos hasta el eje del río deben estar comprendidos entre los límites siguientes

$$2B \leq r \leq 8B \quad (4.1)$$

donde B es el ancho medio de la superficie libre en los tramos rectos, en m.

Con la recomendación anterior, las mayores profundidades siempre se encuentran cercanas a la orilla exterior de la curva, y que en ésta no se formen islas o bancos de arena cercanos a la orilla cóncava.

Al proteger una curva aislada de un río con espigones las márgenes de las curvas situadas aguas arriba no deberán de ser erosionadas y que la corriente incida contra margen protegida.

Si esto último no ocurre, con el tiempo el río escurrirá por otro sitio, abandonando completamente los espigones que fueron colocados. Por ello en ríos de planicie que son divagantes o que sufren erosión constantemente en sus curvas, se deben proteger tramos completos de río, ver fig 4.4.

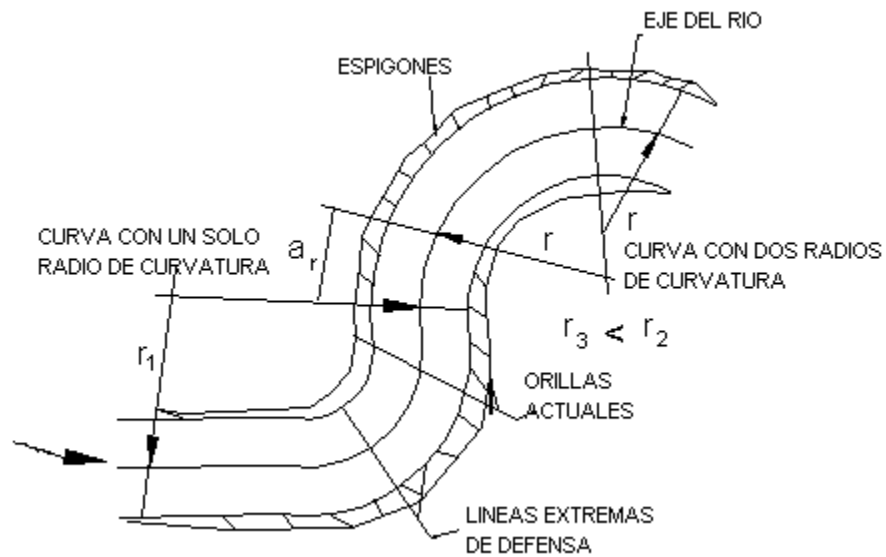


fig 4.4 Eje del río y radios de curvatura

b. Longitud de los espigones

La longitud total de un espigón, L , se divide en dos, una es la longitud de anclaje o empotramiento, L_e , y la otra la longitud de trabajo, L_t . La primera es la que inicialmente está dentro de la margen y la segunda la que está dentro de la corriente, ver fig 4.5.

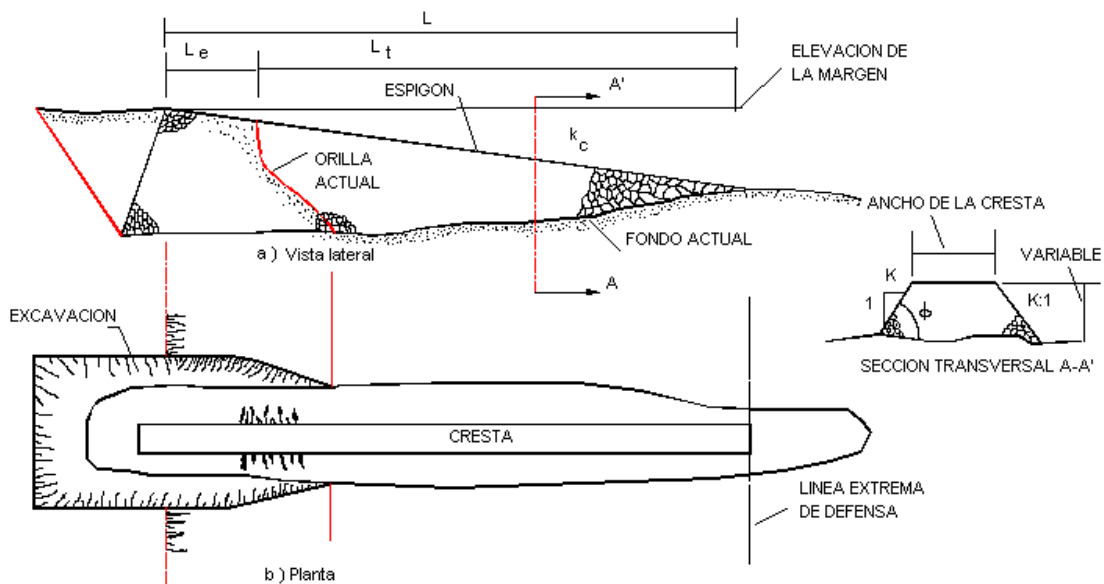


fig 4.5. Espigón empotrado

$$L = L_t + L_e \quad (4.2)$$

La longitud de trabajo L_t , normalmente debe estar comprendida entre los límites siguientes

$$d \leq L_t \leq B/4 \quad (4.3)$$

donde d es el tirante del río asociado al gasto dominante. En los ríos de planicie d es la distancia vertical entre la elevación de la margen y la elevación del fondo del río.

Los espigones pueden construirse sin tener longitud de anclaje, es decir, sin que penetre en la margen, por tanto $L_e = 0$, ver fig 4.6. La máxima longitud de anclaje recomendada es igual a un cuarto de la longitud de trabajo, $0.25 L_t$; el empotramiento solo se justifica cuando no se puede permitir que falle ninguno de los espigones, ello se presenta cuando hay una población en la margen que se desea proteger. Cuando el procedimiento sea costoso es conveniente reducir la separación entre los espigones.

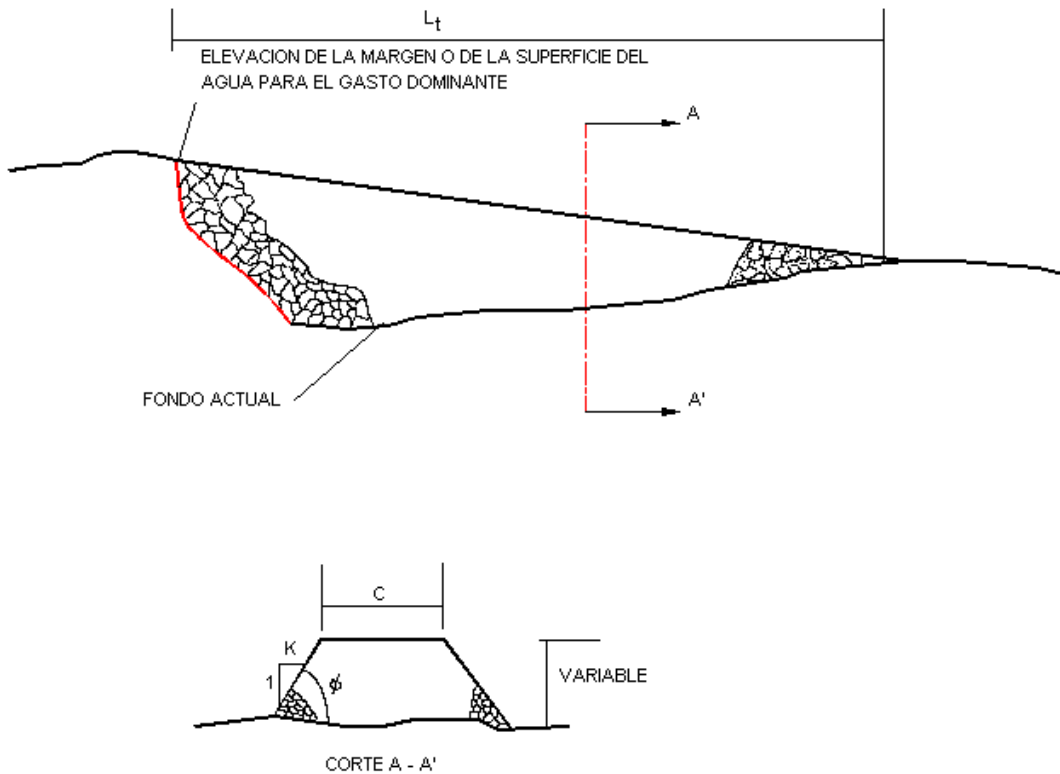


fig 4.6 Espigón apoyado en la margen en ríos de planicie

C. Forma de los espigones en planta

La forma en planta de los espigones puede ser recta, curvados hacia aguas arriba o aguas abajo, en L con el brazo dirigido hacia aguas arriba o aguas abajo y en T, ver fig 4.7. Los más usuales son los rectos por su facilidad constructiva y por ser más económicos. Los espigones con forma de L o T son los más costosos, ya que su parte extrema debe construirse en la zona más profunda del río.

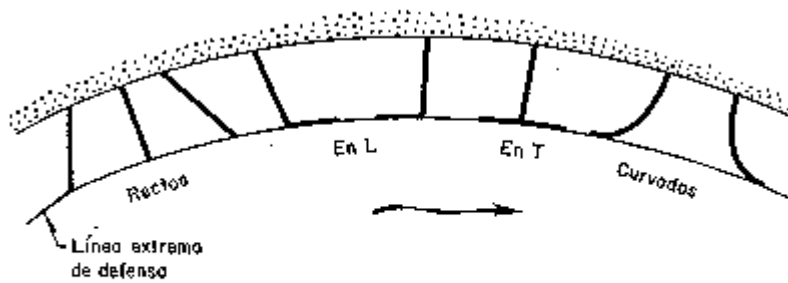


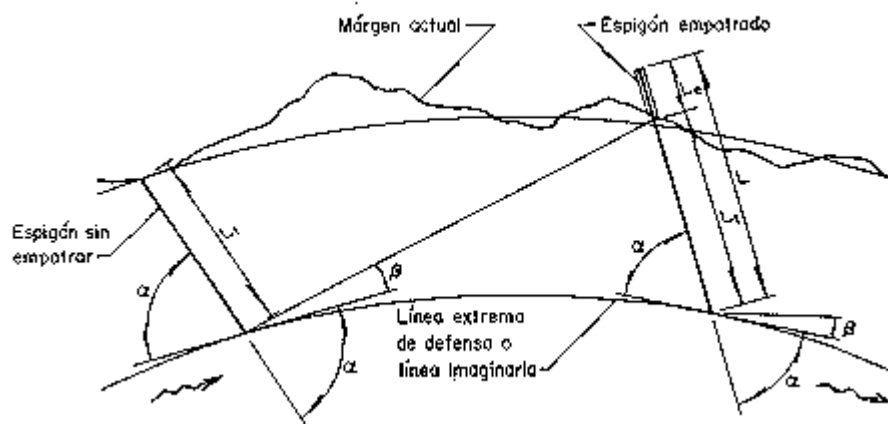
Fig 4.7 Forma en planta de los espigones

Cuando el fondo del cauce es gradual o bien se tienen tramos rectos se recomienda usar los espigones rectos y cortos, en cambio los que tienen forma de T son más adecuados para cauces angostos. Generalmente, un diseño usando el tipo recto debe proporcionar una adecuada protección de las orillas y producir sedimentación entre los espigones.

d. Separación entre espigones

La distancia entre espigones, se mide en la orilla entre los puntos de arranque de cada uno y depende de la longitud del espigón de aguas arriba y de su orientación, así como de la configuración de la margen.

