



Revestimientos de canales y cursos de agua

Manual Técnico

MACCAFERRI

PRESENTACIÓN

El revestimiento y la protección de las márgenes de las canalizaciones puede representar hasta el 25% del costo de construcción de estas obras, en particular en las aplicaciones destinadas a la navegación y drenaje.

Por este motivo, el diseño adecuado de estos elementos debe merecer cuidadoso análisis y atención, con el objetivo de juntar al mejor desempeño técnico el menor costo.

El empleo de gaviones tipo colchón Reno® y de geomantas para el revestimiento de canales es una solución práctica y cada vez más usual en función de sus ventajas, como la rapidez de colocación y durabilidad.

Los criterios de dimensionamiento y selección de la solución más adecuada consideran, en general, los parámetros velocidad y tensión de arrastre.

Para estos parámetros, hay disponibles ábacos de selección indicando la faja de aplicación recomendada (figura 1).

En este texto son presentados y discutidos los fundamentos teóricos y los criterios para el dimensionamiento de los revestimientos y protecciones de márgenes, con el uso de colchones Reno® y geomantas.

Para una mejor comprensión del tema también son presentados ejemplos prácticos de dimensionamiento y de aplicación de estos revestimientos.

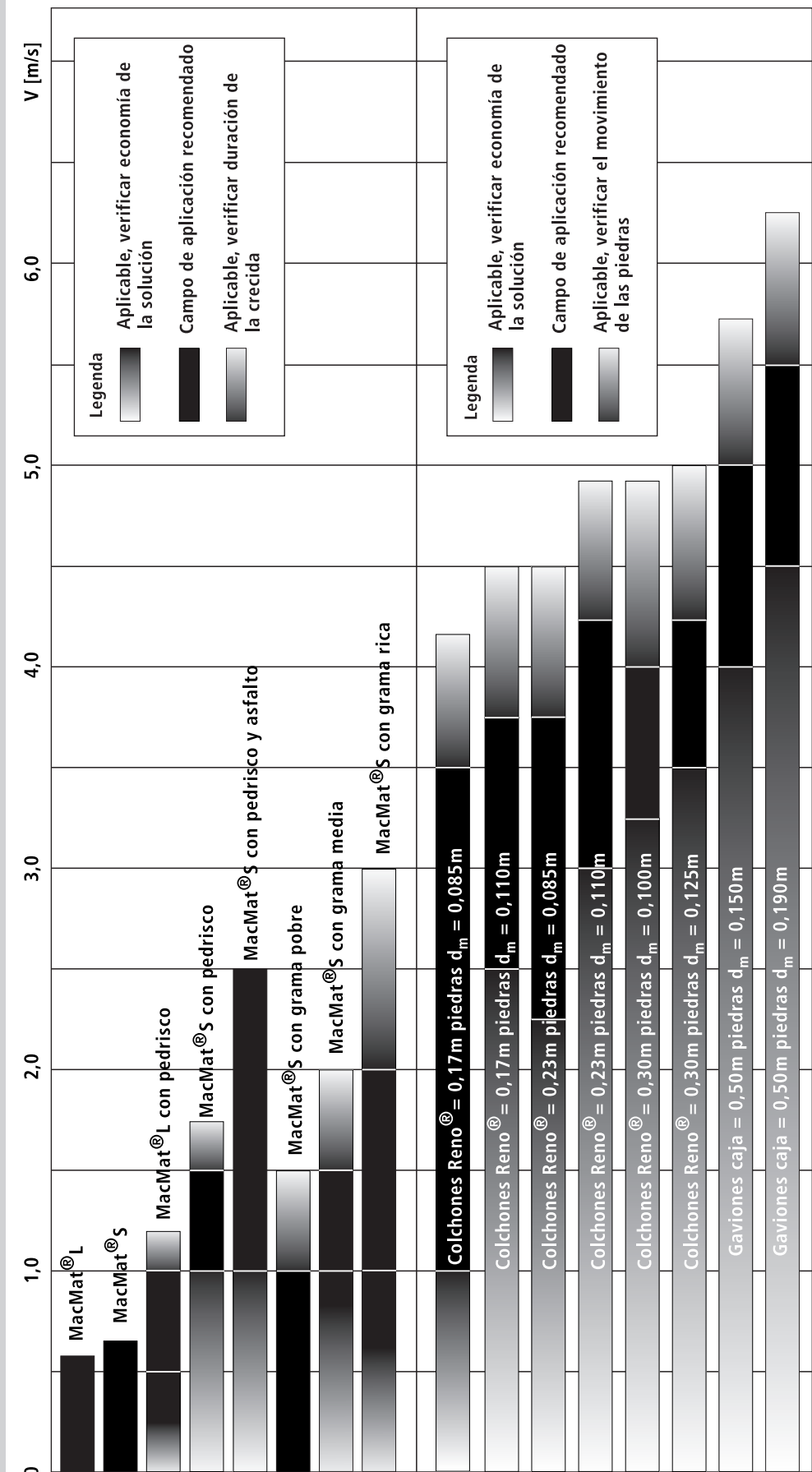


Figura 1 - Ábaco de aplicación recomendada de las soluciones.

1. INTRODUCCIÓN

La finalidad de este manual es proporcionar información para el proyectista de obras hidráulicas fluviales, en lo que se refiere a la verificación de la estabilidad de los cursos de agua naturales o artificiales y definir el diseño del revestimiento, cuando sea necesario.

Son analizadas las condiciones de flujo y equilibrio de un curso de agua natural o artificial, los criterios de dimensionamiento de la sección hidráulica y las condiciones para la verificación de su estabilidad a la acción del flujo.

Son indicados también los distintos tipos de revestimiento que permiten alcanzar la condición de estabilidad de la margen y del fondo.

En seguida son presentadas las técnicas de revestimiento utilizando los colchones Reno® y las geomantas. Es definida la metodología para su dimensionamiento con la secuencia de cálculo.

Complementariamente son presentados algunos ejemplos de cálculo para algunas obras ejecutadas, con los distintos tipos de revestimientos.

2.1 Conceptos Generales

Como condición de estabilidad de un curso de agua se entiende el equilibrio entre la acción del flujo sobre el cauce del río y la resistencia al movimiento (erosión) de los materiales (sedimentos) que lo constituyen.

Este equilibrio es alcanzado por la interacción entre el flujo de agua y los sedimentos provenientes de la cuenca hidrográfica contribuyente, considerando la evolución de las secciones, trazado y pendientes del curso de agua.

Este equilibrio puede ser alterado naturalmente en función de la ocurrencia de grandes crecidas, o en función de la evolución continua del trazado (lo cual provoca rectificaciones naturales en el mismo). De una forma más común, la alteración en el equilibrio puede ocurrir a través de:

- intervención directa, con obras en el propio curso de agua, como ser: rectificaciones, diques, etc.;
- intervención indirecta, por acciones en la cuenca hidrográfica que causen alteración en el uso del suelo, como: urbanización, cambios de cultura, deforestación, etc.

La necesidad de la utilización de la protección para la estabilización de los cursos de agua naturales puede ser necesaria para fijar el trazado del río, limitar las erosiones, proteger estructuras ribereñas (como: carreteras, ferrovías, instalaciones industriales, etc.), o para la estabilidad de canales artificiales, utilizados en obras de drenaje urbano, vías de navegación, obras para el control de crecidas, irrigación, abastecimiento, toma para hidroeléctricas, etc.

La protección de los cursos de agua y en especial de las márgenes puede ser hecha con los más variados materiales y técnicas de revestimiento, que son definidos en función de las características del suelo, de la acción de las corrientes y olas y de los objetivos a ser alcanzados.

La solución para los cursos de agua canalizados consiste en definir un tipo de protección que más se adapte a las condiciones locales, no solamente en cuanto a la resistencia a la acción del flujo, sino también en cuanto a la resistencia a las deformaciones del suelo de base, atendiendo a las condicionantes ambientales, rugosidad resultante, facilidad de ejecución, además del costo final de la obra.

Las obras de protección para los cursos de agua naturales o artificiales pueden ser de tres tipos:

- protección continua o directa, revestimiento con materiales más resistentes que los naturales;
- protección discontinua o indirecta, a través de espigones que alejan el flujo de la margen, generando entre si áreas de baja velocidad. A pesar de no haber sido eliminada la acción de las olas sobre las márgenes, el material erosionado e inestabilizado por las olas permanece en el lugar, debido a las velocidades menores;
- obras de sustentación, son verdaderas estructuras de contención, prácticamente verticales, que tienen la función de soportar los esfuerzos de los terrenos ribereños y resistir la acción del flujo y de las olas.

La protección continua corresponde al revestimiento de la margen y del fondo. Es la técnica más usual en los canales artificiales pudiendo tanto ser utilizada para controlar la acción del flujo, como también la acción de las olas.

Entre los revestimientos continuos existen varias alternativas para la protección de las márgenes y del fondo de los canales.

Podemos utilizar revestimientos como piedra lanzada, piedra colocada, bloques pré-moldeados o placas de concreto, bolsas de geotextiles llenadas con arena o mortero, colchones Reno[®], etc.

Es difícil definir cuales son las soluciones más adecuadas, siendo que en cada caso es necesario conocer las exigencias de permeabilidad o impermeabilidad, robustez, flexibilidad, rugosidad, durabilidad y economía y, entre ellas, adoptar aquella que proporcione mayor beneficio y seguridad.

Los revestimientos flexibles poseen un gran número de ventajas que los vuelven más viables, en la mayoría de los casos, en relación a los rígidos y semi-rígidos.

Entre los revestimientos flexibles, los gaviones, los colchones Reno[®] y las geomantas ocupan una posición destacada.



Figura 2.1.1 - Primera obra en gaviones metálicos realizada en Italia en 1892.

2.2 Revestimientos con Gaviones

2.2.1 Tipos de Gaviones

Colchón Reno®

A - Características

El colchón Reno® es una estructura metálica, en forma de paralelepípedo, de gran área y pequeño espesor. Es formado por dos elementos separados, la base y la tapa, ambos producidos con malla hexagonal de doble torsión (figura 2.2.1).

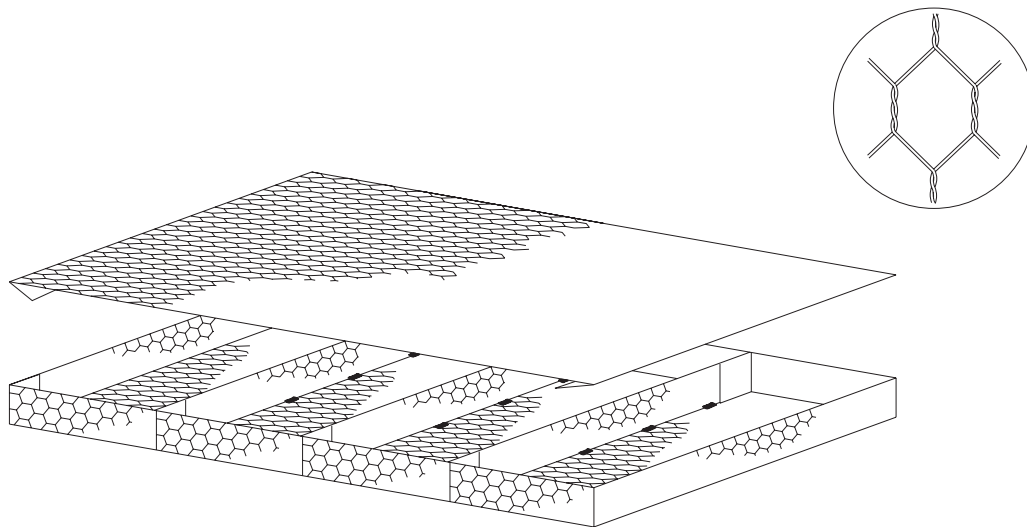


Figura 2.2.1 - Esquema de un colchón Reno®.

El paño que forma la base es doblado, durante la producción, para formar los diafragmas, uno cada metro, los cuales dividen el colchón en celdas de aproximadamente dos metros cuadrados. En obra es desdoblado y ensamblado para que asuma la forma de paralelepípedo. Su interior es llenado con piedras de diámetros adecuados en función de la dimensión de la malla hexagonal (figura 2.2.2).

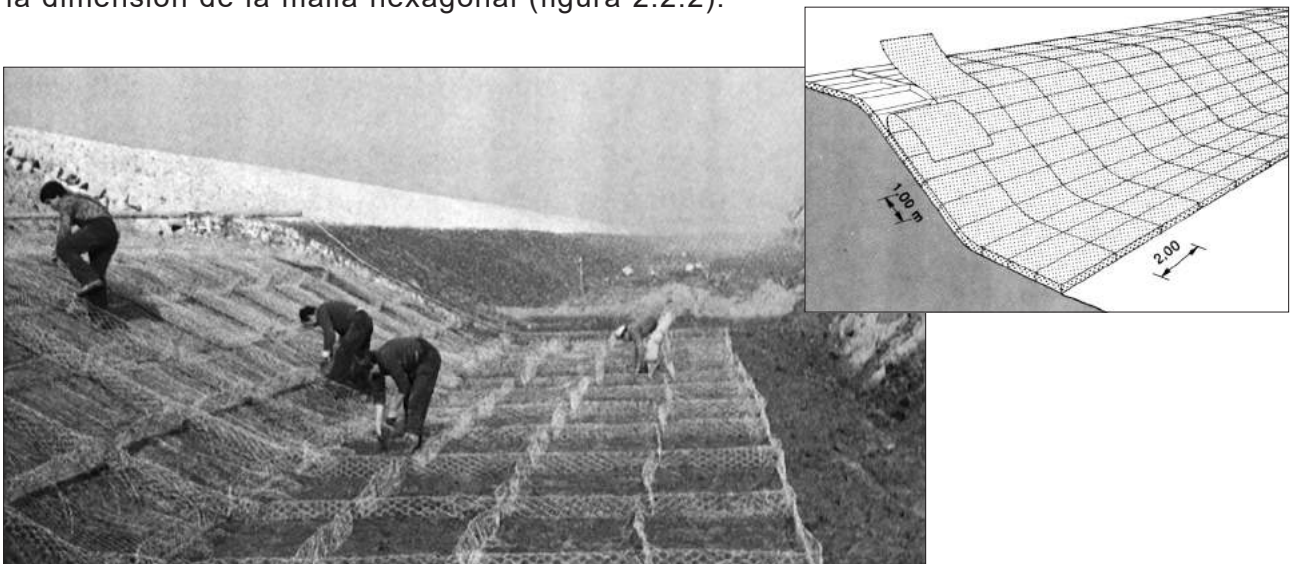


Figura 2.2.2 - Ensamblaje de colchones Reno®.

La red es producida con alambres de acero con bajo contenido de carbono, revestido con una aleación de zinc (95%), aluminio (5%) y tierras raras (revestimiento Galfan®), que confiere una protección contra la corrosión de por lo menos cinco veces la ofrecida por el zincado pesado tradicional.

Para conferir la adecuada resistencia y flexibilidad, las dimensiones de los huecos de la malla son de aproximadamente 6 x 8 cm, el diámetro de los alambres metálicos de la red es de 2,2 mm (alambre con revestimiento Galfan®) y 2,0 mm (alambre con revestimiento Galfan® y plastificado), siendo que el diámetro de los alambres de los bordes es de 2,7 mm y 2,4 mm respectivamente.

Cuando están en contacto con el agua, los alambres deben ser siempre revestidos con material plástico, lo cual confiere una protección efectiva contra la corrosión. Es importante recordar que, aún cuando en fase de diseño los análisis del agua indiquen que esta no es agresiva, es casi imposible hacer previsiones sobre como será después de algunos años.

Son estructuras flexibles adecuadas para el revestimiento de márgenes y del fondo de los cursos de agua (figuras 2.2.3, 2.2.4 y 2.2.5).



Figura 2.2.3 - Canalización en colchones Reno®.

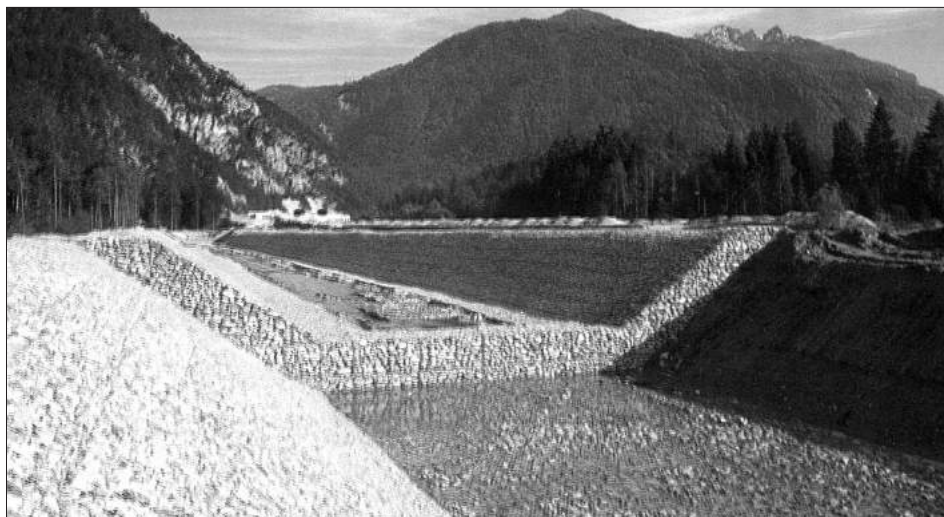


Figura 2.2.4 - Río Felia - Itália.



Figura 2.2.5 - Rio Maroglio - Italia.

Cuando es necesario, los colchones Reno® pueden ser montados y llenados en el obrador para su posterior colocación, con el auxilio de equipamientos mecánicos (figura 2.2.6).