Para calcular la separación entre dos espigones, se toma en cuenta la expansión teórica que sufre la corriente al pasar frente al extremo del espigón, ver fig 4.9. Normalmente se considera que el ángulo de expansión β varía entre 9 y 11 grados.



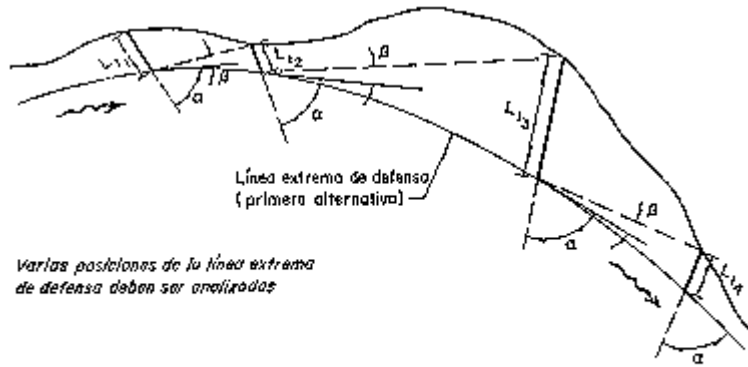


Fig 4.9 Método para obtener el espaciamiento entre espigones

Sí los espigones están muy cercanos entre sí trabajan menos eficientemente y su costo es mayor. En la tabla 4.1 se dan recomendaciones para la relación que deben guardar entre sí la separación y longitud de los espigones.

d.1 Separación en tramos rectos

Para la separación entre espigones en un tramo recto, cuando la línea extrema de defensa y la margen son paralelos sin empotramiento en la orilla, se recomienda lo siguiente

| ángulo | separación, S_s | |
|----------------|---------------------------|--------|
| 70 a 90 grados | $(4.5 \text{ a } 5.5)L_t$ | |
| 60 | $(5 \text{ a } 6) L_t$ | (4. 4) |

d.2 Separación en curvas

La separación entre espigones ubicados en las márgenes exteriores de las curvas regulares y que presentan un radio único de curvatura, puede variar entre los límites siguientes

$$S_c = (2.5 \text{ a } 4)L_t \quad (4. 5)$$

Cuando la margen es irregular, la separación entre espigones deberá obtenerse en forma gráfica, como se indica en la fig 4.9. Al mismo tiempo quedan fijadas sus longitudes y ángulos de orientación.

e. Separación y longitud de los primeros espigones

Al diseñar la defensa marginal de un tramo de río los primeros espigones de aguas arriba se diseñan como se indica en la fig 4.8, para ello, en el tramo recto aguas arriba de la primera curva, la línea extrema de defensa que se une con la margen hacia aguas arriba forma un ángulo, α , que varía entre 8 y 10 grados. La localización, longitud y separación de los espigones, se obtiene con las recomendaciones explicadas.

f. Pendiente longitudinal, elevación y ancho de la cresta de los espigones

Los espigones pueden ser construidos con pendiente horizontal o teniendo una pendiente hacia el centro del río que pueda llegar a ser de 0.25. Los de cresta horizontal se construyen cuando se desea reducir artificialmente el ancho del río, y con una pendiente longitudinal cuando se desea proteger una margen o rectificar un tramo de río, ver figs 4.6 y 4.10

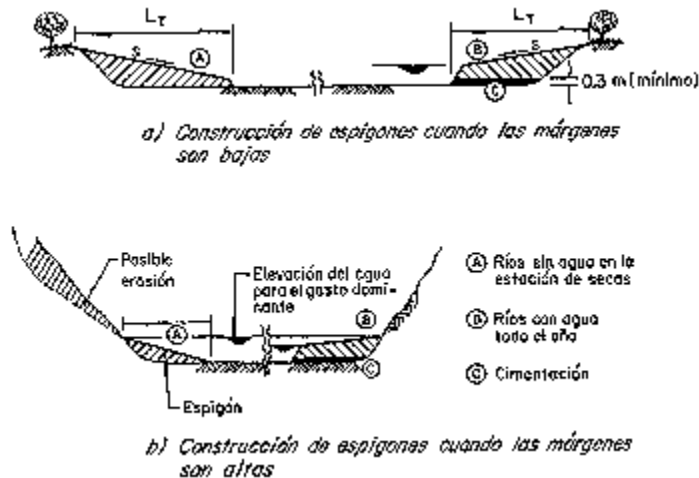


fig 4.10 Construcción de espigones en función de la altura de las márgenes

La elevación del punto de arranque de un espigón en ríos de planicie, será igual a la elevación de la margen; para ríos en zonas intermedias o de montaña será igual a la elevación del agua que corresponda al gasto dominante. El extremo dentro del cauce deberá tener alturas máximas de 50 cm sobre el fondo actual 6 la elevación que tiene el agua durante el momento de la construcción, la que debe efectuarse en la época de estiaje.

El ancho de la corona de los espigones depende de los materiales con que se forman y del procedimiento de construcción empleado

g. Orientación de los espigones

Los espigones pueden estar orientados, hacia aguas abajo o aguas arriba, o también ser normales a la dirección del flujo. La orientación de los espigones se mide por el ángulo que forma el eje longitudinal del mismo con respecto a la tangente trazada a la línea extrema de defensa en el punto de unión con el espigón y medido hacia aguas abajo, ver fig 4.9. Cada orientación tiene diferente influencia sobre lo corriente y por tanto un efecto diferente sobre la socavación y depósito de material alrededor de él. Se ha observado que los espigones orientados hacia aguas arriba producen más depósito de sedimento en la orilla aguas abajo que los que están orientados 90° con respecto al flujo. Los espigones colocados normales al flujo solo protegen áreas pequeñas mientras que los que están dirigidos hacia aguas arriba resisten mejor al poder erosivo de la corriente, esto se basa en las observaciones realizadas por Samide y Beckstead (1975). Sin embargo, Franco (1967) dice que el espigón dirigido hacia aguas abajo presenta un mejor comportamiento desde el punto de vista de socavación, depósito, tirante del canal y alineamiento y que el orientado hacia aguas arriba produce más disturbios al flujo. En la tabla 4.2 se dan recomendaciones para la orientación del espigón.

En un tramo recto en una curva regular conviene que los espigones formen un ángulo α de 70 grados con la dirección de la corriente, si la curva es irregular y, aún más, si tiene un radio de curvatura menor de $2.5 B$, los ángulos de orientación serán menores de 70 grados y pueden alcanzar valores hasta de unos 30 grados.

El espigón no debe provocar cambios bruscos en la dirección de la corriente, más bien debe desviarla gradualmente hacia el sitio en estudio. Los espigones deben colocarse antes del punto donde la corriente empieza a salirse del curso deseado. Si el primer espigón se coloca aguas abajo de donde comienza la socavación provoca que la corriente haga un camino por el extremo de él y como consecuencia de ello se ocasione su destrucción.

h. Permeabilidad de los espigones. Materiales de construcción.

Los espigones pueden ser impermeables o permeables. Los primeros alejan de la orilla las líneas de corriente con alta velocidad, mientras que los segundos reducen la velocidad del flujo por debajo de su límite erosivo y con ello provocan el depósito de material.

Los espigones se pueden construir con una gran variedad de materiales, como son, por ejemplo, tabla-estacados de madera o concreto, troncos de árboles y ramas, elementos prefabricados de mortero o concreto, elementos prefabricados de acero y alambre y con gaviones (cajas formadas con mallas de alambre).

i. Socavación local al pie de espigones

La socavación local en la punta de los espigones es de importancia durante su construcción, ver fig 4.11, cuando se utilizan elementos que están sujetos entre si (bolsas, piedras, gaviones, etc). Si la velocidad es mayor de 50 cm/s conviene recubrir el fondo sobre el que descansará el espigón con una capa de piedra de unos 30 cm de espesor, y después construir el espigón de la orilla hacia el centro del bauce, ver figs 4.10 y 4.12. Esto necesariamente tendrá que hacerse desde barcazas.

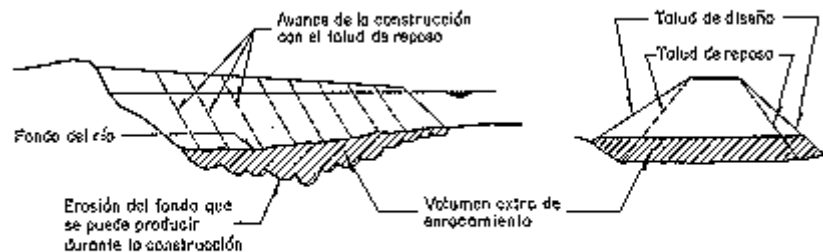


Fig 4.11 Erosión del fondo durante la construcción

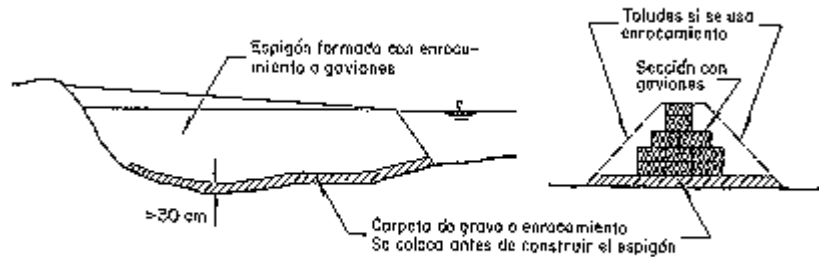


Fig.4.12 Forma de evitar la erosión durante la construcción

Para obtener la socavación al pie del extremo de un espigón, se utiliza la ecuación obtenida por Maza (5, 6) al utilizar los datos y el criterio de Latuischenkov.

$$Y_s = 0.855 d_o [4.17 + \ln Q_1/Q] e^{(0.0028a - 0.24k)} \quad (4.6)$$

donde Y_s es la erosión máxima en el extremo del espigón, medida desde la superficie libre del agua y el fondo de la socavación, y asociada al gasto Q . La profundidad del flujo, d_o , corresponde a la zona cercana al extremo del espigón no afectada por la erosión. Las variables α y k corresponden a la orientación y el talud del extremo del espigón, respectivamente. El gasto teórico Q_1 que podría pasar por la zona ocupada por el espigón se obtiene al calcular el gasto unitario $q = Q / D$ y multiplicarlo por la longitud del espigón proyectada en un plano perpendicular a la dirección del flujo. Para el cálculo de la socavación se utiliza el gasto Q que tiene un periodo de retorno entre 25 y 50 años y es mayor que el dominante.

La profundidad de socavación para un espigón hecho con gaviones puede ser calculada con diferentes fórmulas como las mostradas en la tabla 1 que aparece en Klingeman, P. et al (1984). La flexibilidad del gavión ayuda a mantener la seguridad de la estructura si la socavación que se presenta es mayor que la calculada, en cambio un espigón de enrocamiento no tiene el mismo margen de seguridad.

4.2.3 Estabilidad de la estructura de gaviones

En aquellos lugares donde la roca se encuentra a grandes distancias o no hay, una alternativa viable es el utilizar gaviones de dimensiones variables, adecuadas al proyecto, dispuestos en una o varias hiladas, según sea la altura que debe guardar el espigón.

Las diferentes secciones transversales de un espigón, se proyectarán de acuerdo al empuje del agua que deberá soportar, ver subcapítulo 3.2.2.3 para el análisis de estabilidad, considerando además en las secciones sumergidas el esfuerzo tractivo de la corriente para el gasto máximo de diseño. En la fig 4.13, se muestra la geometría en planta de un espigón.

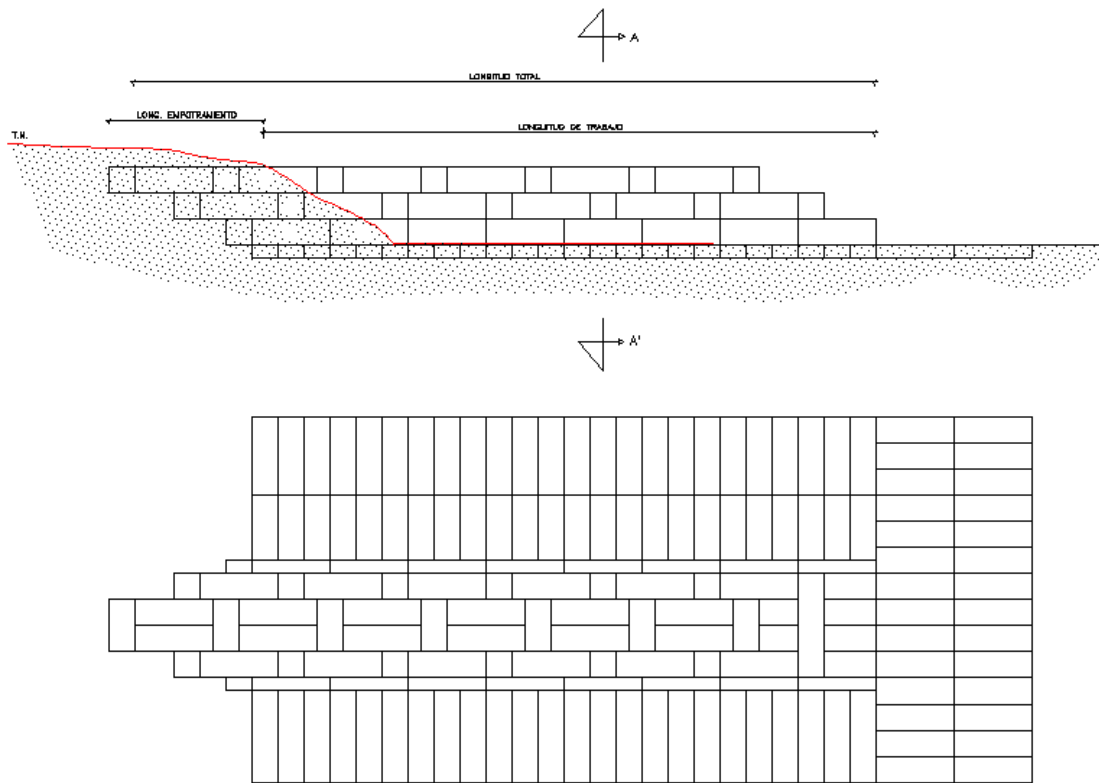


fig 4.13 Espigón de gaviones

4.2.4 Observaciones

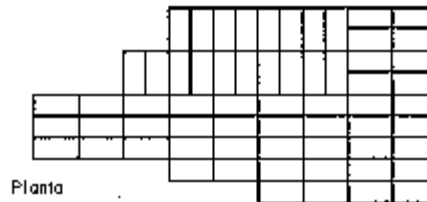
El espigón construido con gaviones tiende a ser más pequeño que el de enrocamiento. Como la finalidad de los espigones es la de desviar la dirección del flujo ello provoca socavación a lo largo de las líneas de corriente bien definidas y como consecuencia de ello se da más profundidad al cauce, esto último es útil cuando se desea que el río sea navegable. Los espigones hechos con gaviones son semi-impermeables ya que primero desvían a la corriente antes que reducir la velocidad de la misma, además ellos tienen la suficiente capacidad de deformación en su estructura. Al acumularse limo alrededor y dentro del espigón ayuda a que se desarrolle vegetación lo cual provoca que la estructura se consolide dentro de la nueva orilla y ello ayuda en el control de la erosión.

Si el escurrimiento amenaza con llegar a la orilla donde está empotrado el espigón se debe dar una pequeña protección marginal a ambos lados del espigón.

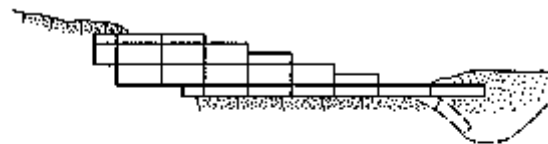
El espigón construido con gaviones no requiere de una excavación previa para colocarlos, sí se espera tener una socavación grande se podrá hacer una pequeña excavación que puede ser útil para minimizar el tamaño del asentamiento diferencial; también este tipo de espigón puede ser colocado directamente sobre el fondo del cauce o bien sobre una losa, esta última formada con un gavión tipo colchoneta.

Por otra parte sí el fondo del cauce no está formado por roca o piedras grandes se coloca una platea de protección formada por una colchoneta, ver figs 4.14a y 4.14b, esta platea puede ser eliminada sí el espigón es pequeño (1 o 2 m de altura y hasta 5 m de ancho). Los gaviones que forman la colchoneta son planos y se colocan sobre el lecho del río, están rellenos con material

de 10 a 20 cms de diámetro y se alambren unos con otros. La flexibilidad de la colchoneta asegura que éste siga la forma de la socavación que se presenta en la punta del espigón, ver fig 4.14b. La colchoneta puede ser delgada, por ejemplo, de 0.5 m o menos, pero con el peso suficiente para conservarla sobre el fondo, resistir el arrastre producido por la corriente y cualquier tendencia a levantarse. La longitud de la platea es función de la socavación esperada, la experiencia ha mostrado que dicha longitud puede variar entre 1.8 y 6.0 m.



a) Espigón hecho con gaviones y platea con colchoneta



b) Comportamiento de la platea

Fig 4.14 Espigón con platea [4]

Para que la colchoneta de protección sea adecuada ella debe extenderse hasta que alcance la máxima socavación que se piensa puede presentarse. La colocación de la colchoneta no requiere de una preparación previa solo bastará con alisar un poco la superficie con la ayuda de un tractor, en caso de que el tirante de agua sea apreciable se arman los gaviones y se colocan con ayuda de una grúa.

No es recomendable la construcción de un solo espigón ya que ello ocasiona que se presenten remolinos que lo único que provocan son más problemas, por ello se ha encontrado que el sistema más reducido que puede usarse es el que está formado por tres espigones.

La punta del espigón debe quedar a una altura igual a la del nivel más bajo del agua y se bisela (ver fig 4.15), y el otro extremo, que esta pegado a la orilla se recomienda que quede 30 cms por encima del nivel más alto del agua y bien anclado a la margen.

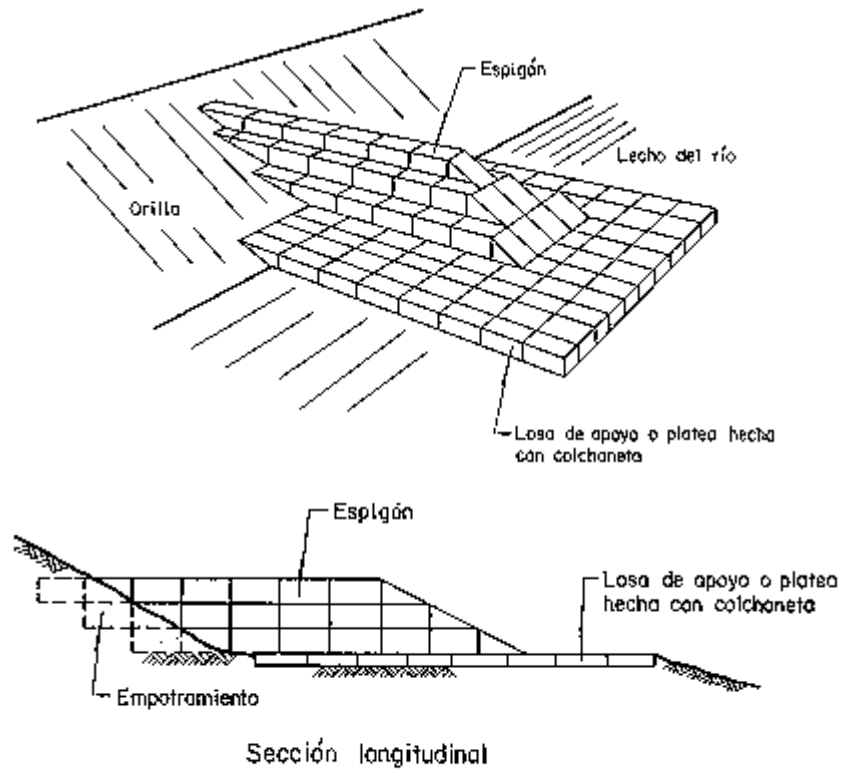


Fig 4.15 Perspectiva de un espigón [8]

4.3 Recubrimientos o muros marginales

Los recubrimientos marginales son estructuras apoyadas directamente en la margen de un río a fin de evitar que la corriente de agua esté en contacto con el material de la margen que protegen.