Figura 2.2.6 - Colocación de colchones Reno® en presencia de agua.

B - Dimensiones

Las dimensiones de los colchones Reno® son estandarizadas. El largo, siempre múltiplo de 1 m, varía de 4 m a 6 m, mientras que el ancho es siempre de 2 m. El espesor puede variar entre 0,17 m, 0,23 m y 0,30 m. A pedido pueden ser fabricados colchones Reno® de medidas diferentes de aquellas estandarizadas.

Gavión Caja

A - Características

El gavión caja es una estructura metálica, en forma de paralelepípedo, cuyas tres dimensiones son de la misma magnitud. Un único elemento, producido con malla hexagonal de doble torsión, forma la base, la tapa y las paredes laterales. Al elemento de base son unidas, durante la fabricación, las dos paredes de extremidad y los diafragmas. Debidamente desdoblado en obra y ensamblado, asume la forma de un paralelepípedo (figura 2.2.7).

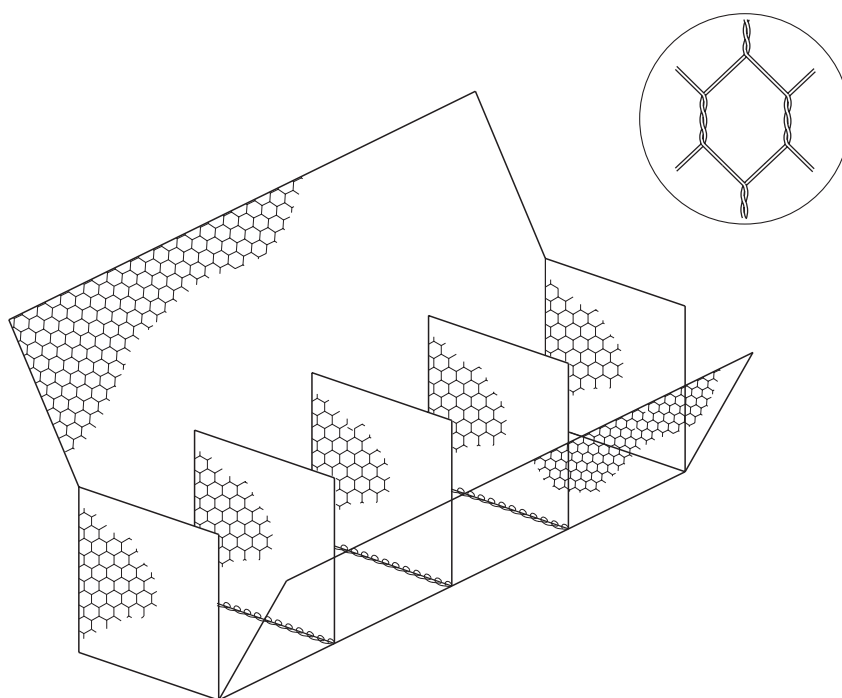


Figura 2.2.7 - Esquema del gavión caja.

Su interior es llenado con piedras bien distribuidas y con dimensiones variadas, con diámetro nunca inferior a la dimensión de la malla hexagonal.

La red es producida con alambres de acero de bajo contenido de carbono, revestido con una aleación de zinc (95%) y aluminio (5%) y tierras raras (revestimiento Galfan®), que confiere protección contra la corrosión de por lo menos cinco veces a la ofrecida por el zincado pesado tradicional.

Para conferir la adecuada resistencia y flexibilidad, las dimensiones de los huecos de la red son de aproximadamente 8 x 10 cm, mientras que el diámetro de los alambres metálicos es de 2,7 mm (alambre con revestimiento Galfan®) y 2,4 mm (alambre con revestimiento Galfan® y plastificado), y el diámetro de los alambres de los bordes es de 3,4 mm y 3,0 mm respectivamente. Cuando está en contacto con el agua, es aconsejable que sea utilizado el alambre con revestimiento plástico, lo cual ofrece una protección definitiva contra la corrosión.

Son estructuras flexibles adecuadas para la construcción de protecciones discontinuas con espigones y obras de sostenimiento del tipo muro de contención (figuras 2.2.8 y 2.2.9).

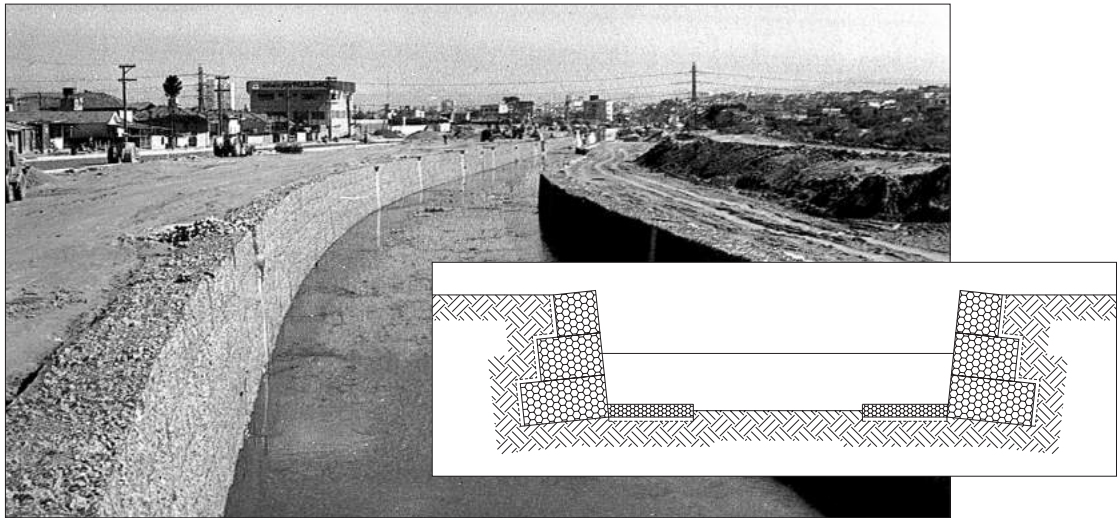


Figura 2.2.8 - Rio Aricanduva - SP - Brasil.



Figura 2.2.9 - Chile.

B - Dimensiones

Las dimensiones de los gaviones caja son estandarizadas.

El largo, siempre múltiplo de 1 m, varía de 1 m a 6 m, con la excepción del gavión de 1,5 m, mientras que el ancho es siempre de 1 m.

El altura puede ser de 0,50 o 1,00 m.

A pedido pueden ser fabricados gaviones caja de medidas diferentes de las estandarizadas.



Figura 2.2.10 - Gavión caja siendo trasladado con grúa.

Gavión Saco

A - Características

Los gaviones saco son estructuras metálicas, con forma de cilindros, constituidos por un único paño de malla hexagonal de doble torsión que, en sus bordes libres, presenta un alambre especial que pasa alternadamente por las mallas para permitir el montaje de la pieza en el obrador (figura 2.2.11).

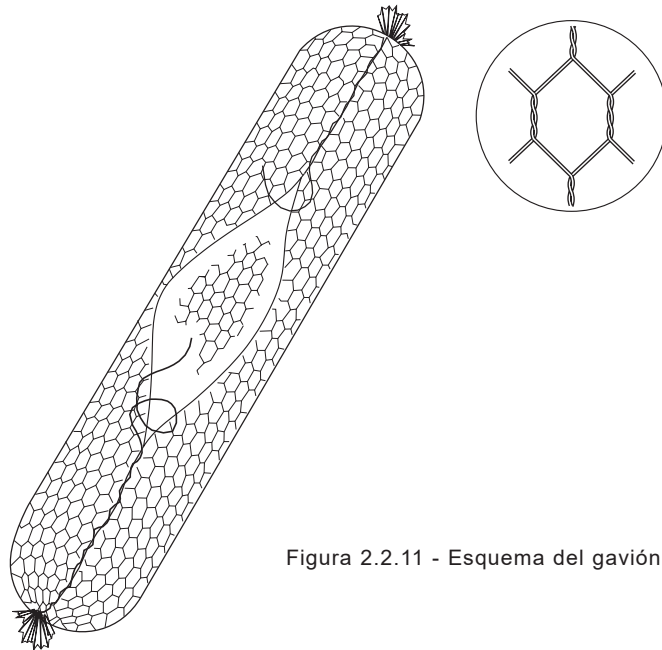


Figura 2.2.11 - Esquema del gavión saco.

Es un tipo de gavión extremadamente versátil debido a su formato cilíndrico y método constructivo, siendo que las operaciones de montaje y llenado son realizadas en el obrador para posterior colocación, con el auxilio de equipamientos mecánicos (figura 2.2.12).

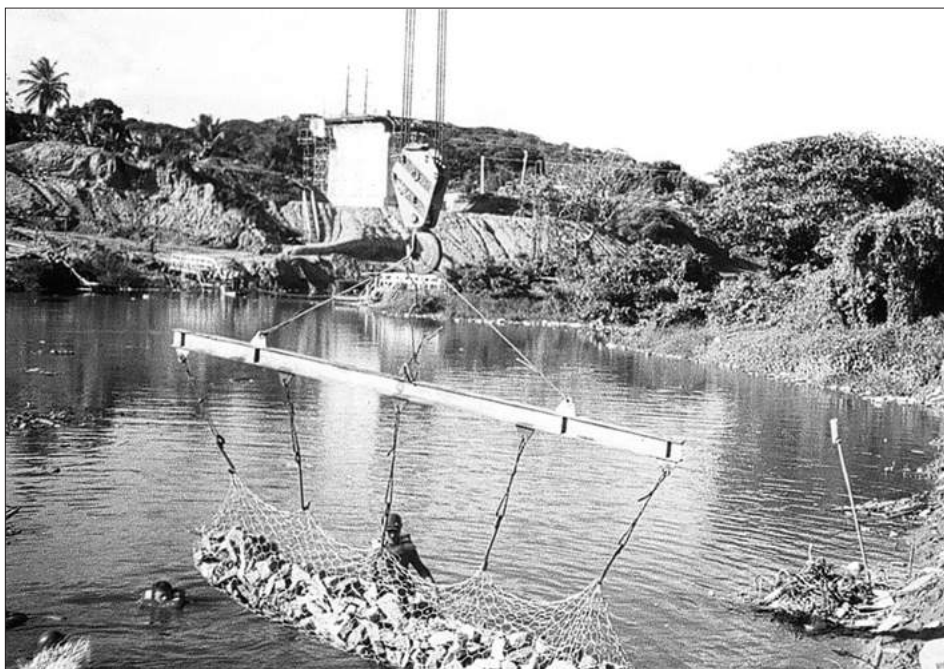


Figura 2.2.12 - Colocación del gavión saco.

Es empleado, generalmente, en lugares de difícil acceso, en presencia de agua o en suelos de baja capacidad soporte, debido a su extrema facilidad de colocación (figuras 2.2.13 y 2.2.14).



Figura 2.2.13 - Puerto Triunfo - Rio Paraná - Paraguay.

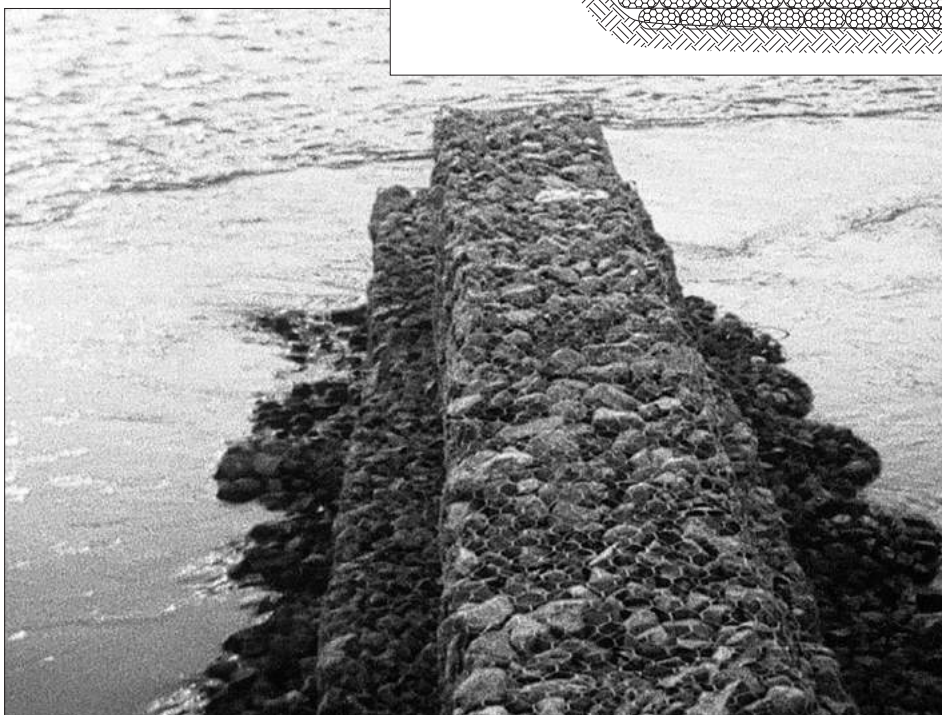
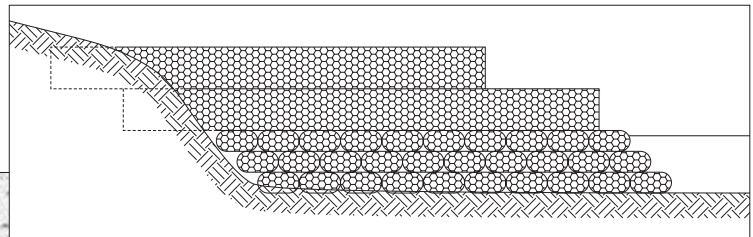


Figura 2.2.14 - Rio Ulua - Honduras.

Estas características hacen del gavión saco una herramienta fundamental en obras de emergencia. Después de haber sido montado y haber sido colocados los tirantes, es llenado con rapidez, en seco, cerca del lugar de utilización, por la extremidad (tipo saco) o por la lateral (tipo bolsa), cerrado y lanzado al agua con el auxilio de una grúa.

El llenado con piedras no tiene la misma importancia que en los gaviones caja y colchones Reno[®], debido a las características propias de las obras en que son empleados. La dimensión menor de las piedras nunca debe ser menor que la abertura de la malla. Los amarres entre los gaviones saco no son necesarios.



Figura 2.2.15 - Colocación de gavión saco para la construcción de un muro de contención - Brasil.

La red, en malla hexagonal de doble torsión, es producida con alambres de acero con bajo contenido de carbono, revestido con una aleación de zinc (95%), aluminio (5%) y tierras raras (revestimiento Galfan[®]), que confiere protección contra la corrosión.

La red es producida con alambre plastificado, por estar siempre los gaviones saco en contacto con el agua y estar colocados en posiciones de difícil mantenimiento.

Para conferir la adecuada resistencia y flexibilidad, las dimensiones de los huecos de la red son de aproximadamente 8 x 10 cm, y el diámetro de los alambres metálicos es de 2,4 mm, 3,0 mm para los bordes y 3,4 mm para los alambres de cierre.

B - Dimensiones

Las dimensiones de los gaviones saco son estandarizadas, siendo que el largo varía entre 2,0 m, 3,0 m, 4,0 m y 5,0 m, y el diámetro es de 0,65 m.

A pedido pueden ser fabricados gaviones saco de medidas diferentes de las estandarizadas.

2.2.2 Recubrimiento de los Gaviones

El recubrimiento es una técnica empleada principalmente en el caso de los colchones Reno®, pero también puede ser usada en los gaviones caja.

Recubrimiento con mortero de cemento y arena

Cuando la sección del canal es limitada, o donde la topografía permite solamente pequeñas pendientes, para aumentar el caudal es utilizada con gran éxito la aplicación de mortero sobre los revestimientos en colchones Reno® (figuras 2.2.16 y 2.2.17) y sobre los gaviones caja (figura 2.2.18).

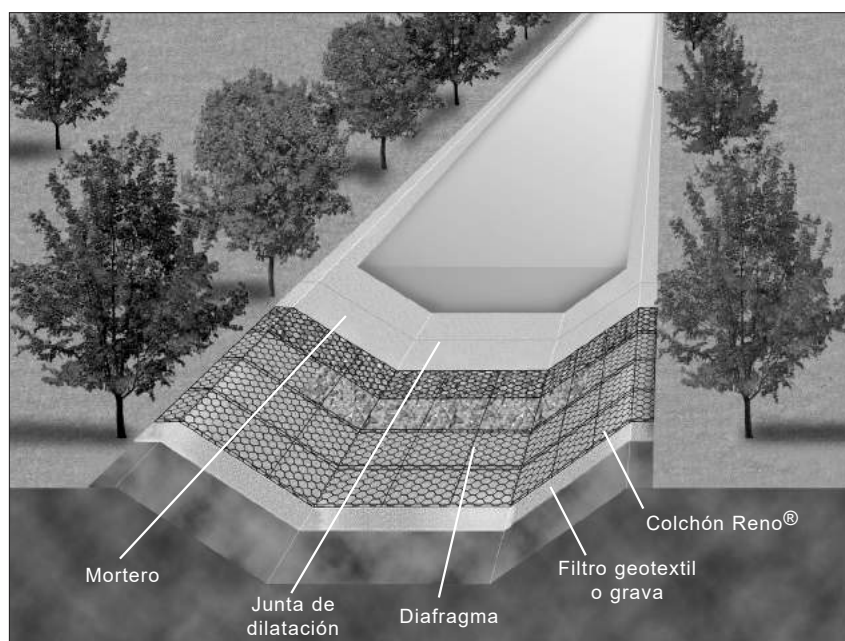


Figura 2.2.16 - Colchones Reno® con recubrimiento de mortero.