Los recubrimientos marginales pueden ser permeables, semipermeables e impermeables. Permeables cuando permiten el paso libre del agua pero reducen su velocidad para que esta pierda su capacidad erosiva al no poder arrastrar el material de la margen, los elementos que ayudan a lograr esta solución se llaman "Jacks". Los recubrimientos semi-permeables 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 los huecos que forman el recubrimiento. Los recubrimientos impermeables evitan el contacto entre el material de la orilla y el agua (losas de concreto, recubrimientos asfálticos, muros de mampostería, etc)

4.3.1 Datos necesarios

Para diseñar un recubrimiento marginal se requieren los mismos datos señalados en el subcapítulo 4.2.1, con las variantes siguientes

El espaciado y amplitud de las secciones transversales se reducirán o aumentarán de acuerdo a la irregularidad de la margen para realizar el diseño de la protección. Para la formación del filtro (grava y arena) es necesario conocer la ubicación de banco de materiales, así como la granulometría y peso específico de las partículas,

4.3.2. Recomendaciones de diseño

Los aspectos más importantes a tener en cuenta al diseñar un recubrimiento marginal, se comentan a continuación, aplicados a recubrimientos formados con enrocamiento y se complementarán para otros materiales.

a. Localización en planta

El diseño se realiza en forma similar que cuando se utilizan espigones, es decir, se dibuja el eje del nuevo cauce, ver subcapítulo 4.2.2; se marca la orilla y el pie del talud de la margen. Posteriormente y paralelo al eje del río, se traza el pie del talud de la futura protección y por último, la línea extrema de protección, ver figs 4.16 a 4.18.

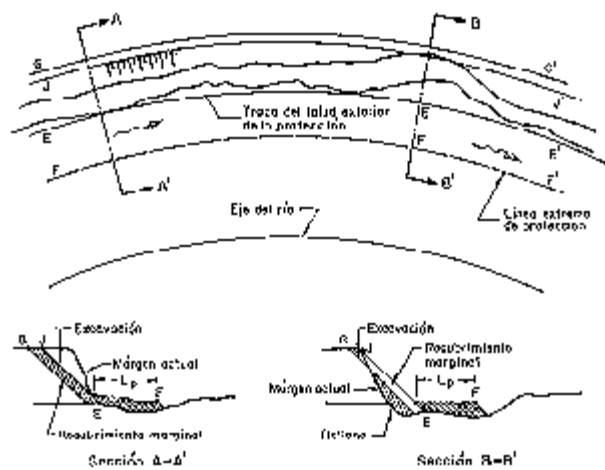


Fig 4.16 Trazo del eje del río y de la línea del pie del talud de la protección [6]

Los recubrimientos marginales se utilizan también para proteger curvas con radios menores que $2B$. Con ello los radios de curvatura del eje del río deben valer

$$r \leq 8B \quad (4.7)$$

donde r es el radio de la curva medido al centro del cauce.

Cuando únicamente se desea evitar los movimientos laterales de un río, sin reducir el ancho del cauce, los recubrimientos solo se colocan 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, ver fig 4.17. Cuando las prolongaciones son costosas conviene reducir su longitud, lo cual es posible cuando se protegen todas las curvas de un tramo largo de un río, y con un poco de experiencia se visualizan, en el plano en planta, las zonas de los tramos rectos que no requieren protección, ver fig 4.18. Las partes interiores de los ríos no se protegen.

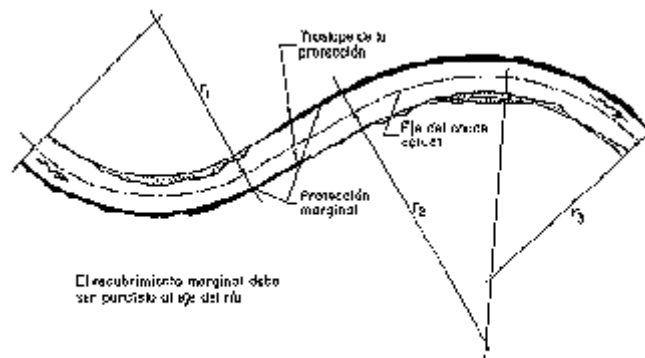


Fig 4.17 Recubrimiento marginal para fijar el cauce actual

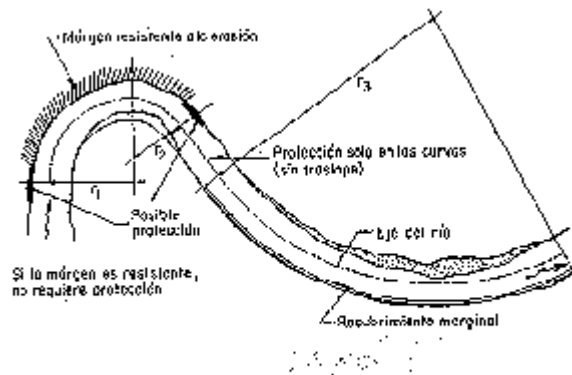


Fig 4.18 Recubrimiento marginal para fijar el cauce

b. Talud de la protección

Simultáneamente con la localización en planta, en cada sección transversal se traza una línea vertical en el lugar en que corresponde a una línea que señala la traza del talud exterior de la protección. A la vista de todas las secciones se selecciona una elevación promedio del fondo, la que se marca en la línea vertical mencionada. Con ello se visualiza la ubicación del pie del talud de la futura protección. A partir de este punto se trazará el talud seleccionado que tendrá la protección. De esta forma se conocerán las zonas que deben ser rellenadas o los cortes que se tienen que realizar antes de colocar el enrocamiento o el material del recubrimiento.

Se recomienda usar el talud 2:1 por facilidad constructiva con enrocamiento, losas de concreto o colchonetas formadas con malla metálica y rellenas con grava o boleó. Cuando el proyecto requiere de taludes verticales, por ejemplo al cruzar una población con el objeto de ganar terreno al río o bien para no destruir construcciones que estén cerca de la orilla, se recurre a tabla-estacados, muros de concreto o mampostería, y muros formados con gaviones

c. Dimensionamiento de los recubrimientos

c.1 Semi-impermeables

Se forma con enrocamiento o colchonetas de malla metálica rellenas con grava o boleó, descansando sobre la márgen, la cual deberá de ser perfilada al talud deseado y compactado, ver fig 4.19.

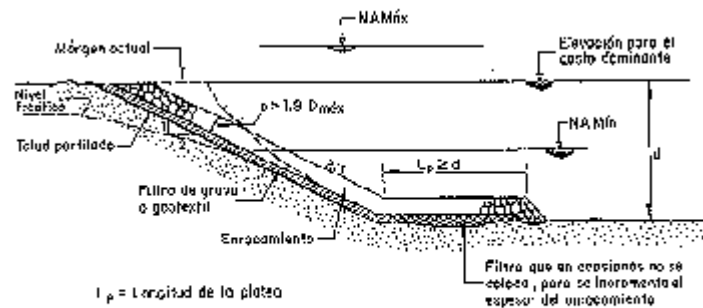


Fig 4.19 Recubrimiento marginal de enrocamiento sobre talud perfilado

Los recubrimientos marginales formados con enrocamiento deben 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 por un filtro que evite que las partículas que forman la márgen del río salgan entre los huecos de la coraza del recubrimiento cuando el nivel freático en la márgen tiene una elevación superior a la elevación de la superficie libre del río, ver fig 4.20.

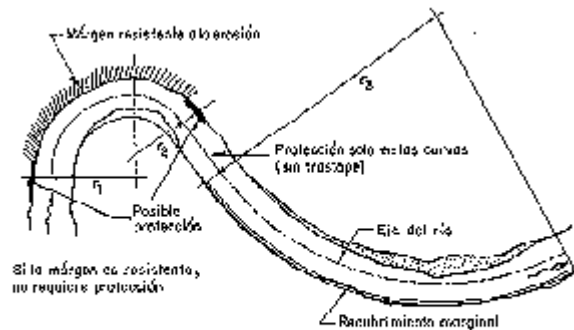


Fig 4.20 Recubrimiento marginal de enrocamiento sobre talud perfilado

c.2 Recubrimientos marginales impermeables

Estos se forman usualmente con gaviones tipo colchoneta inyectando concreto hidráulico o colocando una capa asfáltica y se utilizan en ríos y canales en los que puede trabajarse en seco.

El 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, ver fig 4.21.

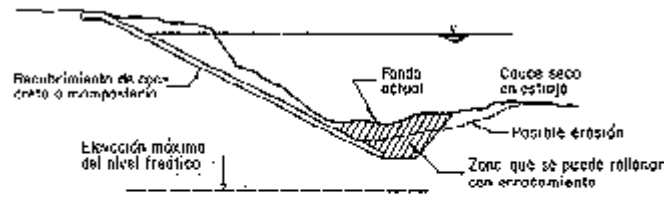


Fig 4.21 Recubrimiento impermeable en pequeños cauces

En zonas donde los ríos cruzan poblaciones se utilizan con frecuencia muros verticales de gaviones, desplantándose a una profundidad tal que no pueda el río llegar a erosionarla, ver fig 4.22.

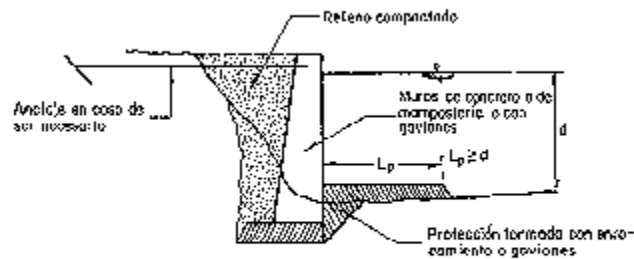


Fig 4.22 Recubrimiento marginal vertical

c.3 Recubrimientos marginales permeables

Son obras que permiten colocar a una cierta distancia de la orilla y a lo largo de ella, algún elemento que no pueda ser arrastrado por la corriente y que permita que la vegetación y basura que transporta la corriente queden detenidos en ellos, ejemplos de dichas obras están, por ejemplo, los pilotes separados entre sí y alineados a lo largo de la línea extrema de defensa, los Jacks (ver fig 4.23), etc.

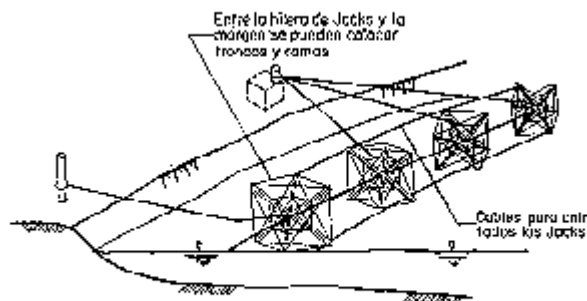


Fig 4.23 Recubrimiento marginal permeable formado con Jacks

d. Protección contra la erosión local

La causa principal de la falla y destrucción 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 y se puede deber a la erosión general en el cauce o a la erosión en curvas.

Entre los procedimientos para evitar que un recubrimiento sea socavado, se pueden mencionar, el desplantar la protección a una profundidad tal que no sea afectada por la erosión general o la erosión en curvas; el excavar una trinchera al pie del recubrimiento, rellenándola con un material que no pueda ser arrastrado por la corriente; y finalmente en lugar de profundizar la protección se puede colocar una platea a base de gaviones o enrocamiento sobre el fondo del cauce con elementos que no sean arrestados por la corriente, ver fig 4.24

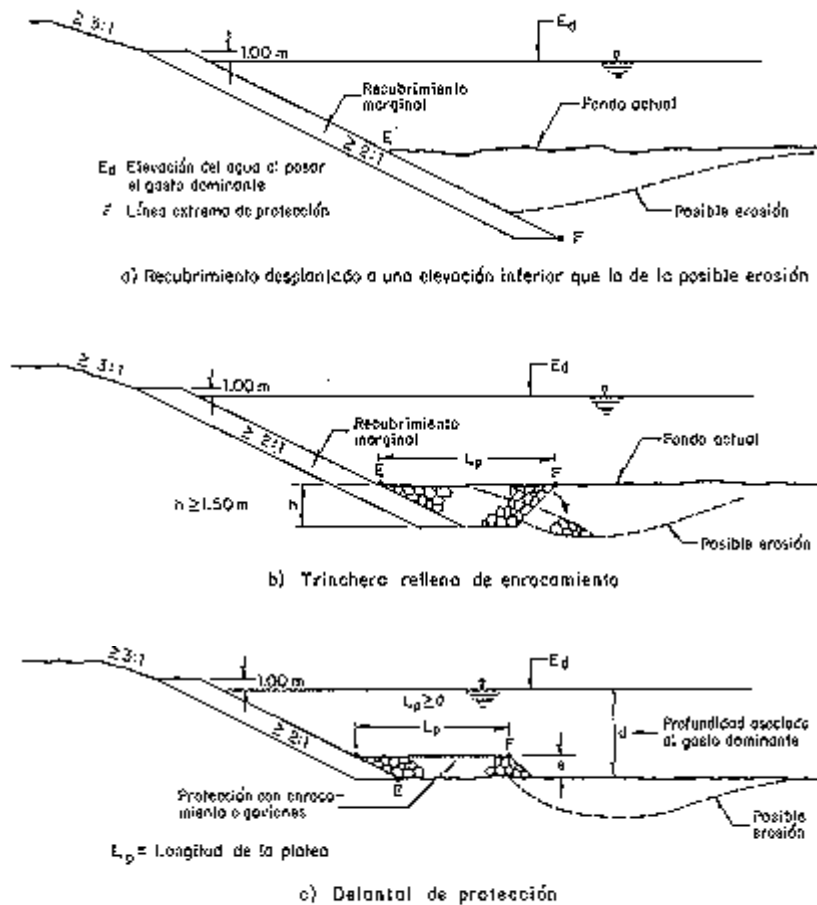


Fig 4.24 Formas de proteger un recubrimiento marginal contra la erosión

e. Altura de la protección

En los ríos de planicie, se recomienda que la protección llegue hasta el borde superior de la orilla, es decir, que la protección alcance toda la altura de la margen. En ríos que no son de planicie, el recubrimiento marginal, se llevará un metro más arriba del nivel del agua al pasar el gasto dominante, ver fig 4.24.

4.3.3 Estabilidad de la estructura de gaviones

Para calcular la protección con gaviones tipo colchoneta, conocidos la pendiente, el tirante correspondiente al gasto de diseño y el talud de la margen, se determinan los componentes normal, F_n , y tangencial, F_t , del peso sumergido de un cierto volumen de material de protección, g_s , correspondiente a un metro cuadrado de gavión, localizado en la superficie de una margen, cuya pendiente ($\tan \theta$) es lo suficientemente tendida para que el material que la forma esté en reposo, ver fig 4.25.

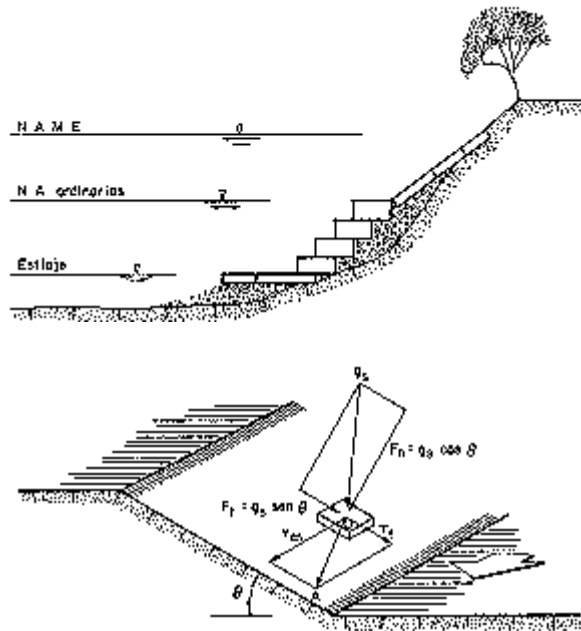


Fig 4.25 Protección de la margen actual o rectificadas de un río

$$F_n = g_s \cos \theta$$

(4.8)

$$F_t = g_s \sin \theta$$

En el caso de un cauce que lleva un cierto caudal, habrá de tomar en cuenta, el efecto del arrastre de la corriente. Definiéndose el esfuerzo cortante producido por la corriente en el fondo, τ_f , y en la margen, τ_m , según las expresiones

$$\tau_f = \gamma_w S d$$

(4.8)

$$\tau_m = 0.8 \tau_f$$

donde γ_w es el peso específico del agua, incluyendo el peso del material en suspensión, d es el tirante máximo del agua, se esta suponiendo que la sección es muy ancha y por tanto $R_H \approx d$, y S la pendiente hidráulica.

El análisis de estabilidad de la protección con gaviones tipo cochoneta, se realiza para los taludes, al pie de los taludes y en la cimentación de la protección marginal.

I. Protección de talud

I.1 Condición de no arrastre

Al considerar exclusivamente la inestabilidad provocada por la fuerza de arrastre de la corriente, en el gavión de protección localizado a un cierto punto "x" de la sección transversal del cauce, al cual corresponde una profundidad H_x , cuyo valor está en función de la pendiente θ de la márgen, y el ángulo de fricción ψ entre la superficie del gavión y del terreno. El equilibrio se logrará al imponer a dicho material la condición siguiente

$$g_s \cos \theta \tan \psi = 0.8 \gamma_w S d \quad (4.10)$$

y el espesor requerido por el colchón, e_x , en ese punto será

$$e_x = 0.8 C S d / \gamma_s \cos \theta \tan \psi \quad (4.11)$$

donde el factor de seguridad es C y el peso específico sumergido del gavión relleno, incluyendo el peso del agua de los huecos es γ_s . Calculado el espesor e_x de esta manera deberá de ajustarse a la medida estandar de gavión más próxima.

I.2 Condición de no deslizamiento

Una vez determinado el espesor, o los espesores de los gaviones requeridos en toda la longitud transversal del talud que necesita protección, se procede a revisar la condición de no deslizamiento sobre la superficie inclinada en que se apoyan.

La revisión se efectúa sobre una faja de gaviones, cuya longitud será igual a la longitud transversal protegida del talud, y con un ancho paralelo al eje del cauce de un metro.

Al presentarse una falta de equilibrio debido a la combinación de las fuerzas totales de arrastre de la corriente y la componente tangencial del peso sumergido del material de protección, el deslizamiento de la faja no será la línea de máxima pendiente, en un plano perpendicular al eje del cauce, sino un recorrido inclinado, como el que se indica en la fig 4.26. Al igualar la fuerza de fricción, $N \tan \psi$, con la resultante de las dos fuerzas, τ_m y T , para lograr el equilibrio de la protección, se tiene que

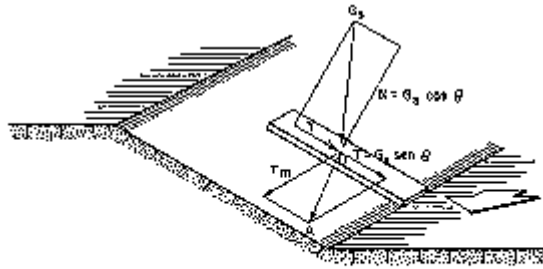


Fig 4.26 Presiones que actúan sobre una faja de gaviones que protegen una márgen

$$G_s \cos \theta \tan \psi = [\tau_m a^2 + G_s \sin^2 \theta]^{0.5} \quad (4.12)$$

donde G_s es el peso total sumergido de los gaviones, incluyendo el agua que llena los huecos; y a el área de la faja de gaviones.