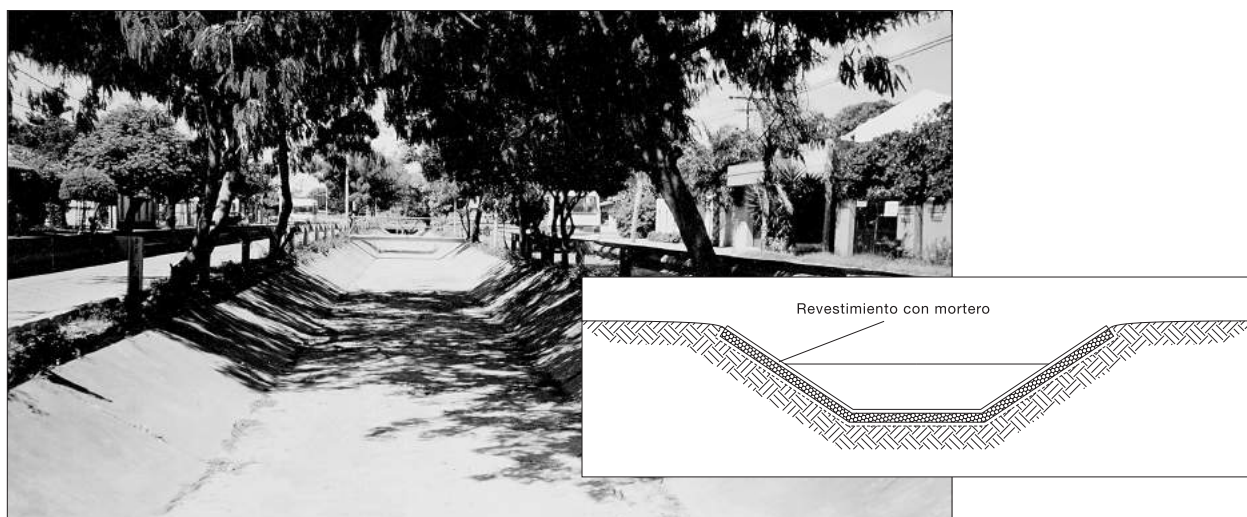


Figura 2.2.17 - Avenida Beni - Santa Cruz - Bolivia.

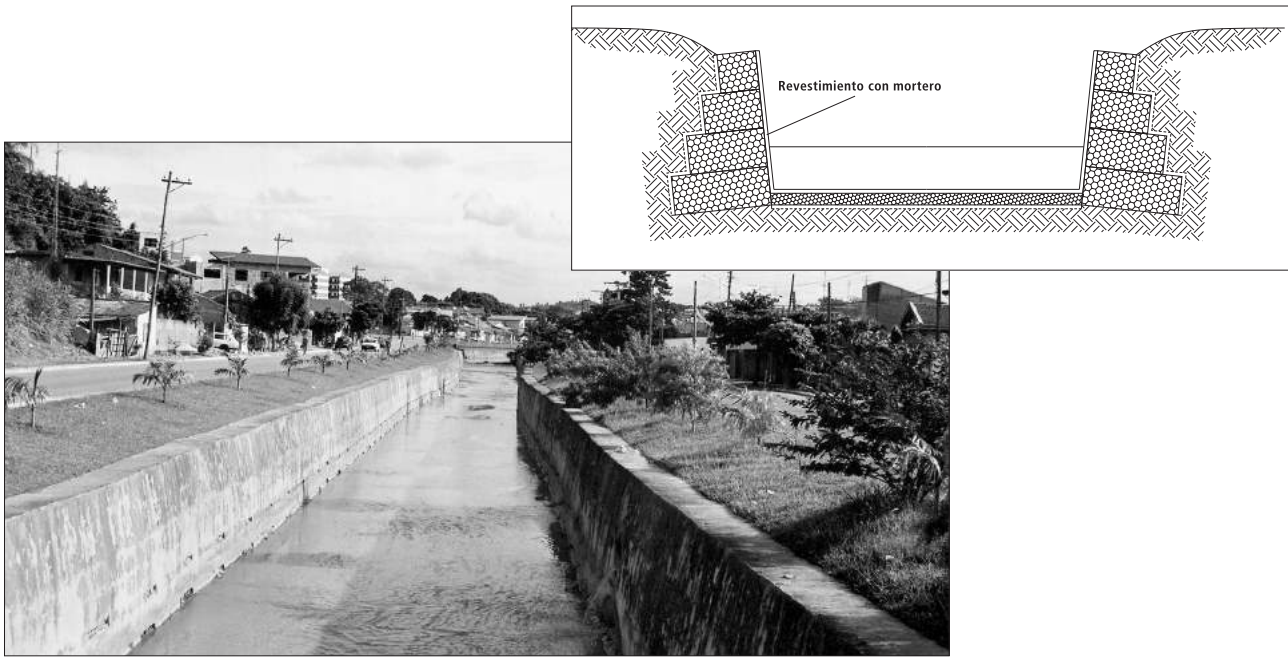


Figura 2.2.18 - Gaviones con recubrimiento de mortero - Córrego Pinheirinho - Vinhedo - SP- Brasil.

Con esto se obtiene la reducción del coeficiente de rugosidad, lo cual permite mayores velocidades del flujo y la reducción de la sedimentación.

Esta solución vuelve la superficie menos permeable y minimiza el crecimiento de la vegetación. Posibilita también la limpieza con procesos mucho más simples y, en algunos casos, la propia autolimpieza, aumentando la vida útil de la obra.

El revestimiento en colchones Reno® con recubrimiento de mortero de cemento y arena es una estructura semiflexible, o sea, que puede absorber pequeños movimientos generados por los asentamientos del suelo de la base, sin perder su función estructural.

La tapa del colchón Reno® es incorporada al mortero y sirve de armadura. La red, debido a su formato hexagonal, ofrece excelentes garantías estáticas, una vez que los alambres están dispuestos en las direcciones de las tensiones.

Los problemas relativos al drenaje (alivio de las subpresiones) son solucionados al usar listones de madera durante la aplicación del mortero, formando así, al mismo tiempo, juntas de dilatación.

La gran ventaja técnica de esta solución es la creación de un conjunto monolítico y drenante por debajo del revestimiento de mortero, lo cual garantiza la resistencia de la estructura.

A fin de evitar el desperdicio de mortero, son echadas sobre los colchones Reno® acabados, piedras de menor granulometría (aprox. 1 pulgada), minimizando así los vacíos superficiales y limitando la penetración del mortero a un espesor de 2 cm, lo suficiente para garantizar la adherencia.

El mortero debe tener una relación arena/cemento de 4:1 y puede ser preparado en mezcladora convencional en obra. El revestimiento de mortero puede ser distribuido manualmente o con el auxilio de equipo mecánico, dispersado y regularizado con el auxilio de una llana, alcanzando el espesor final de aproximadamente 5 cm, 2 cm de los cuales, como ya indicado, quedan mezclados con las piedras de relleno de los colchones Reno®.

Antes del fraguado del mortero los listones pueden ser retirados y reaprovechados para la ejecución de otras juntas.

Recubrimiento con mezcla bituminosa

Cuando es necesario un revestimiento más pesado, poco permeable y al mismo tiempo flexible, el recubrimiento del colchón Reno® con mezcla bituminosa forma una estructura que reúne las características y la funcionalidad de ambos materiales (figuras 2.2.19, 2.2.20, 2.2.21, 2.2.22 y 2.2.23).

Figura 2.2.19 - Colchón Reno® con recubrimiento de mezcla bituminosa.

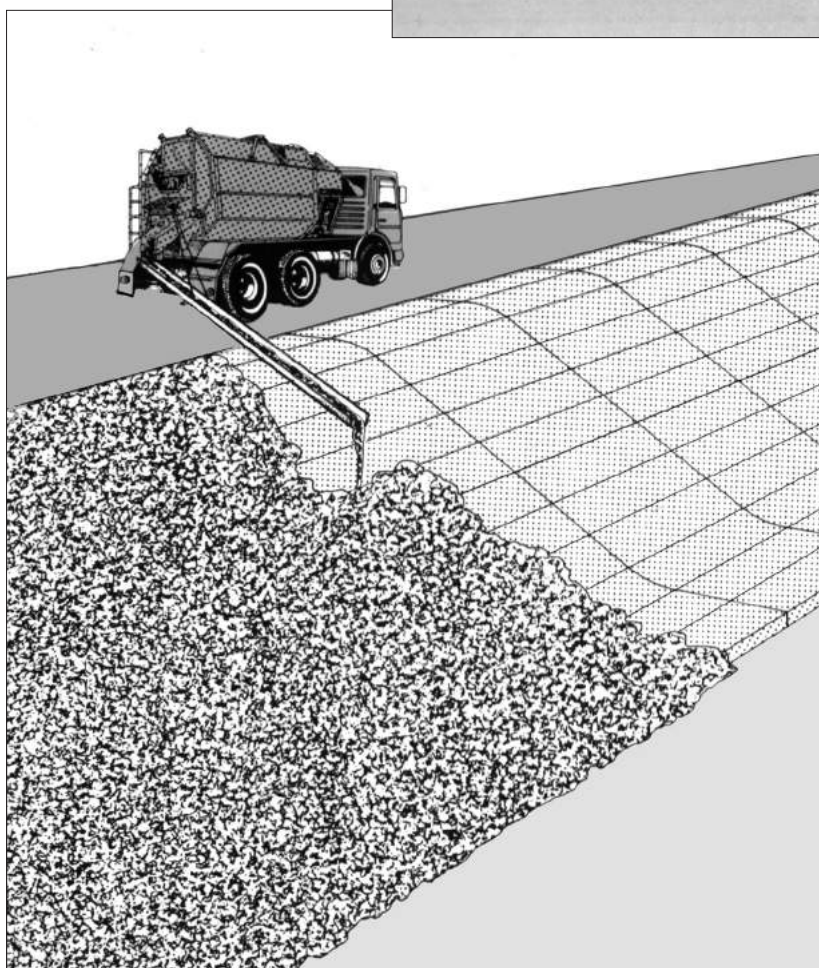
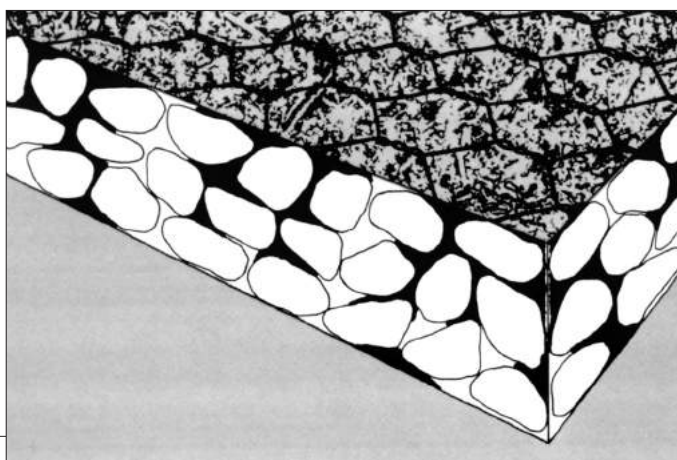


Figura 2.2.20 - Recubrimiento de colchones Reno® con mezcla bituminosa.



Figura 2.2.21 - Operación de recubrimiento de colchones Reno®.



Figura 2.2.22 - Operación de recubrimiento de colchones Reno® con mezcla bituminosa.



Figura 2.2.23
Río Sinni - Basilicata - Italia.

En la unión con la mezcla bituminosa, el colchón Reno® conserva sus cualidades de flexibilidad, en él mientras que aumenta la compactación del relleno y por lo tanto la protección ofrecida por esta solución.

El tratamiento con mezcla bituminosa evita el eventual movimiento de las piedras de relleno y, al mismo tiempo, protege la red metálica de la acción corrosiva de las aguas marinas o contaminadas y de la abrasión provocada por el transporte sólido.

La cantidad de mezcla bituminosa necesaria es la suficiente para rellenar, parcialmente, los vacíos entre las piedras de relleno del colchón Reno®. De esta manera se consolida el material de relleno reduciendo su permeabilidad, sin eliminarla. El aumento de la cantidad de mezcla bituminosa hasta el completo llenado de los vacíos existentes y a la expulsión y el recubrimiento de la tapa, genera la impermeabilidad de la estructura y la disminución de la rugosidad (figuras 2.2.24 y 2.2.25).

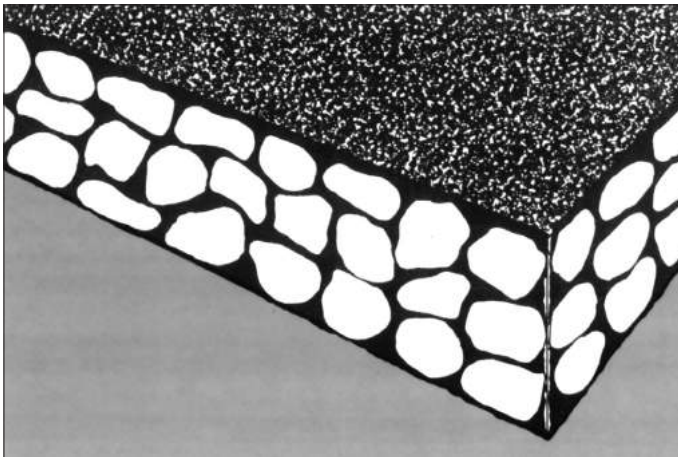


Figura 2.2.24 - Colchón Reno® saturado con mezcla bituminosa.

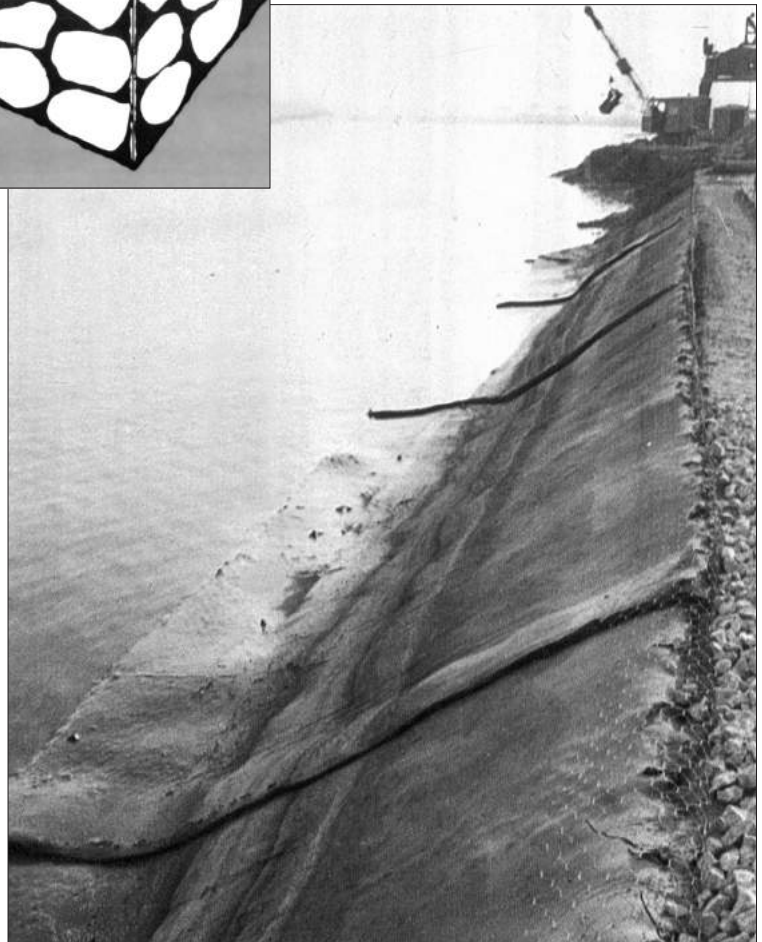


Figura 2.2.25 - Colchones Reno® saturados con mezcla bituminosa.

2.2.3 Impermeabilización

Además de las soluciones ya presentadas (mortero de cemento y arena, concreto o mezcla bituminosa), que vuelven el revestimiento menos permeable, la impermeabilización de los canales revestidos con colchones Reno® puede también ser realizada con el uso de geomembranas (figura 2.2.26).

En este caso la membrana impermeable, normalmente de HDPE, es colocada por debajo del revestimiento. El revestimiento pasa a tener dos funciones, una de protección de la margen y del fondo contra la acción del flujo y de las olas, y otra de protección de la propia geomembrana contra acciones destructivas.