Cuando el término de la izquierda de la ec 4.12 es mayor que el término de la derecha, los gaviones para proteger la márgen serán estables, siendo necesario prever una platea a base de gaviones apoyada en el fondo del cauce, ver fig 4.27, como protección contra socavaciones al pie del talud. Cuando el término de la izquierda es menor que el de la derecha, el material de protección tenderá a deslizarse sobre la superficie inclinada de la márgen, siendo necesario colocar al pie del talud, apoyado en el fondo del cauce, un muro de contención de gaviones que soporte dicho empuje, logrando así el equilibrio de las fuerzas, ver fig 4.28.

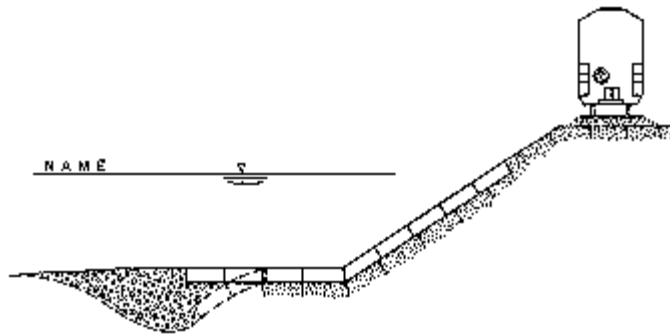


Fig 4.27 Revestimiento marginal cimentado sobre una platea

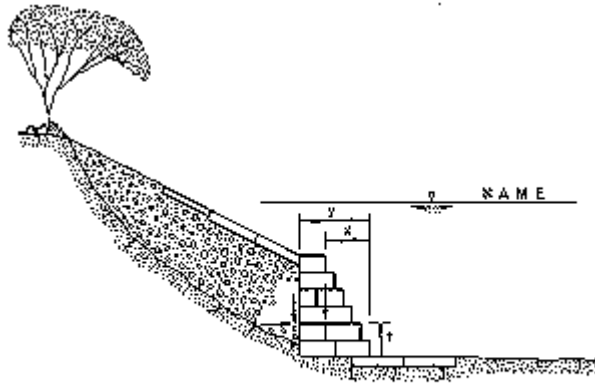


Fig 4.28 Muro de contención localizado en el cauce del río

II. Protección al pie del talud

La secuencia de cálculo para la protección al pie del talud, ver fig 4.28, se puede ver en el subcapítulo 3.2.2.3, para las fuerzas hidráulicas y en el cap 5 de este Manual, para el empuje de tierra y la estabilidad del muro.

III. Cimentación de la obra

Al hablar de las características funcionales de la estructura de gaviones, la platea es la clásica cimentación de las obras localizadas en un cauce y expuestas a la erosión de la corriente, ver fig 4.29

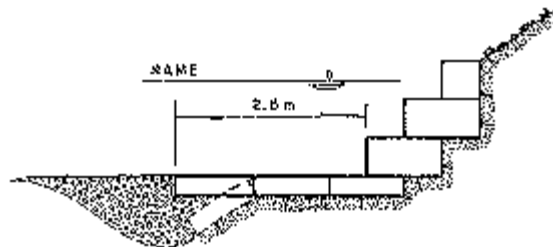


Fig 4.29 Defensa marginal cimentada sobre una platea

Para que la platea cumpla con su función de proteger el cuerpo principal de la obra, contra las socavaciones producidas por la corriente, su peso sumergido debe mantenerla adherida al fondo del cauce. Al considerar un metro cuadrado de platea se tiene que

$$g_s \tan \psi = \tau_f \quad (4.13)$$

y por lo tanto su espesor deberá cumplir con la condición siguiente:

$$ep > \gamma_w S d / \gamma_s \tan y \quad (4.14)$$

La longitud libre de la platea, es decir, la parte que sobresale del cuerpo principal de la obra, debe ser suficiente para alcanzar el fondo de la socavación y detener de esta manera el fenómeno erosivo del agua. Se recomienda que dicha longitud libre tenga una dimensión igual 1.5 a 2 veces la profundidad de la socavación.

El espesor de la capa de gaviones, es función de la pendiente de la orilla que se va a proteger, utilizando uno de 30 cms para pendientes menores a 0.5 : 1, en cambio se usa de 50 cms para pendientes 1 : 1. Sí la pendiente sobrepasa a los valores indicados la protección se diseña como un muro de retención (cap 5 de este Manual), ver fig 4.30.

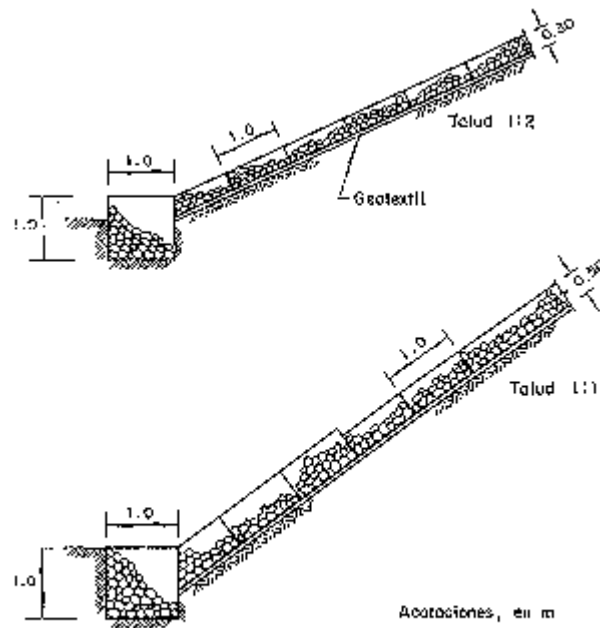


Fig 4.30 Protección marginal con gaviones

Se recomienda que cuando la margen este formada en su mayor parte por material fino, como son, por ejemplo, las arcillas o los limos, se necesita colocar debajo de los gaviones una tela permeable (geotextil) hecha con material sintético, para que no sea arrastrado dicho material por el flujo, ver figs 4.30 y 4.31.

Como el pie del talud es el más propenso a sufrir daños por socavación se necesita colocar un gavión de apoyo, él cual puede ser, por ejemplo, de 2 x 1 x 1 m, ver figs 4.30 y 4.31.

Cuando la margen esta formada por limos y/o arcillas existe la posibilidad de que se presenten derrumbes, ello ocurre cuando la orilla ha estado inundada un tiempo grande y se presenta una súbita disminución en el nivel de agua, en estos casos se sugiere usar un muro de retención.

En ocasiones el recubrimiento con gaviones puede variar en espesor a medida que se va ascendiendo sobre el talud, en las figs 4.30 y 4.31 se muestra un ejemplo de este tipo de protección.

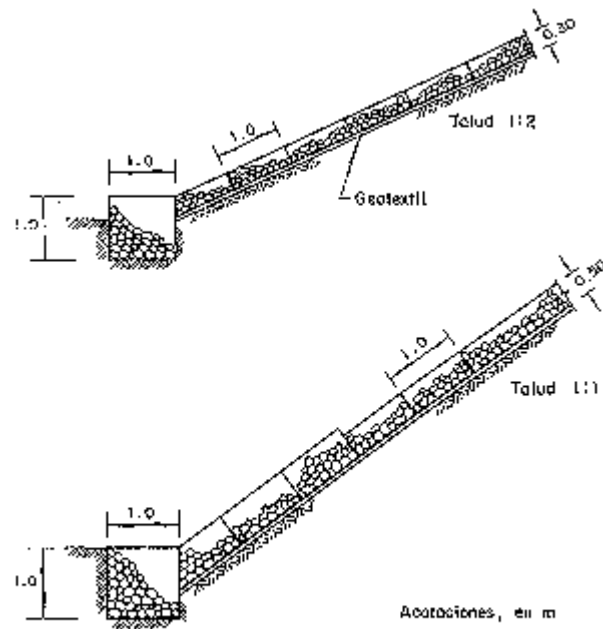


Fig 4.31 Protección marginal con gaviones

4.4 Canalización

4.4.1 Consideraciones de diseño

En ocasiones a los gaviones tipo colchonetas se les usa para canalizar una corriente o bien para el revestimiento de las orillas y fondo de un canal, ver fig 4.32. En este caso lo que se presenta es el problema de la estabilidad de los elementos, para ello se sugiere usar el procedimiento que se describe a continuación. ver Sociedad Colombiana de Ingenieros (1992).

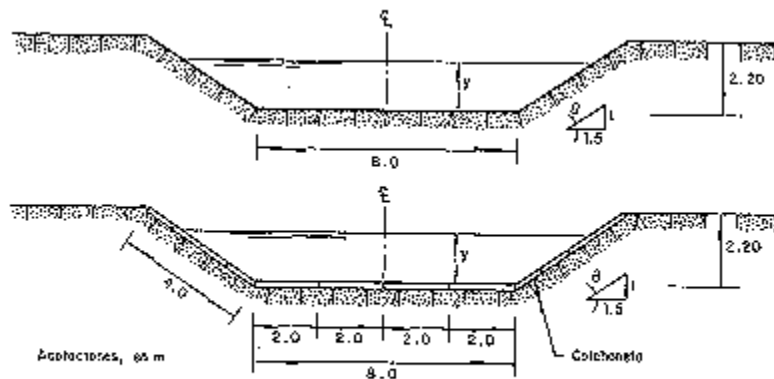


Fig 4.32 Sección transversal de una canalización con gaviones, tipo colchonetas

1. Son datos la forma y ancho de la sección (rectangular, trapecial, etc), el gasto, la curva granulométrica, peso específico de la roca que se usa para el llenado de los gaviones y la pendiente S.
2. Se calcula el coeficiente de rugosidad con ayuda de la tabla 2.1 o bien con la ecuación siguiente

$$n = (D_{90})^{1/6} / 26$$

donde

D_{90} diámetro que se obtiene de la curva granulométrica, en m

3. Se calcula el área, el perímetro mojado, el radio hidráulico, ancho de superficie libre en función del tirante (A, P, R Hy B).

4. Se usa la ecuación de Manning para calcular el tirante usando la ecuación siguiente

$$Q n / S^{1/2} = R_H^{2/3}$$

donde el valor de A y R_H son función del ancho y del tirante, como el ancho se conoce se calcula el tirante por iteraciones.

5. Conocido el tirante se calcula la velocidad del flujo con

$$v = 1/n R_H^{2/3} S^{1/2}$$

Con la velocidad del flujo y el tipo de suelo sobre el que va a colocarse el gavión y con ayuda de la tabla 4.3 se selecciona el espesor de la colchoneta.

6. Se calcula el número de Froude

$$F = v / \sqrt{g A/B} = v / \sqrt{g Y}$$

donde Y es el tirante hidráulico e igual a A/B, A es el área hidráulica y B es el ancho de superficie libre. Si el $F > 1$ la corriente es rápida, y si el $F < 1$ la corriente es lenta

7. Conocido el F y el D_m (diámetro medio de las partículas de relleno que se obtiene de la curva granulométrica) se usa la fig 4.33 para obtener la velocidad crítica v_c con la cual se inicia el movimiento; luego se compara con la que lleva el escurrimiento (calculada en el paso 5); si $v < v_c$ no hay movimiento de las piedras y si $v > v_c$ hay que cambiar el espesor del gavión, tipo colchoneta.

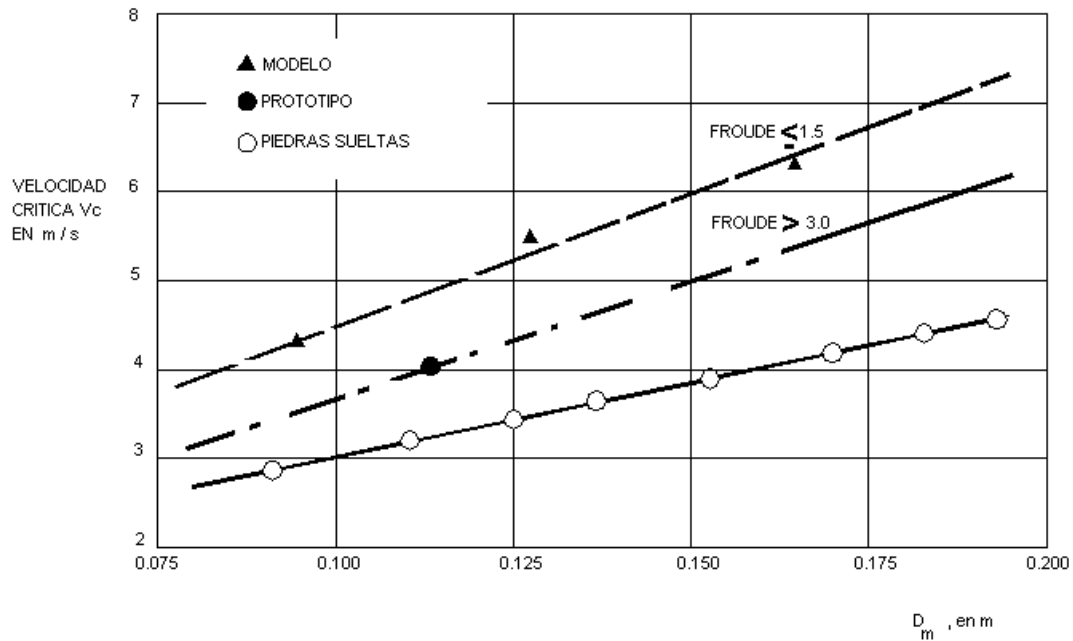


fig 4.33 Velocidad crítica

8. Se calculan los esfuerzos cortantes sobre el fondo que provoca el escurrimiento τ_b y el crítico τ_{bc} dados por

$$\tau_b = \gamma_w R_H S$$

$$\tau_{bc} = \tau_* (\gamma_s - \gamma_w) D_m$$

donde τ_* es el coeficiente de Shields para inicio del movimiento de las partículas y vale 0.047 para enfocamiento y 0.10 para colchonetas; y γ_s peso específico de las partículas con que se rellenan los gaviones, en kgf/m^3 .

9. Se calculan los esfuerzos cortantes sobre las orillas que provocan el escurrimiento y el crítico dados por

$$\tau_s = 0.75 \gamma_w R_H S$$

$$\tau_{sc} = \tau_{bc} \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta}{\sin^2 \phi}}$$

donde θ es el ángulo de inclinación de la orilla y ϕ el ángulo de reposo del material.

10. Sí $\tau_b < \tau_{bc}$ y $\tau_s < \tau_{sc}$ el revestimiento es estable y no hay deformación, Sí $\tau_{bc} < \tau_b \leq 1.2$ y $\tau_{sc} < \tau_s \leq 1.2 \tau_{sc}$ en el revestimiento se produce una deformación aceptable, la ser verificada.

11. Se calcula el parámetro $\Delta Z/D_m$ para ver el grado de deformación, para ellos se utilizan las dos expresiones siguientes

Para el fondo

$$\tau'^* = \tau_b - \tau_{bc} / (\gamma_s - \gamma_w) D_m$$

Para la orilla

$$\tau'^{**} = \tau_s - \tau_{sc} / (\gamma_s - \gamma_w) D_m$$

Con ayuda de la fig 4.34 y de τ'^* y τ'^{**} se obtiene $\Delta Z/D_m$ y se dice que la deformación es aceptable sí se cumple que

$$\Delta Z / D_m \leq 2 [e/D_m - 1]$$

donde e es el espesor del gavión.

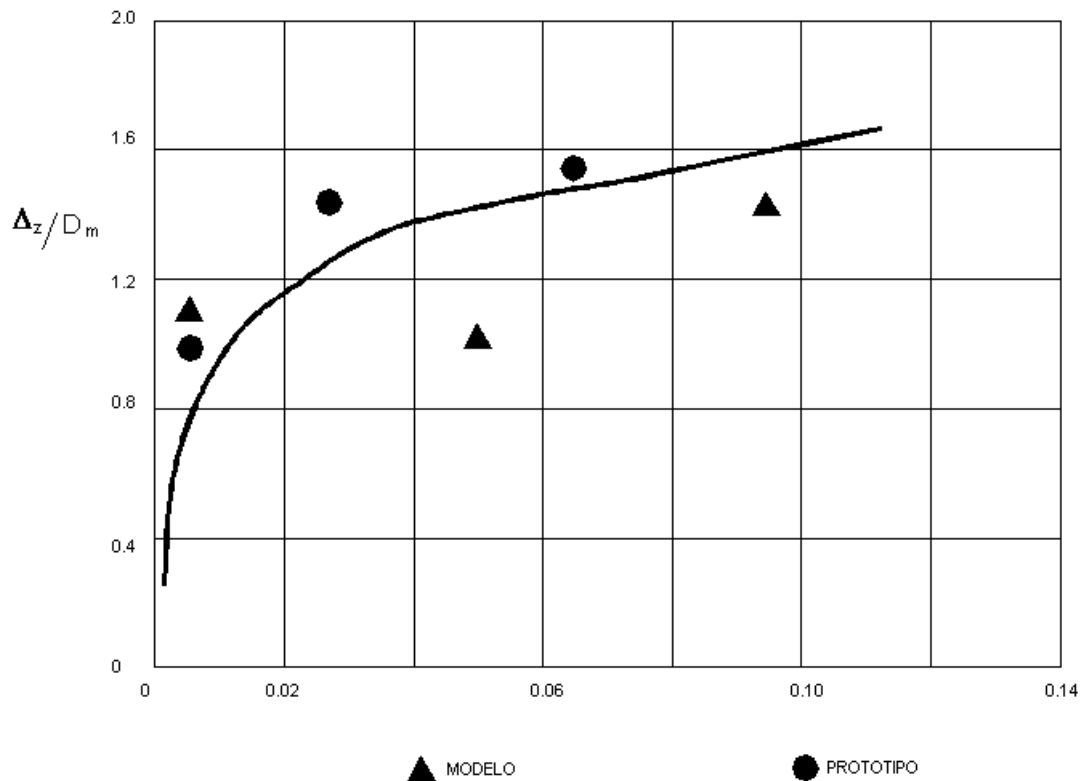


fig 4.34 Valores del coeficiente de shields

En caso contrario, la deformación es excesiva y se tiene que volver a empezar el cálculo aumentando el espesor del gavión tipo colchoneta, y el tamaño de las piedras.

12. Si $\tau_b > 1.2 \tau_{bc}$ y $\tau_s > 1.2 \tau_{sc}$ el revestimiento no es apto y se debe comenzar nuevamente el cálculo aumentando el espesor del colchón y el tamaño de la piedra.

13. Se calcula la velocidad que se tiene por debajo del colchón con la ecuación siguiente

$$v_b = 1/n_f [D_m/ 2]^{2/3} S^{1/2}$$

donde n_f es el coeficiente de rugosidad del fondo donde se asienta la colchoneta, ver tabla 2. 1.

14. Se calcula la velocidad que resisten las partículas del fondo

- Para material no cohesivo se tiene que

$$v_e = 16.1 (D_{50})^{1/2}$$

donde D_{50} corresponde al material del fondo.