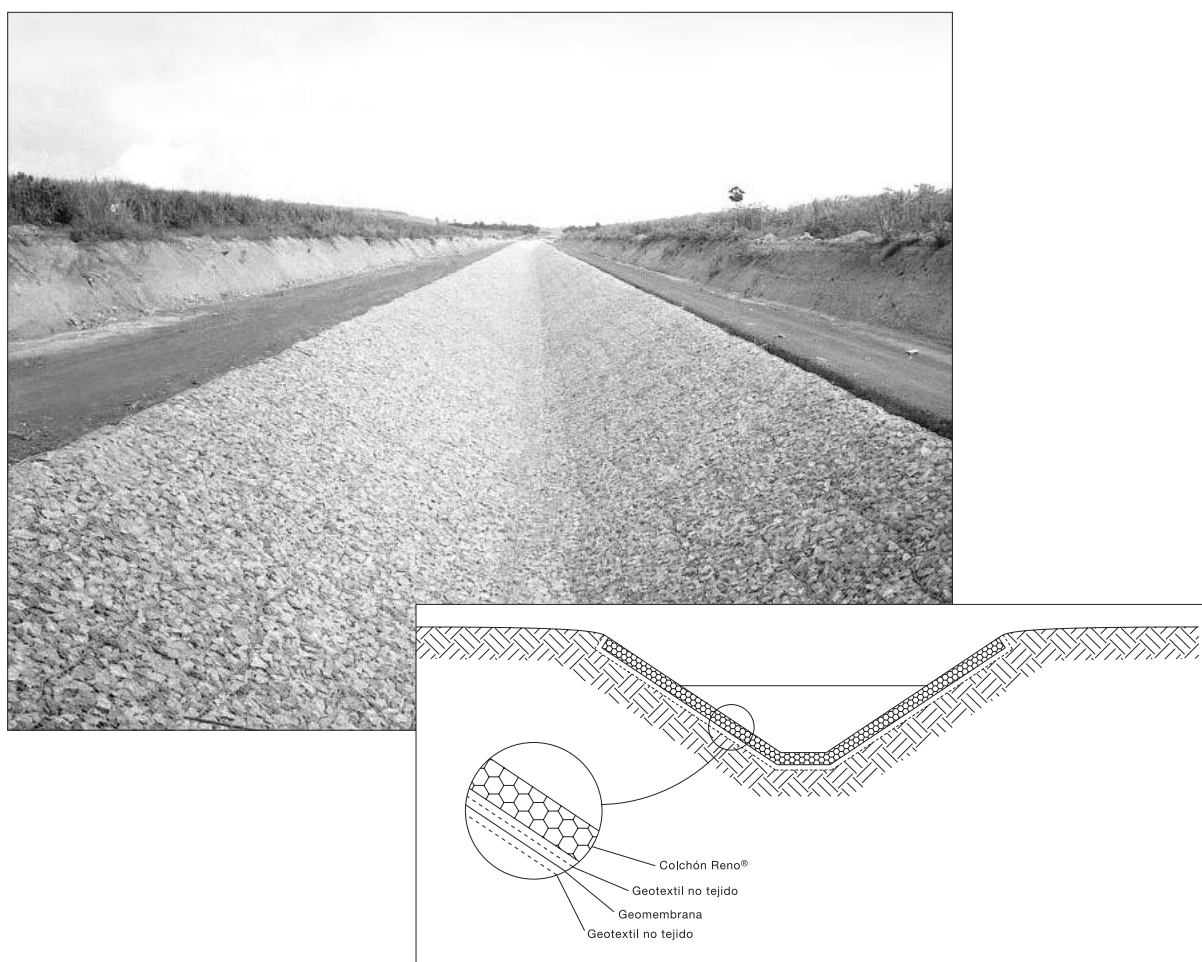


Figura 2.2.26 - Revestimiento con colchones Reno® e impermeabilización con geomembrana Canal Pedrado Cavalo - BA - Brasil.

Para evitar perforaciones durante la instalación, puede ser necesario colocar un geotextil no tejido entre el suelo y la geomembrana y entre esta y el colchón Reno®.

De esta manera, se mantendrá la estanqueidad del canal.

2.3 Revestimientos con Geomantas

Existen varios tipos de geomantas utilizadas para el revestimiento de los terrenos ribereños o externos al flujo del agua, en este caso para controlar la erosión superficial provocada por la lluvia y la corriente del agua.

Para cumplir estas funciones fue desarrollado un tipo de geomanta con el nombre de MacMat[®], que es constituida por filamentos gruesos de material sintético, dispuestos aleatoriamente y soldados en los puntos de contacto, con espesor del orden de 1 cm a 2 cm y que presenta un índice de vacíos superior al 90%.

Pueden ser utilizadas como protección directa, siempre con sus vacíos llenados, de las más variadas formas, con la finalidad de aumentar su eficiencia.

2.3.1 Tipos de Geomantas

Geomanta MacMat[®]

A - Características

El MacMat[®], como ya fue mencionado, es una geomanta tridimensional constituida por filamentos gruesos dispuestos aleatoriamente y soldados en los puntos de contacto y que presenta un índice de vacíos superior al 90% (figuras 2.3.1 y 2.3.2).

Figura 2.3.1 - Geomanta del tipo MacMat[®].

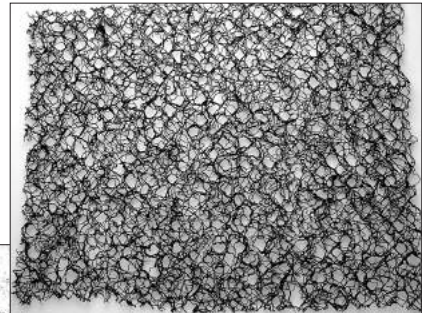


Figura 2.3.2 - Colocación de la geomanta.

Cubierto de tierra o piedras, protege el suelo contra la erosión y facilita el crecimiento, posterior y permanente, de la vegetación. Refuerza la camada vegetal, auxiliando en la fijación de las raíces (figuras 2.3.3 y 2.3.4).

Figura 2.3.3 - Geomanta MacMat® aplicada en canal con revestimiento vegetal.

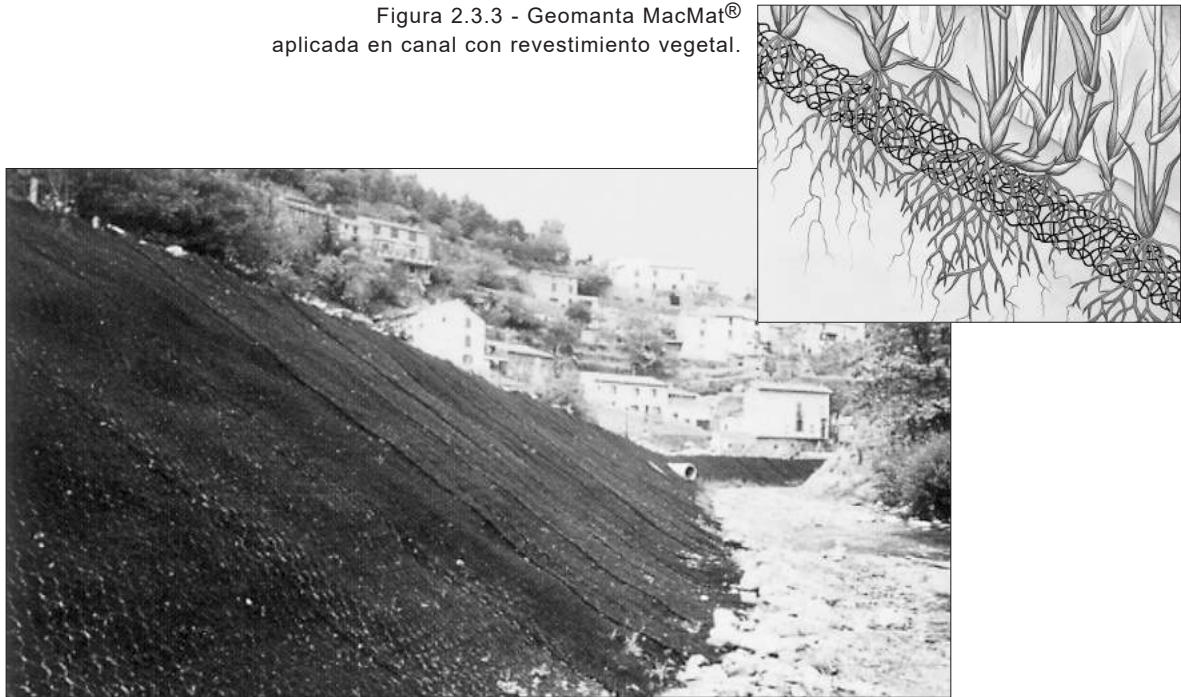


Figura 2.3.4 - Lastour - França.

Confina las partículas del suelo, garantiza una buena interacción entre el suelo y la geomanta y estabiliza la superficie revestida, creando un ambiente propicio para el crecimiento de las raíces. La densa camada compuesta por tierra, raíces y filamentos, confiere mayor resistencia y capacidad para retener las partículas finas, minimizando el riesgo de erosiones.

Es utilizada en canales de baja velocidad o en lugares con presencia esporádica de agua. Su peso específico, superior a $10,0 \text{ kN/m}^3$, facilita su instalación abajo del nivel del agua siendo que no flota, diferentemente de las geomantas de polipropileno y polietileno.

Las geomantas, cuando son colocadas abajo del nivel del agua, deben ser llenadas con pedrisco. Si son colocadas en seco, después de la siembra de semillas de las especies previstas (preferiblemente autóctonas), deben ser cubiertas con suelo fértil.

Deben siempre ser fijadas al suelo con estacas de hierro para evitar movimientos, especialmente en el primer caso.

B - Dimensiones

El MacMat® es provisto en rollos con ancho de 1,00 m a 4,00 m y diferentes largos. El ancho de 4,00 m permite reducir el número de traslapes, acelerando la instalación y bajando los costos. Aún así, en general, son utilizados rollos con anchos menores (1,00 m) debido a su mayor disponibilidad y por facilitar el manipuleo en la obra, adaptándose mejor en superficies irregulares del talud.

El tipo generalmente utilizado en canales es el MacMat® S, debido a su mayor espesor, mayor densidad, lo cual confina mejor el material de relleno.

Geomanta MacMat®R

A - Características

El MacMat®R es utilizado cuando es requerido un revestimiento con mayor resistencia, en lugares donde haya mayores velocidades del flujo de agua o mayor duración de los períodos de crecida.

Es formado por la unión de un MacMat®S y una red en malla hexagonal de doble torsión (figura 2.3.5), sumando así a las características de las geomantas, las características de resistencia mecánica de las redes metálicas ya mencionadas.

Figura 2.3.5 - Geomanta del tipo MacMat®R.

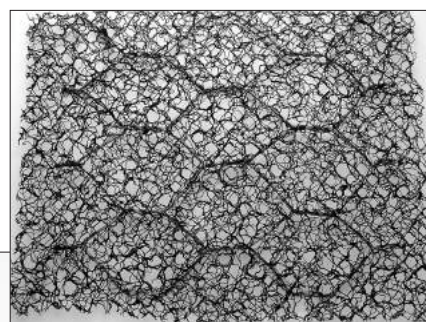


Figura 2.3.6 - Colômbia.

Esta combinación, fijada al suelo con estacas, puede soportar sin daños flujos más intensos que pueden arrastrar, por ejemplo, materiales en suspensión o flotantes, permitiendo una mayor integridad de la misma contra impactos.

B - Dimensiones

El MacMat®R es provisto en rollos con anchos de 1,00 m hasta 4,00 m y diferentes largos. La red es la misma utilizada en la fabricación de los gaviones. En general, son usados rollos con ancho de 2,00 m para reducir los traslapes y facilitar el manipuleo.

2.3.2 Recubrimiento de las Geomantas

Recubrimiento con concreto proyectado

Así como para los revestimientos en colchones Reno[®], en pequeños canales de drenaje o en las cunetas a lo largo de las carreteras y cuando no son esperados asentamientos del terreno, el MacMat[®] puede ser cubierto, una vez colocado sobre el canal, con concreto proyectado. En este caso, la geomanta sirve inicialmente como referencia del espesor del revestimiento (20 mm) y, posteriormente, como refuerzo, para evitar microfisuras provocadas por dilataciones térmicas.

Recubrimiento con emulsión asfáltica

Así como con los colchones Reno[®], es posible recubrir el MacMat[®]S con una emulsión asfáltica (figura 2.3.7).



Figura 2.3.7 - MacMat[®]S recubierto con emulsión asfáltica.

En este caso, el MacMat[®]S es cubierto con pedrisco en el obrador y, posteriormente, recubierto con emulsión asfáltica en frío, formando así un colchón igualmente flexible, y al mismo tiempo más pesado y resistente.

El elemento, así preparado, es posteriormente colocado sobre la margen, ya perfilada, con el auxilio de una grúa (figura 2.3.8).



Figura 2.3.8 - Colocación del MacMat[®]S sellado con asfalto con el auxilio de una grúa.

En este capítulo están relacionados algunos de los principales conceptos para el dimensionamiento hidráulico de canales a cielo abierto, considerando el flujo permanente y uniforme con pequeña pendiente longitudinal del cauce del canal.

Para el cálculo de la resistencia al flujo fue elegida la ecuación de Chezy, utilizando la fórmula consagrada de Manning para el cálculo del coeficiente C de Chezy.

3.1 Tipos de Flujo en Superficie Libre

Los flujos con superficie libre, o corrientes en canales, son caracterizados por la presencia de la presión atmosférica actuando sobre la superficie del líquido, siendo que el flujo se realiza por la acción de la aceleración de gravedad.

Las corrientes en canales pueden ser divididas en dos grupos: corrientes en régimen permanente y corrientes en régimen no permanente o variable.

El flujo se define como permanente si, en cualquier punto de la masa fluida en movimiento, el caudal permanece constante a lo largo del tiempo. En caso contrario, o sea, si el caudal varía a lo largo del tiempo en cualquier punto del canal, el mismo es llamado no permanente o variable.

Los flujos permanentes en canales, adicionalmente, pueden también ser clasificados como uniformes y gradualmente variados.

El flujo, o régimen, es uniforme cuando las velocidades locales son constantes a lo largo de una determinada trayectoria de la corriente fluida. En este caso, las trayectorias de la corriente son rectas y paralelas entre sí, siendo que las pendientes de la superficie del agua, del fondo del canal y de línea de energía son paralelas.

En el caso que no se verifiquen estas condiciones, la corriente es definida como variada y, en este caso, la pendiente del fondo es diferente de la pendiente de la superficie del agua y los parámetros hidráulicos varían de sección a sección.

El régimen permanente y uniforme es en realidad una idealización muy difícil de ocurrir en la práctica, pero que puede servir como un buen modelo de cálculo en proyectos de canales siempre que sean verificadas algunas hipótesis:

- que la sección transversal del canal sea aproximadamente prismática en el trecho considerado;
- que no ocurran interferencias en el flujo en las proximidades del trecho considerado, aguas arriba y aguas abajo.

Los conceptos para el dimensionamiento hidráulico de los canales que serán expuestos a continuación, consideran establecido un régimen de flujo permanente y uniforme.

3.2 Ecuación de Chezy

El dimensionamiento hidráulico de los canales es basado en ecuaciones de resistencia al flujo, que relacionan la pérdida de carga en un trecho con la velocidad media o el caudal. Esta relación es hecha a partir de parámetros geométricos y de la rugosidad representativa del trecho del canal. La figura 3.2.1 presenta los principales parámetros que caracterizan el movimiento en un canal.

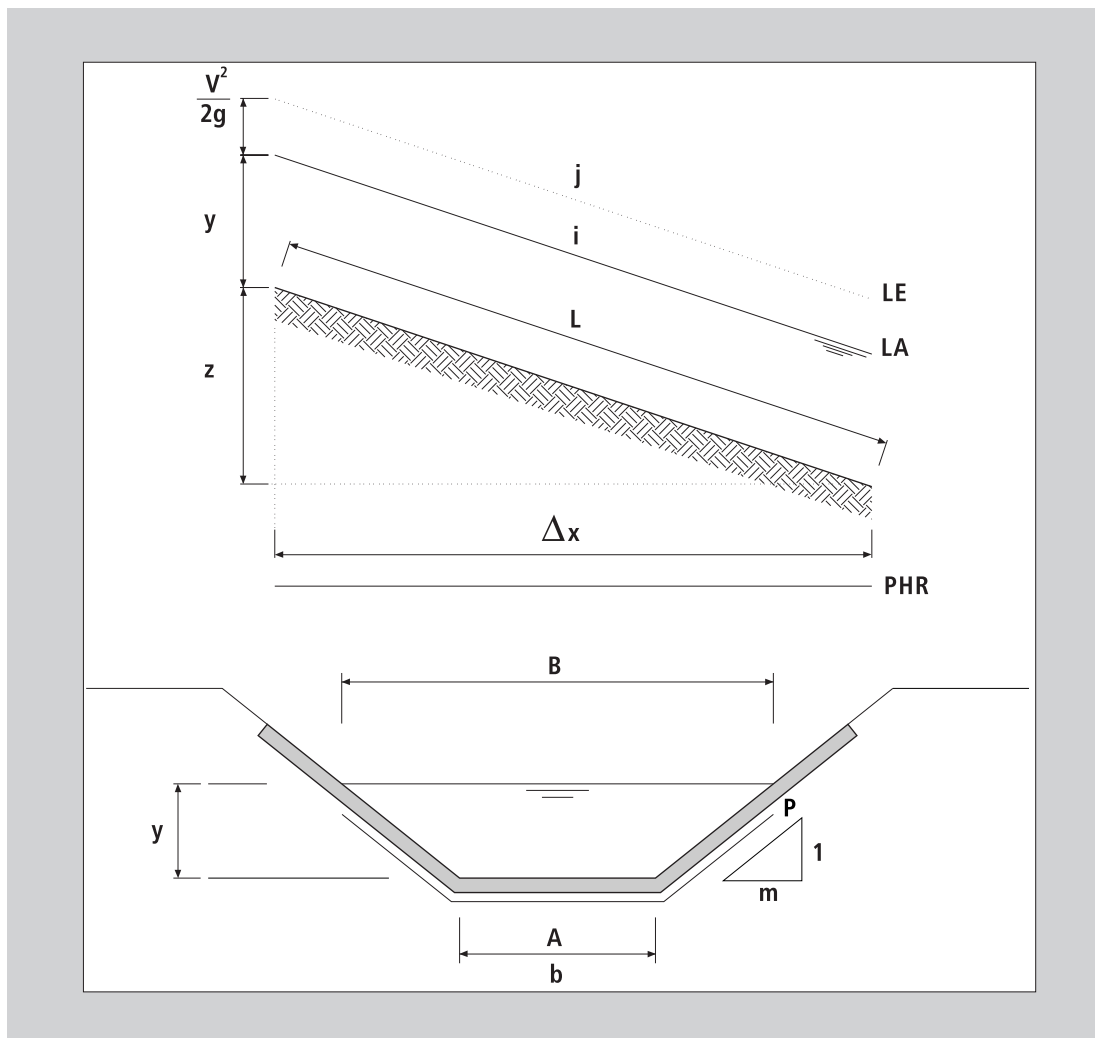


Figura 3.2.1 - Parámetros geométricos e hidráulicos que caracterizan el flujo en un curso de agua en régimen permanente y uniforme.