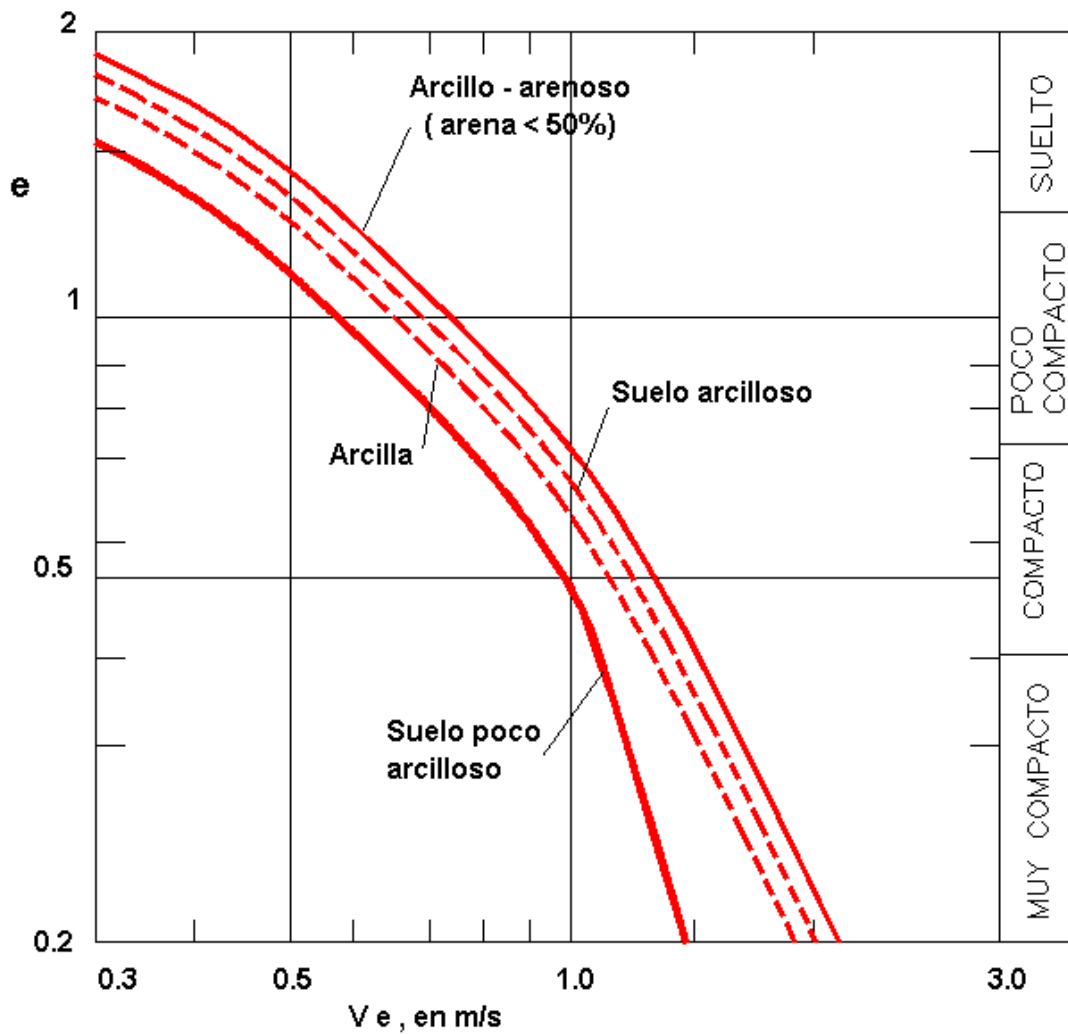
- Para suelos cohesivos se usa la fig 4.35 y se necesita conocer el valor de la relación de vacíos e .

15. Se hace una comparación entre v_b y v_e

Si $v_b > v_e$ se necesita disminuir el tamaño de las piedras del colchón o bien colocar un filtro, el cual se puede hacer por ejemplo, con un geotextil. Este filtro debe tener por lo menos un espesor de 15 a 20 cm y de todas maneras debe ser mayor o igual que

$$e' = D_v / f [1 - (v_e/v_b)^2]$$

donde f es el coeficiente de Darcy-Weisbach, que para el caso de gaviones es igual a 0.05; D_v diámetro equivalente de los vacíos.



4.35 Velocidad máxima permisible

1.4.2 Recomendaciones de diseño

En las canalizaciones el uso de los gaviones presenta grandes ventajas con respecto a los diferentes tipos de materiales que comúnmente se utilizan, por ejemplo, si se utilizarán losas de concreto que estén apoyadas sobre un terreno blando y húmedo se fracturan fácilmente al fallar su cimentación, en cambio los gaviones pueden sufrir asentamientos diferenciales grandes pero quedan en condiciones de seguir trabajando satisfactoriamente.

Por otra parte el usar este tipo de revestimiento tiene la enorme ventaja de ser reparado rápidamente y con un costo mínimo en el caso de que una malla se rompa, ya que solo bastará con coser la malla averiada con alambre del mismo calibre; otra ventaja que presentan los gaviones es que todos están unidos entre sí y forman un solo elemento que presenta gran resistencia al arrastre que provoca la corriente.

El espesor del revestimiento depende del tipo de material de que están constituidos el fondo y las orillas, la velocidad del flujo, etc, también intervienen la pendiente y el alineamiento del canal

(un espesor de 30 cm es adecuado en tramos rectos y de 50 cms en secciones curvas y en zonas donde los taludes esten inclinados más de 45 grados.

Si el radio hidráulico es mayor de 1.5 m se recomienda utilizar un valor constante de $n = 0.025$ si el material de relleno del gavión tiene un tamaño que varía entre los 5 y 25 cms.

4.5 Referencias

1. Agostini, R et al, "Rivestimenti flessibili in materassi Reno e gabbioni nei canali enei corsi d' acqua canalizzati", Officine Maccaferri SPA, Bologna, Italia, 1985.
2. Franco, J, "Research for river regulation dike design", Journal of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division, ASCE, vol 93, No WW3, aug 1967, pp 71-87.
3. Gaviones Lemac S A, "Principales características y aplicaciones del gavión Lemac", México.
- 3a. Kinori, B Z and Mevorach, J, "Manual of Surface Drainage Engineering (vol II)", Elsevier, Amsterdam 1984.
4. Klingman, P et al, "Streambank erosion protection and channel scour manipulation using rockfill dikes and gabions", Water Resources Research Institute, Oregon State University, sep 1984.
5. Maza Alvarez, J A "Contribución al diseño de espigones", Memorias del XIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Vol 3, Montevideo, nov 1990.
6. Maza Alvarez, i A y García Flores, M, "Estabilidad y rectificación de ríos", Manual de Ingeniería de Ríos, Comisión Nacional del Agua, capítulo 14, México.
7. Samide, G and Beckstead, G "Design considerations for stream groynes", Alberta Department of the Environment, Environmental Engineerin Support Service, Technical Services Division, oct 1975
8. Secretaría de Obras Públicas, "Gaviones metálicos", Departamento de Antioquía, Colombia.
9. Suárez, J, "Diseño de obras en gaviones", Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, nov 1987.
10. Sociedad Colombiana de Ingenieros Andimallas LTDA , "Memorias: Estructuras flexibles, en gaviones y colchonetas Reno", Santa Fé de Bogotá, Colombia, jul 1992

TABLA 4.1 Valores recomendados para la relación Separación/Longitud para espigones, según Klingeman, P et al (1984)

| Separación / Longitud | Tipo de orilla | Referencia | Observaciones |
|------------------------------|-----------------------|--|---------------------------------------|
| 1 | Cóncava | United Nations, 1953 | Práctica general |
| 2 a 2.5 | Convexa | United Nations, 1953 | Práctica general |
| 1 | Cóncava | Bendegom (Samide and Beckstead, 1975) | |
| 2 a 2.5 | Convexa | Bendegom (Samide and Beckstead, 1975) | |
| 1.5 | | Mathes, 1956 | |
| 1.5 | Cóncava | Los Angeles, District, 1980** | Bordo protegido |
| 2.0 | Recta | Los Angeles, District, 1980** | con enrocamiento |
| 2.5 | Convexa | Los Angeles, District, 1980** | |
| 2 | | U.S. Army (Samide and Beckstead, 1975) | Típica para el río Mississippi |
| 2 a 2.5 | | Central Bd of Irrig and Power, 1971 | |
| 2 | | Neill, 1973 | Dos o más espines |
| 4 | | Neill, 1973 | |
| 2 a 4 | Curva | Alvarez | |
| 5.1 a 6 | Recta | Alvarez | |
| 3 | Cóncava | Grant, 1948 | La variación depen de de la curvatura |
| 3 a 4 | | Acheson, 1968 | |
| 3 a 5 | x | Strom, 1962 | |
| 4.29 | Recta | Ahmad, 1951 | |
| 5 | Curva | Ahmad, 1951 | |
| 4 a 6 | Cóncava | Richardson and Simons, 1973 | La orilla puede requerir enrocamiento |

TABLA 4.2 Angulo entre el espigón y la orilla, según Klingeman, P et al (1984)

| Angulo recomendado entre el espigón y la orilla, en grados* | Referencia |
|--|--|
| 100 - 120 | United Nations, 1953 |
| 100 - 120 | Central Board of Irrigation and Power, 1971 |
| 100 - 110 | Mamak, 1964 |
| 100 - 110 (orilla convexa) | Samide and Beckstead, 1975 |
| 100 o menos (orilla cóncava) | Samide and Beckstead, 1975 |
| 90 | U S Army, Corps of Engineers, 1983(en Copeland, 1983) |
| 90 | Richardson and Simons, 1973(en Copeland, 1983) |
| 90 | U S Army, Corps of Engineers, Memphis and Vicksburg Districts(en Copeland, 1983) |
| 90 o aguas abajo | U S Corps of Engineers, 1970(en Copeland, 1983) |
| 90 o aguas abajo | Missouri River (Lidner, 1969) |
| 75 ~ 90 | Red River, Arkansas River(Lindner, 1969) |
| 70 ~ 90 (30 para curvas cerradas) | Alvarez, México (en Copeland, 1983) |
| 75 | U S Army Corps of Engineers, Los Angeles District, 1980 (en Copeland, 1983). |
| Aguas abajo | Franco, 1967 |
| Aguas abajo | Lindner, 1969 |

* Medido entre la línea de orilla aguas abajo y el eje del espigón.

TABLA 4.3 Espesor recomendado para las colchonetas, según Kinori y Mevorach (1984)

| <i>Tipo de suelo</i> | <i>Velocidad del flujo 2 m/s</i> | <i>Velocidad del flujo 3 m/s</i> | <i>Velocidad del flujo 4.5 m/s</i> | <i>Velocidad del flujo 5 m/s</i> | <i>Velocidad del flujo 6 m/s</i> |
|------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| | <i>Espesor de la Colchoneta</i> | <i>Espesor de la Colchoneta</i> | <i>Espesor de la Colchoneta</i> | <i>Espesor de la Colchoneta</i> | <i>Espesor de la Colchoneta</i> |
| Arcilla, suelo cohesivo duro | 0.17 | 0.23 | 0.30 | | |
| Limo. arena fina | 0.23 | 0.30 | | | |
| Guijarros con gravas | 0.17 | 0.17 | 0.20 | 0.23 | 0.30 |