PHR - plano horizontal de referencia;

LA - línea del agua;

LE - línea de energía;

y - profundidad máxima del agua [m];

z - cota del fondo del canal en relación al PHR [m];

L - largo del tramo del canal estudiado [m];

Δx - proyección del largo del canal (L) en el PHR [m];

i - pendiente longitudinal del cauce del canal [m/m];

j - pendiente de la línea de energía [m/m];

1/m - pendiente de la orilla;

i_a - pendiente de la línea de agua [m/m];

$v^2/(2g)$ - parte de la energía total referente al término cinético [m];

V - velocidad media de la corriente [m/s];

A - área de la sección transversal del canal [m²];

P - perímetro mojado en la sección transversal

B - ancho de la superficie libre del agua en la sección transversal [m];

b - ancho del fondo del canal en la sección transversal [m];

Q - caudal que está transitando por el canal

R_H - radio hidráulico de la sección transversal del canal [m].

Por definición es sabido que

$$Q = V.A \quad (1)$$

$$R_H = \frac{A}{P} \quad (2)$$

Aplicando la fórmula universal de la pérdida de carga (03) al trecho del canal representado en la figura 3.2.1, obtenemos:

$$\Delta H = f \cdot \frac{L}{D_H} \cdot \frac{v^2}{2.g} \quad (3)$$

donde:

ΔH : pérdida de carga en el trecho de largo (L) del canal [m];

f: factor de fricción;

D_H : diámetro hidráulico de la sección transversal del canal [m];

g: aceleración de la gravedad [m/s^2].

siendo:

$$D_H = 4 \cdot R_H \quad (4)$$

Substituyendo (04) en (03) y manipulando la ecuación resultante, se obtiene:

$$\frac{\Delta H}{L} = \frac{f}{4 \cdot R_H} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (5)$$

El termino $\Delta H/L$ es la pérdida de carga por unidad de largo del canal, que por lo tanto corresponde a la pendiente de la línea de energía en el trecho (j). Así,

$$j = \frac{f}{4 \cdot R_H} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (6)$$

o también:

$$v = \sqrt{\frac{8 \cdot g}{f}} \cdot \sqrt{R_H \cdot j} \quad (7)$$

La ecuación (07) también puede ser escrita de la siguiente forma:

$$V = C \cdot \sqrt{R_H \cdot j} \quad (8)$$

donde:

$$C = \sqrt{\frac{8 \cdot g}{f}} \quad (9)$$

La expresión (08) es conocida como ecuación de Chezy, donde C es un factor de resistencia del flujo y es definido como coeficiente de Chezy. El coeficiente C es función del factor de fricción que, a su vez, en canales donde se admite el régimen de flujo turbulento rugoso, es función de la rugosidad y del radio hidráulico de la sección transversal, o sea:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \cdot \log \left(\frac{14,84 \cdot R_H}{\varepsilon} \right) \quad (10)$$

donde:

ε : rugosidad equivalente hidráulica adoptada para el trecho del canal examinado [m].

Según lo arriba afirmado, la ecuación (10) vale solamente para el régimen de corriente turbulenta rugosa, o sea, para el régimen de flujo donde se verifica la siguiente relación:

$$R_e^* = \frac{u_* \cdot \varepsilon}{\nu} \geq 70 \quad (11)$$

donde:

R_e^* : número de Reynolds de fricción;

u_* : velocidad de fricción [m/s];

ν : viscosidad cinemática [m²/s].

siendo:

$$u_* = \sqrt{g \cdot R_H \cdot j} \quad (12)$$

A través de las ecuaciones (08), (09) y (10) es posible realizar el dimensionamiento hidráulico de los canales, donde se puede considerar el flujo en régimen permanente y uniforme.

De cualquier forma, en la práctica usual de diseño, no es común atribuir a un trecho de canal una rugosidad equivalente hidráulica (ε) y utilizar el conjunto de ecuaciones arriba mencionadas.

De hecho, varias ecuaciones de origen empírico fueron desarrolladas para estimar el coeficiente C de la ecuación de Chezy. Una de estas ecuaciones fue propuesta en 1889 por Robert Manning que, a través de los resultados provenientes de análisis experimentales, definió la siguiente relación:

$$C = \frac{R_H^{1/6}}{n} \quad (13)$$

Substituyendo la ecuación (13) en la ecuación (08) obtenemos:

$$V_j = \frac{1}{n} \cdot R_H^{2/3} \cdot \sqrt{J} \quad (14)$$

Siendo que el régimen del flujo es permanente y uniforme sabemos que $i \equiv J$ (la pendiente de la LE es igual a la pendiente del fondo del canal). Así:

$$V_i = \frac{1}{n} \cdot R_H^{2/3} \cdot \sqrt{i} \quad (15)$$

La ecuación (15) es conocida como la fórmula de Manning.

El coeficiente n [$s.m^{1/3}$] es llamado coeficiente de Manning y tiene la propiedad de permanecer constante para una determinada rugosidad, asumiendo el flujo como permanente, uniforme y turbulento rugoso.

Además de tener origen empírico, el coeficiente n tiene una desventaja adicional en relación al factor de fricción (f) de la fórmula universal de la pérdida de carga, que es la de no ser adimensional. De esta forma, su valor varía dependiendo de las unidades de medidas utilizados para las otras variables envueltas en el dimensionamiento hidráulico del canal.

El coeficiente n , además, tiene otra desventaja, que es la de no poseer significado físico determinado, diferente de la rugosidad equivalente (ϵ).

De cualquier manera, es fácil relacionar el n de Manning con la rugosidad equivalente (ϵ). Basta para esto igualar las ecuaciones (13) y (09), substituyendo la ecuación (10) en el lugar del factor de fricción.

Aún así, la fórmula de Manning (14) es ampliamente utilizada en el diseño de canales, debido a su simplicidad de aplicación y debido a los buenos resultados que ha dado en aplicaciones prácticas. Los valores del n de Manning para las diferentes superficies de recubrimiento del canal están tabulados.

Para cursos de agua naturales el significado de n es más amplio, si es comparado al de la rugosidad equivalente, ya que en éste están introducidas las variaciones de sección, pendiente de fondo, sinuosidad del trecho, entre otras.

3.3 Estudios del Coeficiente de Manning para Colchones Reno®, Gaviones y Geomantas

La elección del coeficiente de Manning a ser introducido en la ecuación (15) puede ser hecha basándose en la tabla 3.3.1, que relaciona los valores de n con la naturaleza de la superficie de recubrimiento del canal.

El coeficiente n puede también ser calculado a partir de la fórmula de Meyer-Peter y Müller:

$$n = \frac{d_{90}^{1/6}}{26} \quad (16)$$

donde:

d_{90} : diámetro del tamiz que permite el pasaje de 90% del material de la superficie del cauce [m].

La ecuación (16) es una fórmula teórica válida para cauces formados por arena o grava. Puede ser empleada también para colchones Reno®, gaviones y geomantas, como fue posible verificar con las pruebas realizadas en el Hydraulic Laboratory Engineering Research Center, Colorado State University (Fort Collins - USA) y en el Utah Water Research Laboratory, Utah State University (USA). Los ensayos fueron hechos tanto en escala real como en modelo, para verificar el comportamiento y la resistencia de los revestimientos de fondos de canales, ejecutados en colchones Reno®, gaviones y geomantas.

El gráfico de la figura 3.3.1 compara los resultados de los ensayos de Fort Collins con aquellos obtenidos por la aplicación de la ecuación (16).

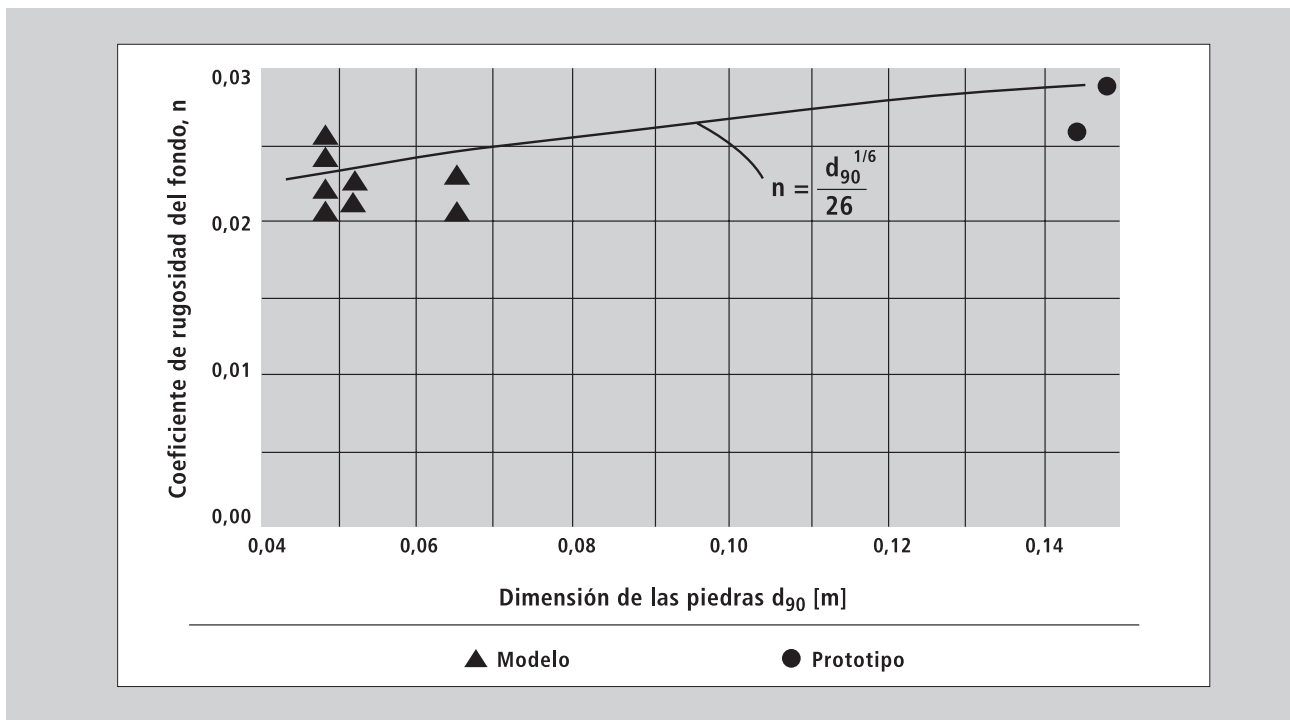


Figura 3.3.1 - Comparación entre los valores experimentales y teóricos del coeficiente de rugosidad de Manning.

De cualquier manera, en los casos de colocación con cuidado, en los cuales la superficie del revestimiento en colchones Reno® o gaviones resulta más regular, el empleo de la ecuación (16) sobreestima la rugosidad.

Por esto, la ecuación (16) debe ser empleada sin olvidar los valores de los coeficientes de rugosidad sugeridos por la práctica y por las pruebas específicas (tabla 3.3.1).

En el caso de colchones Reno® perfectamente impermeabilizados con una mezcla bituminosa o revestidos con mortero de cemento y arena, preparados y colocados con particulares cuidados, se obtiene una superficie lisa y regular, con coeficiente de rugosidad comparable a aquel realizado con concreto asfáltico, o sea, con:

$$n = 0,0158$$

Para obtener estos valores, debe ser dada particular atención a la composición de la mezcla (granulometría continua del filler fino y dimensión máxima de la arena no superior a 3 mm) y prever una cantidad unitaria del mismo no solamente suficiente para llenar los vacíos existentes en la estructura, sino con un ligero exceso, necesario para el reflujo en la superficie hasta del recubrimiento del material de relleno y de la red metálica.

TIPO	NATURALEZA DEL CANAL	$n[s.m^{1/3}]$
1	Canales revestidos con colchones Reno® y recubiertos con mortero.	0,0130
2	Canales revestidos con colchones Reno® perfectamente impermeabilizados con una mezcla de bitumen hidráulico aplicado con métodos particulares para obtener una superficie plana y bien lisa.	0,0158
3	Canales revestidos con colchones Reno® y gaviones caja perfectamente impermeabilizados con mezcla de bitumen hidráulico aplicado directamente.	0,0172
4	Canales revestidos con colchones Reno® y gaviones caja consolidados hasta la superficie con mezcla de bitumen hidráulico que envuelva las piedras superficiales.	0,0200
5	Canales revestidos con colchones Reno® y gaviones caja consolidados con mezcla de bitumen hidráulico que penetre en profundidad.	0,0215
6	Canales revestidos con MacMaT® recubierto con emulsión asfáltica.	0,0205
7	Canales revestidos con MacMaT® y MacMaT®R sin relleno.	0,0280
8	Canales revestidos con MacMaT® y MacMaT®R con vegetación.	0,0320
9	Canales revestidos con MacMaT® y MacMaT®R con relleno de pedrisco.	0,0210
10	Canales revestidos con colchones Reno® llenados con material bien seleccionado y colocado en obra con mucho cuidado.	0,0222
11	Canales revestidos con colchones Reno® llenados con material bien seleccionado y colocado en obra sin cuidado.	0,0250
12	Canales revestidos con colchones Reno® llenados con material de cantera no seleccionado y colocado en obra sin cuidado.	0,0270
13	Canales revestidos con gaviones caja llenados con material bien seleccionado y colocado en obra con cuidado.	0,0260
14	Canales revestidos con gaviones caja llenados con material no seleccionado y colocado en obra sin cuidado.	0,0285
15	Canales en tierra en malas condiciones de manutención: enmarañado de vegetación en el fondo y en las márgenes o depósitos irregulares de piedras y grava, o profundas erosiones irregulares. También canales en tierra ejecutados con máquinas y con mantenimiento descuidado.	0,0303
16	Cursos de agua naturales, con cauce de canto rodado y movimiento del material del fondo.	0,0480

3.4 Estabilidad de la Sección - Colchón Reno®

La estabilidad de un revestimiento puede ser verificada en función de los criterios de velocidad y de tensión de arrastre, siempre comparando la acción del flujo con la resistencia de los materiales. De esta forma tendremos la comparación entre la velocidad media del flujo y la velocidad crítica o velocidad límite soportada por el material del cauce, lo mismo ocurre con la tensión de arrastre del flujo y la resistencia o tensión crítica soportada por el material del cauce.

Las investigaciones sobre el comportamiento de los revestimientos en colchones Reno® y gaviones caja fueron realizados tanto en escala real como sobre modelo en el Hydraulics Laboratory, Engineering Research Center, Colorado State University (Fort Collins - USA) (figuras 3.4.1, 3.4.2, 3.4.3, 3.4.4 y 3.4.5). y en la INA - Instituto Nacional del Agua, Buenos Aires, Argentina (figuras 3.4.6 y 3.4.7).

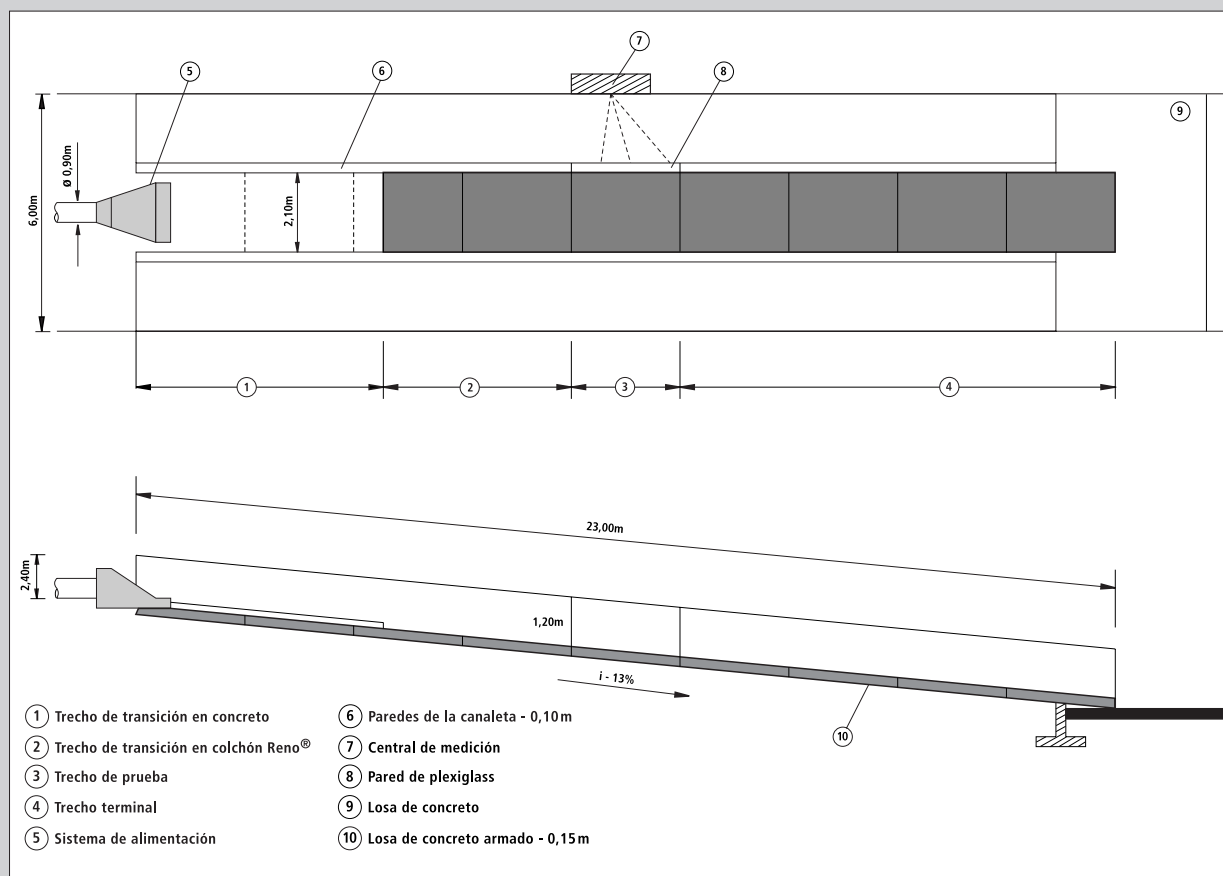


Figura 3.4.1 - Esquema del canal usado en las pruebas en escala real.



Figura 3.4.2 - El canal durante las pruebas en escala real.

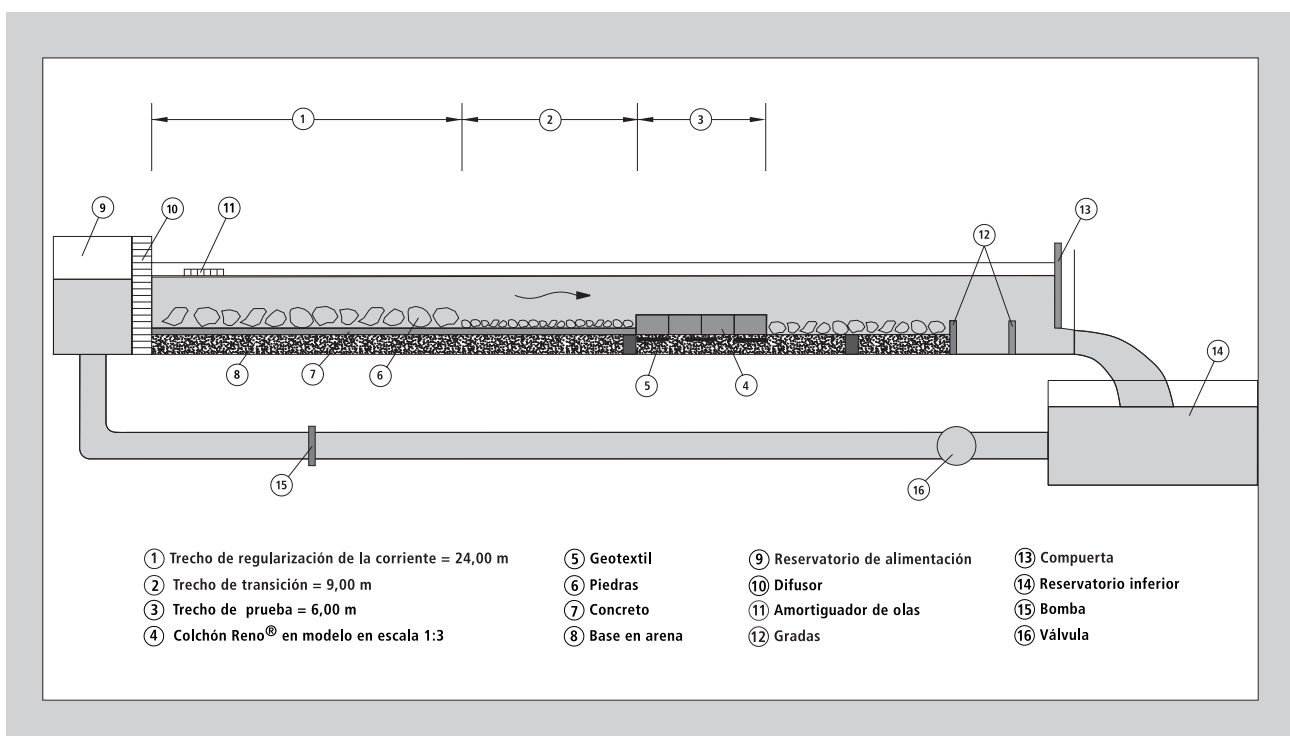


Figura 3.4.3 - Diseño del canal usado en las pruebas en modelo.

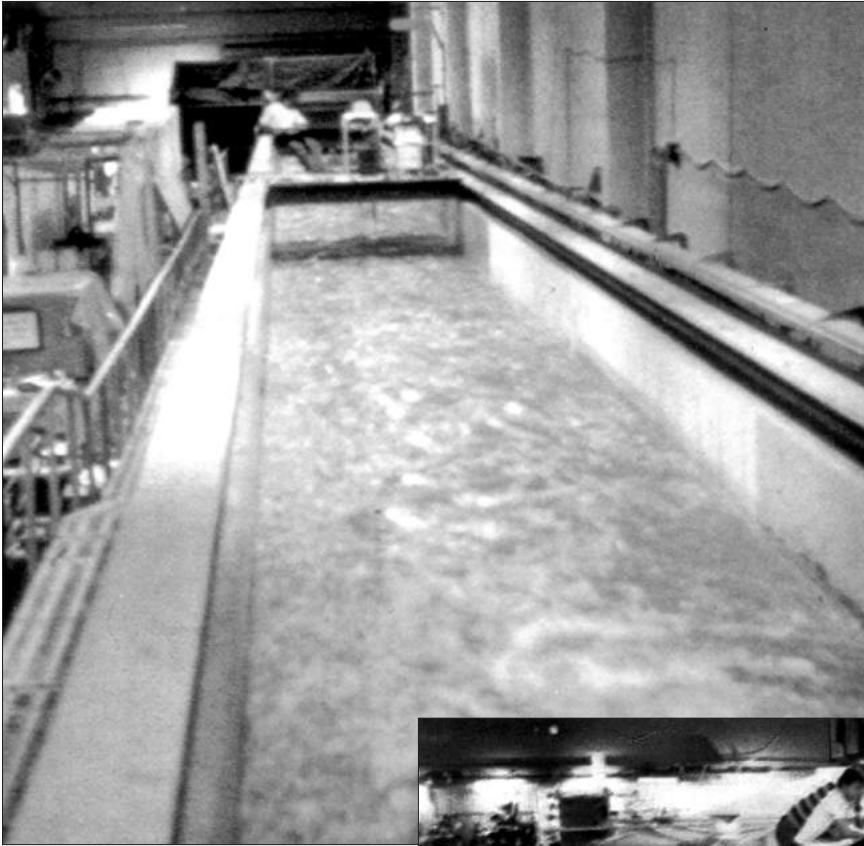


Figura 3.4.4 - Canal durante las pruebas en modelo.



Figura 3.4.5 - Canal durante las pruebas en modelo.

Las mediciones efectuadas se refirieron a:

- las distribución de velocidades y de presiones, tanto en la sección de flujo, como por debajo de los colchones Reno®;
- la determinación del coeficiente de rugosidad;
- el análisis de los fenómenos de turbulencia;
- el análisis de las resistencias al movimiento;
- el estudio y a la definición de la estabilidad del revestimiento;
- el análisis del comportamiento respecto a la deformación del revestimiento, en condiciones hidráulicas particularmente graves;
- la interpretación de los resultados y la elaboración de los métodos de diseño y de cálculo.

En particular, para cada ensayo, fue medido el caudal que provocó el inicio del movimiento de las piedras en el interior de las células de los colchones Reno®. Esta condición, definida como de “primer movimiento”, individualiza el punto crítico para la estabilidad del revestimiento.

En el ámbito de la “teoría de la fuerza de arrastre”, fue posible determinar los valores de los parámetros que más influyen en el fenómeno, para este particular tipo de revestimiento.

De gran importancia es el hecho de haber sido determinado el coeficiente de Shields C_* para los revestimientos en colchones Reno®. La determinación del valor de tal coeficiente, próximo a 0,10, permite estudiar analíticamente el problema de la estabilidad del revestimiento en colchones Reno® considerando el conjunto red más piedra y mostrando el efecto significativo de la red sobre la resistencia del revestimiento.



Figura 3.4.6 - Canal durante las pruebas en modelo.



Figura 3.4.7 - Canal durante las pruebas en modelo.

3.4.1 Tensión Crítica

Tensiones tangenciales relativas al fondo del canal

En general se define como estable un revestimiento en piedra, cuando no se produce el movimiento de los elementos que lo conforman. Esto vale tanto para los revestimientos constituidos por colchones Reno® y gaviones caja, en los cuales existe la presencia de la red metálica para retener las piedras, como para los revestimientos en enrocado (rip-rap) constituidos solamente de material inerte suelto.

La condición de inicio del movimiento de las piedras define el límite de estabilidad del revestimiento de enrocado; en el caso del revestimiento con gaviones, existe una resistencia adicional en función de la malla que envuelve las piedras.

Para un canal en régimen de flujo permanente y uniforme, la tensión tangente ejercitada por el flujo de agua sobre el fondo del canal, es dada por:

$$\tau_o = \gamma_w \cdot R_H \cdot i \quad (17)$$

donde:

γ_w : peso específico del agua [10 KN/m³];

R_H : radio hidráulico de la sección transversal [m];

i : pendiente longitudinal del fondo del canal [m/m].

En la sección de un río, cuando la relación entre el ancho y la profundidad media es mayor o igual a 30, el radio hidráulico (R_H) prácticamente es igual a la profundidad (y) (la diferencia entre R_H e y es del orden del 5%) y la utilización de la profundidad en lugar del radio hidráulico en nada altera el valor resultante de la acción del flujo sobre el cauce. Para relaciones menores que 30, se adopta y en el lugar de R_H , estando siempre a favor de la seguridad, ya que en estos casos y es siempre mayor que R_H , resultando un valor mayor de la acción del flujo sobre el cauce del río o canal.

Por lo tanto:

$$\tau_o = \gamma_w \cdot y \cdot i \quad (18)$$

Aplicando la ecuación (18), el resultado estará siempre a favor de la seguridad. Para valores de la relación entre el ancho y la profundidad por debajo de 8 es aconsejable introducir un factor correctivo (K_f) conforme la fórmula (24) y la tabla 3.4.2, para minimizar la diferencia entre el radio hidráulico (R_H) y la profundidad (y).

Considerando una piedra de diámetro equivalente igual al diámetro medio del material del fondo (es decir el diámetro del tamiz que permite el pasaje del 50% en peso del material que constituye el revestimiento), se define el siguiente parámetro adimensional que procura caracterizar la condición de inicio del movimiento:

$$C^* = \frac{\tau_{o,c}}{(\gamma_s - \gamma_w) \cdot d_m} \quad (19)$$

donde:

C^* : parámetro de Shields;

$\tau_{o,c}$: tensión tangente en la situación crítica de inicio del movimiento [N/m^2];

γ_s : peso específico de las piedras [N/m^3]

d_m : diámetro medio del material del fondo [m].

El denominador es proporcional a la tensión normal del fondo debido al peso inmerso de la piedra; el coeficiente de Shields es por lo tanto análogo a un coeficiente de fricción.

Así, con base en la ecuación (18), es posible determinar cual es la tensión crítica cerca del fondo, o sea, la tensión que puede ser alcanzada sin que ocurran movimientos del material del revestimiento. Así:

$$\tau_{o,c} = C^* \cdot (\gamma_s - \gamma_w) \cdot d_m \quad (20)$$

Por lo tanto, el revestimiento resulta estable cuando la tensión tangente aplicada por el flujo en el revestimiento del fondo (17) sea menor o igual a la tensión tangente crítica soportada por este revestimiento (18). O sea:

$$\tau_o \leq \tau_{o,c} \quad (21)$$

En la figura 3.4.1, es presentado un gráfico que relaciona datos experimentales relativos a la tensión tangente crítica en modelo y prototipo, para canales revestidos con colchones Reno[®], con valores de tensiones críticas para canales revestidos con enrocado suelto (obtenido a partir del diámetro medio de la piedra).

Conviene observar que, en este ensayo, los colchones fueron llenados con piedras del mismo diámetro que las sueltas, sin definir el espesor del colchón Reno®.

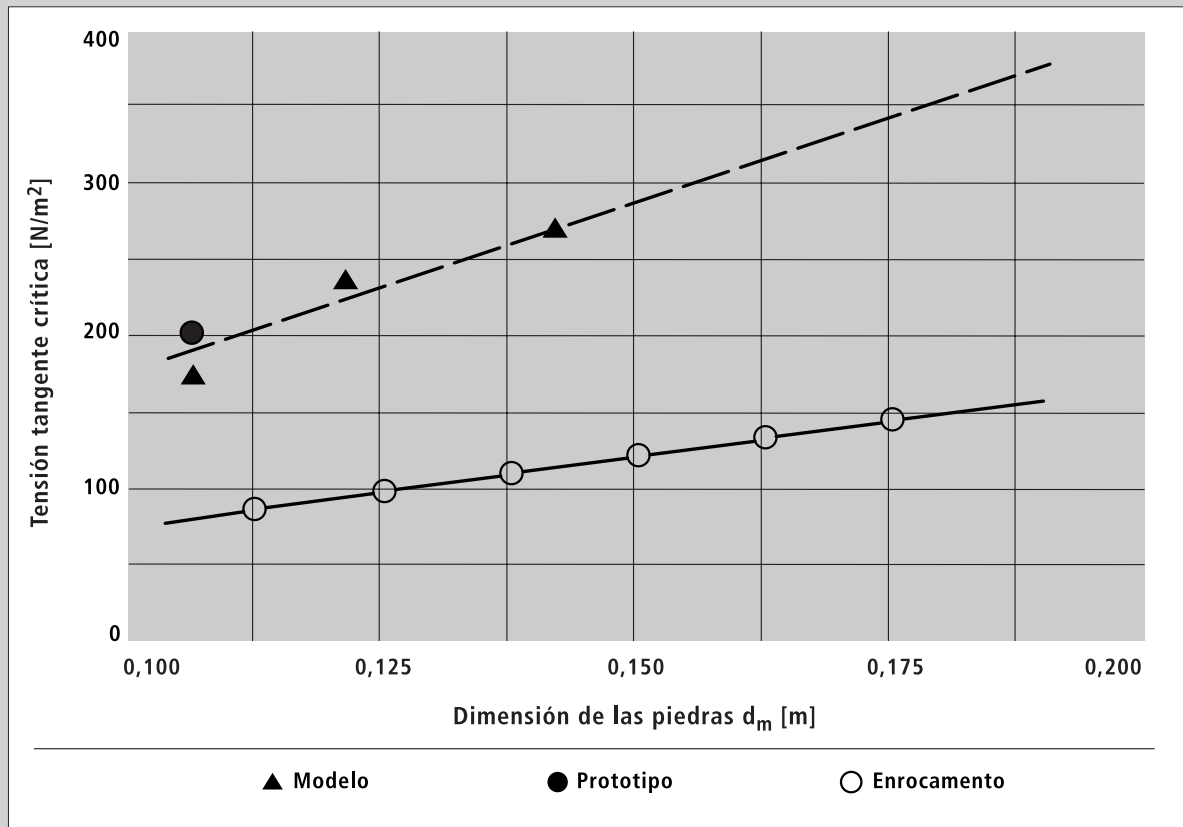


Figura 3.4.8 - Tensión tangente crítica en función de la dimensión de la piedra.

El parámetro o coeficiente de Shields para el enrocado (rip-rap) vale $C_* \approx 0,047$; en el caso de colchones Reno®, donde las piedras son contenidas por red metálica, el valor del parámetro de Shields obtenido experimentalmente pasa a ser de:

$$C_* \approx 0,10$$

Por lo tanto, en igualdad de dimensiones, las piedras de relleno de los colchones Reno®, o de los gaviones caja, soportan una tensión tangente mayor, aproximadamente el doble de aquella soportada por el rip-rap, gracias a la acción de retención de la red metálica.

Vale la pena comentar que los valores citados para el parámetro de Shields son aproximaciones, ya que este adimensional no varía apenas con el tipo de revestimiento. En verdad, el parámetro de Shields depende del número de Reynolds de fricción, ya definido en la ecuación (11).

Además del colchón Reno® ofrecer una protección adicional en relación a las piedras sueltas (considerando los mismos diámetros medios de las piedras en los dos casos) debido a la acción de la red metálica (alcanzando un coeficiente de Shields de 0,10), se puede admitir que la tensión aplicada por la corriente pueda superar hasta en un 20% la tensión crítica calculada por la ecuación (20). Así:

$$\tau_o \leq 1,2 \cdot \tau_{o,c} \quad (22)$$

Este incremento en el valor de la tensión crítica es aceptable siendo que, aún considerando el movimiento de las piedras dentro del colchón Reno, este no se deformará significativamente, no perdiendo su estabilidad y características principales. La viabilidad de este aumento fue verificado experimentalmente.

En el caso en que sea adoptada la ecuación (22) para el dimensionamiento de la protección del canal, deben ser controladas las deformaciones resultantes de la acción del flujo, tema este que será abordado con mayores detalles en el ítem 3.4.3.

Como ejemplo y con la finalidad de auxiliar en la elección del colchón Reno®, presentamos la tabla 3.4.1 en la cual, en función del espesor del mismo y de la dimensión de las piedras, están relacionadas las tensiones de arrastre límite, calculadas para el inicio del movimiento de las piedras, que denominamos de: tensión crítica, que resulta adoptando $C_* \approx 0,10$.

Este valor, en realidad, está por debajo del observado y ya incluye un coeficiente de seguridad. La columna de la tensión máxima admisible es resultante del incremento del orden del 20% en el valor de la tensión crítica, lo cual equivale a un aumento del 20% en el coeficiente de Shields que pasa a valer $C_* \approx 0,12$ (límite superior de los resultados experimentales).

La tabla 3.4.1, por lo tanto, proporciona los resultados de las tensiones de arrastre, o sea, la tensión crítica para $C_* \approx 0,10$, la tensión experimental, que es la tensión obtenida en los ensayos de Fort Collins y que caracteriza el inicio del movimiento de las piedras debajo de la red, y la tensión máxima admisible equivalente a $C_* \approx 0,12$.



Figura 3.4.9 - Veneto - Italia.

Tipo	Espesor [m]	Piedras de relleno		τ de arrastre		
		Dimensiones [mm]	d_{50} [m]	Crítica [N/m ²]	Experimental [N/m ²]	Máxima admisible [N/m ²]
Colchón Reno® malla 6x8	0,17	70 a 100	0,085	136,00	155,00	163,20
		70 a 150	0,110	176,00	200,00	211,20
	0,23	70 a 100	0,085	136,00	155,00	163,20
		70 a 150	0,110	176,00	200,00	211,20
	0,30	70 a 120	0,100	160,00	175,00	192,00
		100 a 150	0,125	200,00	230,00	240,00
Gavión caja malla 8x10	0,50	100 a 200	0,150	240,00	280,00	288,00
		120 a 250	0,190	304,00	370,00	364,80

Tabla 3.4.1 - Tensiones tangentes críticas para los gaviones y colchones Reno®.

Tensiones tangentes relativas a las márgenes del canal

Las fórmulas anteriores, ecuaciones (18) y (20), se refieren a tensiones tangentes relativas al fondo del canal. Para el revestimiento de las márgenes de un canal de sección trapezoidal, se puede considerar como tensión tangente resultante de la acción del flujo sobre el material de revestimiento:

$$\tau_m = 0,75 \cdot \gamma_w \cdot y \cdot i \quad (23)$$

A través de la bibliografía se sabe que el coeficiente 0,75, que multiplica la tensión tangente del fondo para determinar la tensión tangente de la margen, no es constante, variando con la profundidad del flujo y el ancho de la base del canal. En verdad, es posible admitir un coeficiente correctivo también para la tensión tangente del fondo, conforme lo propuesto por Lencastre. En este caso:

$$\tau_o = K_f \cdot \gamma_w \cdot y \cdot i \quad (24)$$

$$\tau_m = K_m \cdot \gamma_w \cdot y \cdot i \quad (25)$$

Aprovechando la sección transversal y las nomenclaturas definidas en la figura 3.2.1, presentamos a continuación la tabla 3.4.2, que define los valores de los coeficientes K_f (relativo al fondo) y K_m (relativo a las márgenes) en relación a los parámetros geométricos de la sección transversal:

	m					
	2		1,5		0	
b/y	K_f	K_m	K_f	K_m	K_f	K_m
0	0	0,650	0	0,565	0	0,000
1	0,780	0,730	0,780	0,695	0,372	0,468
2	0,890	0,760	0,890	0,735	0,686	0,686
3	0,940	0,760	0,940	0,743	0,870	0,740
4	0,970	0,770	0,970	0,750	0,936	0,744
6	0,980	0,770	0,980	0,755	—	—
8	0,990	0,770	0,990	0,760	—	—

Tabla 3.4.2 - Valores de K_f y K_m (fuente: Lencastre, 1983).

Vale la pena notar que las ecuaciones (24) y (25) utilizan el valor de la profundidad y , en sus cálculos, en vez de utilizar el valor del radio hidráulico, conforme mostrado en la ecuación (17). Esto es porque en la determinación de los coeficientes K_f y K_m ya se consideró el efecto de la substitución del radio hidráulico por la profundidad.

La tensión tangente crítica en las márgenes también es diferente de la del fondo, siendo que para las márgenes es utilizada la siguiente expresión:

$$\tau_{m,c} = \tau_{o,c} \cdot \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \alpha}{\sin^2 \psi}} \quad (26)$$

donde:

$\tau_{m,c}$: tensión tangente crítica en las márgenes [N/m^2];

$\tau_{o,c}$: tensión tangente crítica en el fondo, dada por la ecuación (19) [N/m^2];

α : ángulo de inclinación de la margen;

ψ : ángulo de fricción interna del material de relleno del revestimiento.

Para las piedras contenidas en los colchones Reno® el ángulo de fricción interna es de aproximadamente 41°. Debe ser recordado que, en muchos casos prácticos los colchones Reno® son aplicados en taludes con inclinaciones de hasta 45° y, en estos casos, son utilizadas estacas para auxiliar en la fijación de los colchones al suelo. De esta forma, no vale más el valor de 41°, si no un valor un poco mayor que 45°, de forma que continúe valiendo la ecuación (25) siendo que, cuando el valor de inclinación supera el valor del ángulo de fricción interna del material, esto significa que el revestimiento no es estable.

La estabilidad para los revestimientos de las márgenes está dada por una relación del mismo tipo de la presentada en la ecuación (20), o sea:

$$\tau_m \leq \tau_{m,c} \quad (27)$$

Del mismo modo como fue considerado que la tensión tangente aplicada en el fondo del canal por la acción del flujo podría superar la tensión crítica hasta en un 20% debido a la aceptación de pequeñas deformaciones del colchón Reno®, también en el caso de las márgenes se puede admitir el mismo razonamiento, siendo que:

$$\tau_m \leq 1,2 \cdot \tau_{m,c} \quad (28)$$

En el caso sea adoptada la tensión máxima admisible que equivale a utilizar la ecuación (28) para el dimensionamiento del canal, debe haber un control de las deformaciones resultantes de la acción de la corriente, admitiendo por ejemplo un número mayor de diafragmas y/o de "tirantes verticales" con el objetivo de "consolidar" mejor las piedras entre las redes.

Trechos Curvos

En los trechos en curva se verifica un aumento de la tensión tangente sobre la margen externa. Por esto, se debe asumir:

$$\tau_m = K \cdot \gamma_w \cdot R_H \cdot i \quad (29)$$

El coeficiente K puede ser encontrado utilizando la figura 3.4.10 en función de la relación entre el ancho de la superficie del agua y el radio de curvatura.

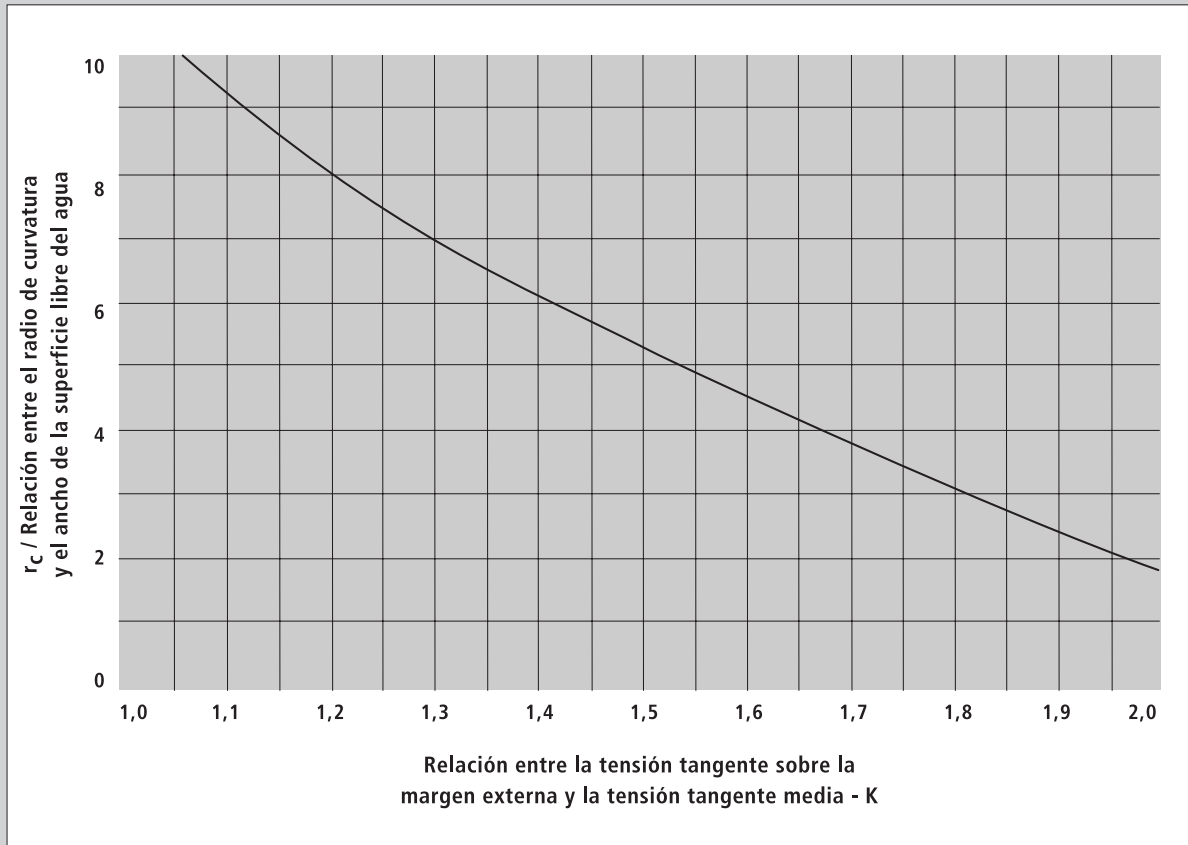


Figura 3.4.10 - Coeficiente K en función de la relación entre el radio de la curva y el ancho de la superficie libre del agua.



Figura 3.4.11 - Toscana - Italia.

3.4.2 Velocidad Crítica

Otro criterio que puede ser aplicado para la verificación de la estabilidad de un canal a la acción del flujo, es el criterio que se basa en la velocidad crítica o máxima velocidad admisible para que no haya desplazamiento de las piedras.

Según Lencastre, en la mayoría de las aplicaciones prácticas no es posible determinar, con suficiente rigor, la velocidad crítica en el fondo. Por este motivo, el análisis de la estabilidad del fondo de canales por este criterio tradicionalmente se basa en la velocidad media del flujo.

Para canales con la misma velocidad media de flujo y el mismo material de revestimiento del cauce, pero con diferentes profundidades, la velocidad en el fondo es mayor para el flujo con menor profundidad. Por esto, el método para la determinación de la velocidad crítica debería tener en cuenta las diferentes profundidades de la corriente.

Aunque la tensión tangente, por si sola, sea suficiente para definir la condición de estabilidad (mientras que la velocidad crítica, para un determinado revestimiento, depende de la profundidad del agua), en muchos casos prácticos se dispone apenas de datos respecto de la velocidad media del flujo en un trecho determinado.

A partir de los experimentos realizados en Fort Collins, fue construido el gráfico de la figura 3.4.12, que representa la velocidad crítica de inicio del movimiento de las piedras en función de sus dimensiones. De la misma forma que en el caso de la tensión de arrastre, tenemos la velocidad crítica necesaria para el movimiento de la piedra suelta y de la misma piedra (mismo diámetro) envuelta por la red de un colchón Reno®.

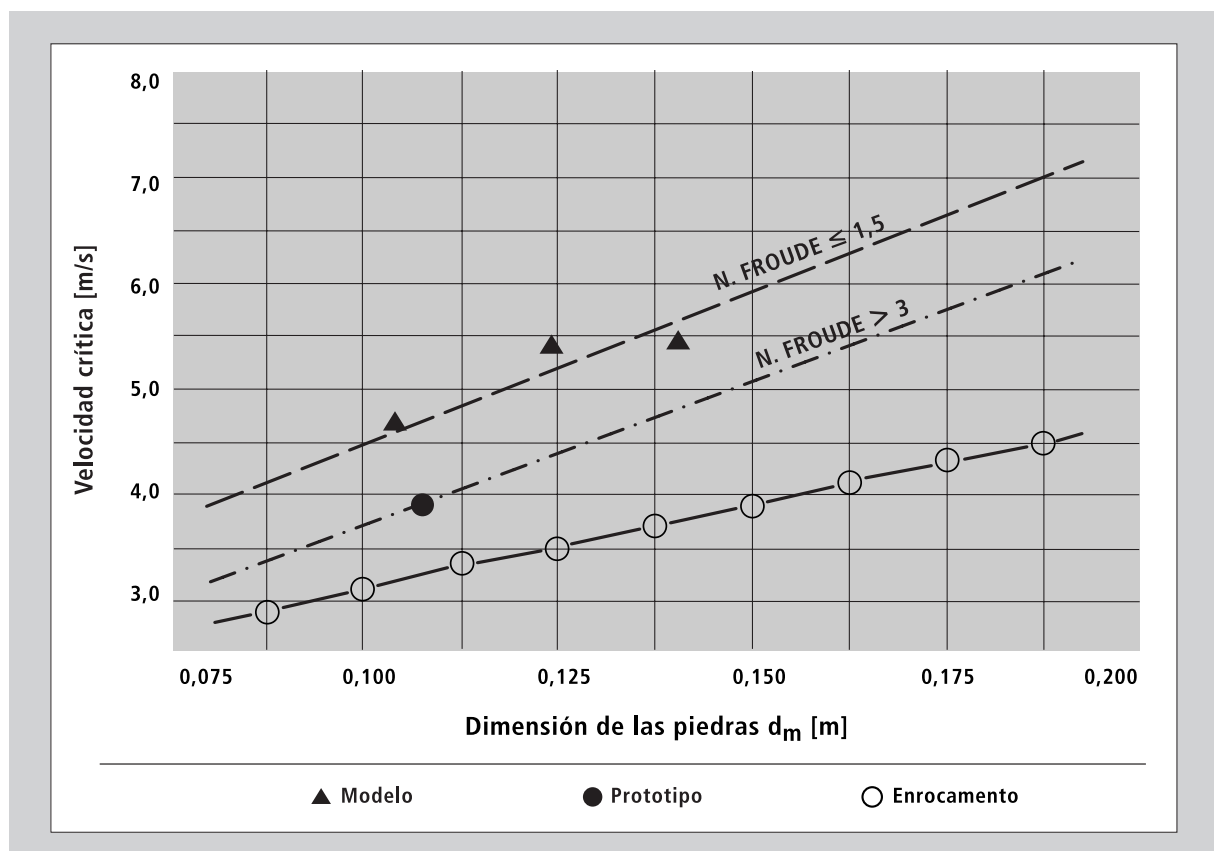


Figura 3.4.12 - Velocidad crítica en función de las dimensiones de las piedras.

Para el caso específico de los colchones Reno[®], los ensayos realizados en Fort Collins, permitieron la determinación de un gráfico, presentado en la figura 3.4.13, que relaciona la velocidad crítica del inicio del movimiento de las piedras con el espesor del colchón Reno[®], y del gavión caja, llenados con piedras de dimensiones coherentes con la abertura de la red y el espesor del colchón.

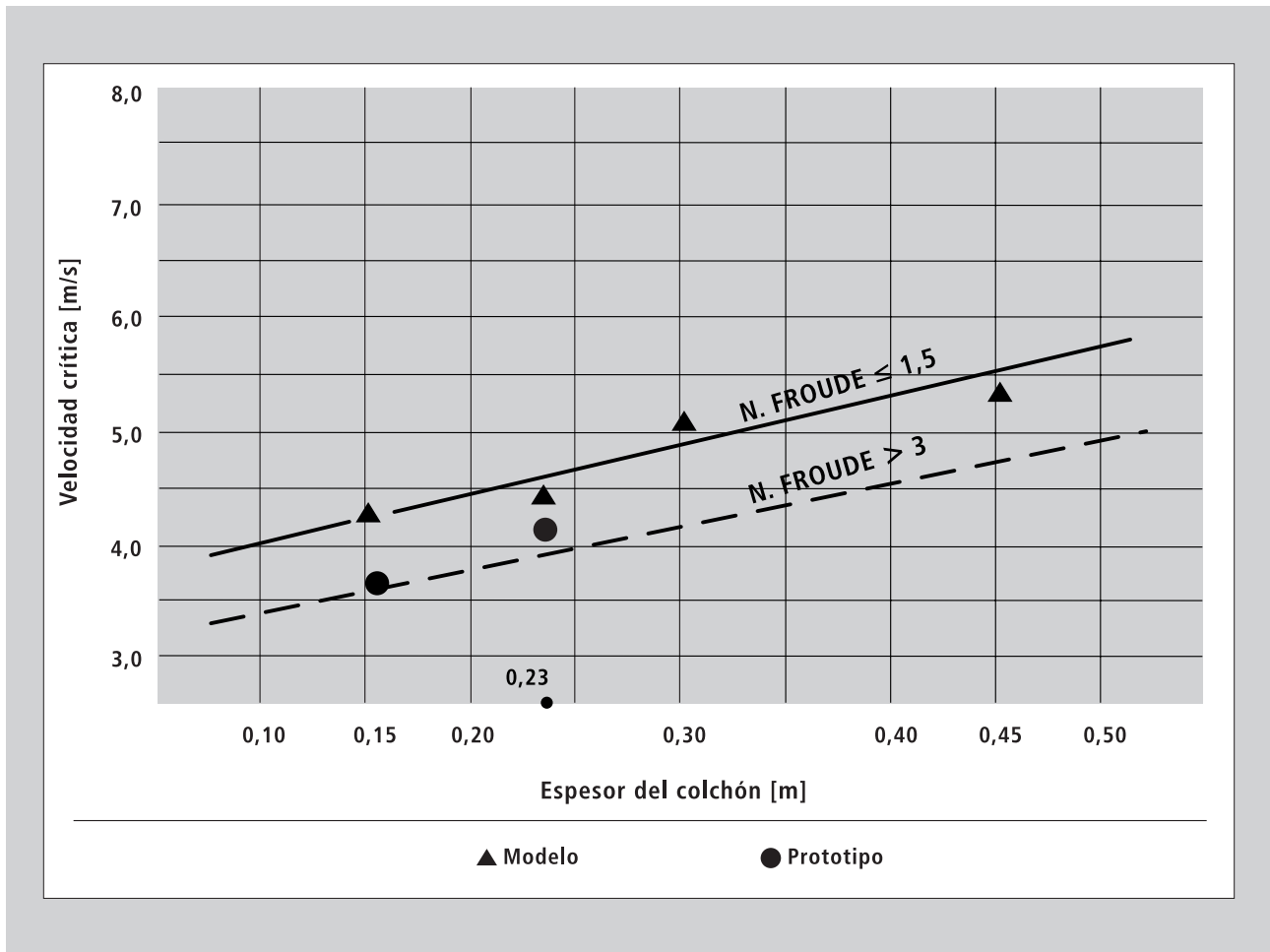


Figura 3.4.13 - Velocidad crítica en función del espesor del colchón Reno[®].

Para el predimensionamiento, la tabla 3.4.3 permite obtener rápidas indicaciones sobre la velocidad crítica y la velocidad límite para diferentes espesores de colchón Reno[®] y gavión caja. La velocidad crítica es aquella que provoca la condición de inicio del movimiento en las piedras del revestimiento, mientras que la velocidad límite es aquella que puede ser soportada por el revestimiento por cortos períodos de tiempo, admitiendo pequeños movimientos de las piedras en el interior de las mallas (si esta velocidad límite actúa por largos períodos de tiempo, o frecuentemente, puede provocar daños a la estructura del revestimiento).

3. Dimensionamiento Hidráulico

Tipo	Espesor [m]	Piedras de relleno		Velocidad crítica [m/s]	Velocidad límite [m/s]
		Dimensiones [mm]	d ₅₀ [m]		
Colchón Reno®	0,17	70 a 100	0,085	3,5	4,2
		70 a 150	0,110	3,8	4,5
	0,23	70 a 100	0,085	3,7	4,5
		70 a 150	0,110	4,1	4,9
	0,30	70 a 120	0,100	4,0	4,7
		100 a 150	0,125	4,3	5,0
Gavión caja	0,50	100 a 200	0,150	4,9	5,8
		120 a 250	0,190	5,5	6,4

Tabla 3.4.3 - Velocidad crítica y velocidad límite para colchones Reno® y gaviones caja.



Figura 3.4.14 - Perú.



Figura 3.4.15 - Estados Unidos.

3.4.3 Deformaciones

Cuando la tensión tangencial supera el valor crítico de “primer movimiento”, parte de las piedras se desplazan en dirección aguas abajo, quedando aún así confinadas dentro de cada célula del colchón Reno® (figuras 3.4.16 y 3.4.17).

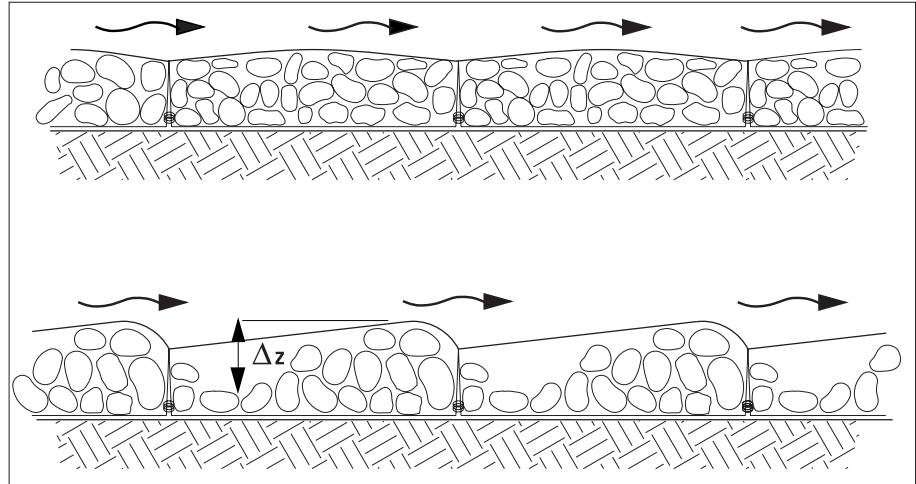


Figura 3.4.16 - Esquema del movimiento de las piedras en el interior de las bolsas.



Figura 3.4.17 - Foto del movimiento de las piedras en el interior de las bolsas, durante un ensayo.

Al aumentar ulteriormente las tensiones, se puede alcanzar una nueva situación de equilibrio, en la cual la resistencia de la red metálica comprueba ulteriormente su función de retención. Por el contrario, si las tensiones tangenciales aumentan aún más, puede provocar la pérdida de la eficacia del revestimiento (en el caso que el fondo sobre el cual está apoyado el colchón Reno®, quede descubierto, o en el caso que la tensión de la red de la tapa supere la tensión de ruptura).

El grado de protección ofrecido por el colchón Reno® al fondo no se modifica aún después de verificarse la deformación (lógicamente, si el fondo no queda descubierto y si la red se mantiene íntegra), siendo que la velocidad del agua por debajo del colchón no cambia sensiblemente.

Para evaluar el grado de deformación, se utiliza el parámetro $\Delta z/d_m$ donde Δz es la distancia vertical entre el punto más bajo y el más alto de la superficie asumida por las piedras (figura 3.4.16).

Se define el parámetro adimensional “coeficiente eficaz de Shields” como siendo

$$C'_* = \frac{\tau_b - \tau_c}{(\gamma_s - \gamma_w) \cdot d_m} \quad (30)$$

$\Delta z/d_m$ y C'_* son ligados por una relación expresada por la curva de la figura 3.4.12. La reducción del espesor del colchón Reno® en la parte aguas arriba de la celda puede ser considerado igual a $\Delta z/2$. Para evitar que el fondo quede sin protección y sea expuesto directamente a la acción de la corriente, se debe por lo tanto garantizar la siguiente relación:

$$\frac{\Delta z}{d_m} \cdot \leq 2 \cdot \left(\frac{t}{d_m} - 1 \right) \quad (31)$$

donde:

t : espesor del colchón Reno®.

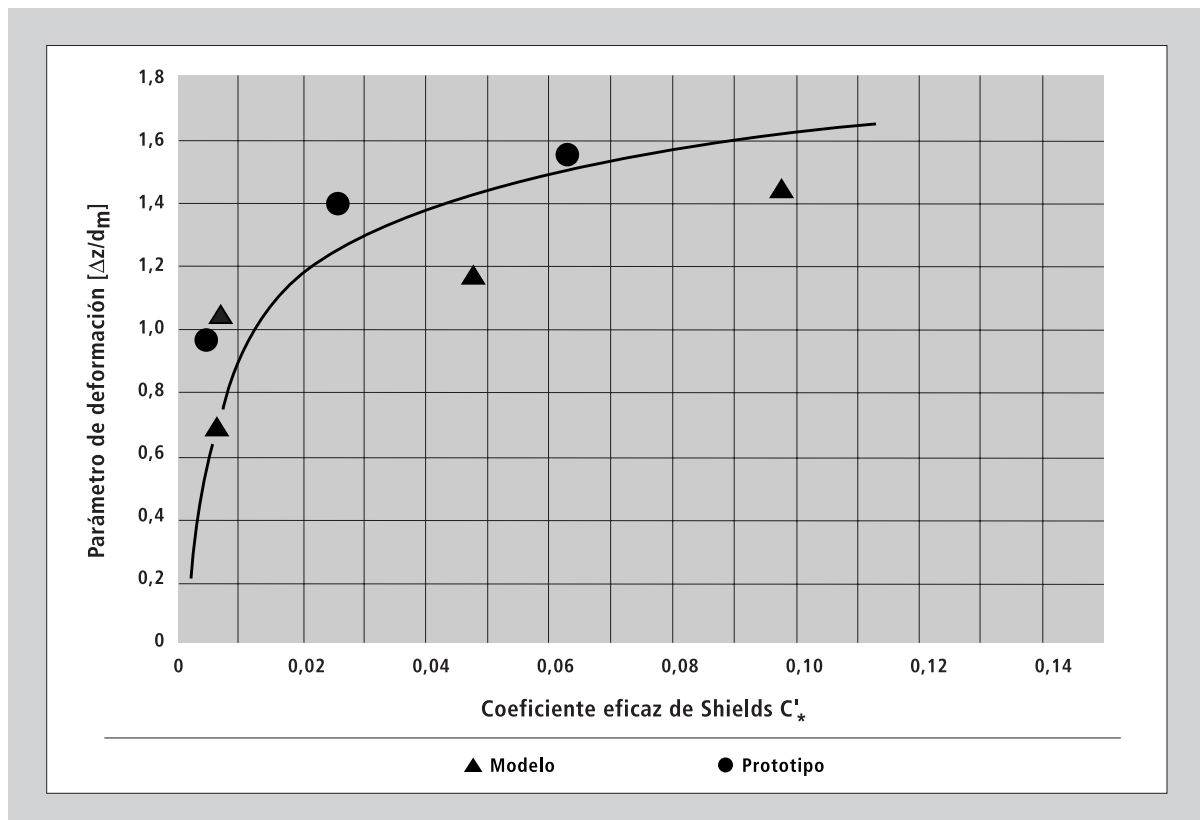


Figura 3.4.18 - Relación entre el parámetro de deformación y el coeficiente eficaz de Shields.

El mismo procedimiento para verificar las deformaciones admisibles es aplicado también para los colchones Reno® de las márgenes.

Por la figura 3.4.18 se verifica que, por arriba de ciertos valores de C^* el parámetro $\Delta z/d_m$ no aumenta más; por esto, el colchón Reno® cuyo espesor sea de 1,8 a 2 veces la dimensión de la “piedra estable” puede, virtualmente, soportar condiciones mucho más graves que las de diseño, sin perder la eficacia.

Se puede admitir que las τ_o superen no más que el 20% de las $\tau_{o,c}$; en este caso es entonces necesario realizar el control de las deformaciones para el caudal de diseño. Ejecutando el control de la deformación, para un caudal superior al de diseño, se obtiene una evaluación de la reserva de resistencia de la estructura.

Es necesario también tener en cuenta que el comportamiento durante la deformación depende del espesor del revestimiento, de las dimensiones de las células, de la presencia de tirantes verticales, de la rigidez de la red metálica y del grado de acomodamiento de las piedras.

La figura 3.4.18 fue obtenida de los datos colectados en las pruebas sobre colchones Reno® con diafragmas a cada metro y para espesor del colchón Reno® de aproximadamente 0,23 m. Es por lo tanto, rigurosa en situaciones análogas, pero provee una óptima indicación también para otros tipos de colchones Reno® y gaviones caja.

Es importante observar que se debe también tener en cuenta la resistencia de la malla de la tapa que puede llegar a la rotura debida a la excesiva deformación provocada por el desplazamiento de las piedras (efecto vela o turbulencia) o al desgaste debido al movimiento o vibración de las piedras de relleno (que puede afectar el revestimiento del alambre de la malla). Se aconseja, en este caso, tener en cuenta la frecuencia de los eventos que provocan el movimiento de las piedras.



Figura 3.4.19 - Canal adutor de Pedra do Cavalo, revestimiento con colchón Reno® - Bahia - Brasil.

3.4.4 Velocidad Residual en el Fondo - Utilización de Filtros

En los revestimientos en colchones Reno® y gaviones caja, así como en el caso de piedras sueltas (rip-rap), no solamente deben ser dimensionados el espesor del revestimiento y la dimensión de las piedras para que éstas resistan a la acción del flujo, sino también debe ser evitada la erosión del suelo de base, o sea de apoyo, del revestimiento.

La velocidad del agua entre las camadas de piedras y entre éstas y el suelo, debe ser suficientemente pequeña para evitar el movimiento de las partículas que constituyen el cauce natural.

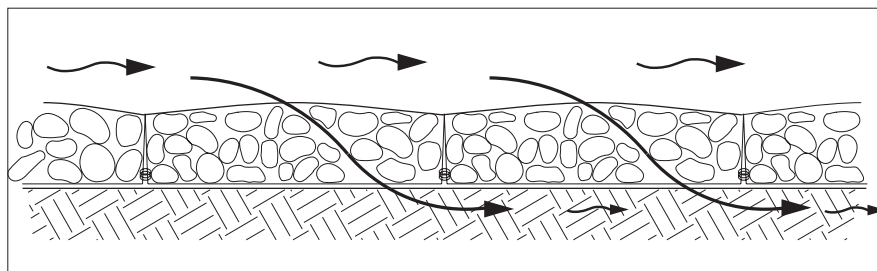


Figura 3.4.20 - Esquema del flujo del agua en el interior de las bolsas.

La velocidad del agua debajo del revestimiento depende principalmente de la pendiente del canal y del tamaño de los vacíos entre las piedras, o sea, de las dimensiones de las mismas. En la hipótesis que la dirección predominante del flujo sea paralela a la superficie del colchón Reno®, esta velocidad permanece prácticamente constante al variar las condiciones hidráulicas y el espesor del colchón Reno®.

Estas observaciones fueron verificadas a partir de los experimentos desarrollados en el laboratorio de Fort Collins, pudiéndose afirmar que la velocidad debajo del colchón Reno®, en la interfase con el fondo o con el eventual filtro, puede ser determinada con la fórmula de Manning:

$$V_b = \frac{1}{n_f} \cdot \left(\frac{d_m}{2} \right)^{2/3} \cdot i^{1/2} \quad (32)$$

donde:

V_b : velocidad en las interfases colchón Reno® fondo [m/s];

n_f : coeficiente de rugosidad del fondo [$s \cdot m^{1/3}$];

d_m : dimensión media de las piedras de relleno [m].

Se puede asumir $n_f = 0,02$ si, por debajo del colchón Reno® se encuentra un filtro geotextil o ningún filtro, y $n_f = 0,025$ si, por el contrario, existe un filtro de grava.

Siendo d_m la dimensión media de las piedras, $d_m/2$ es asumido como radio hidráulico para el movimiento del agua por debajo del colchón Reno®.

La velocidad V_b debe ser comparada con la velocidad V_e admisible en la interfase con el material de base.

La velocidad V_e es la velocidad límite que el suelo puede soportar sin ser erosionado y, para el caso de suelos cohesivos, puede ser obtenida a través del gráfico de la figura 3.4.21.

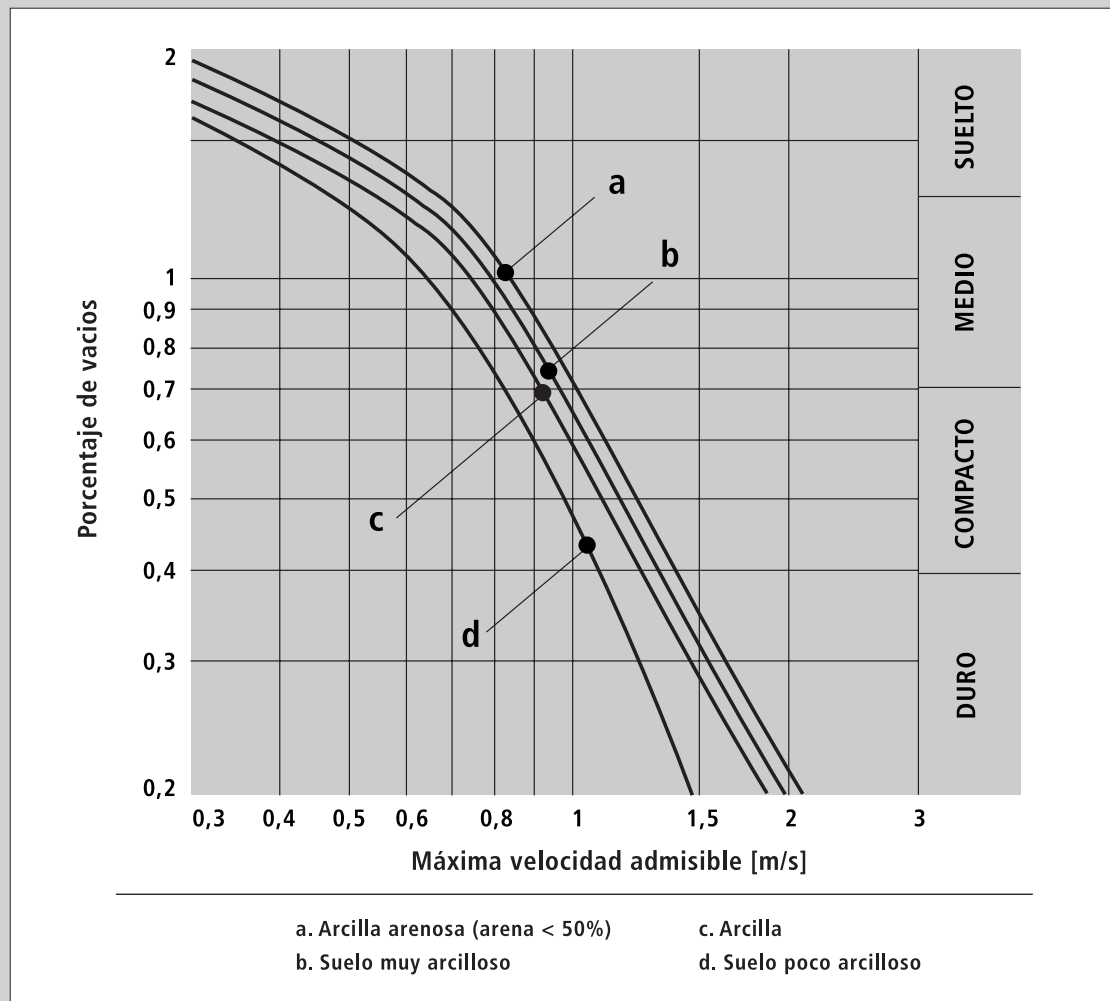


Figura 3.4.21 - Valores de las máximas velocidades admisibles para suelos cohesivos.

Para suelos constituidos por sedimentos no cohesivos (arena y grava), se puede utilizar la ecuación:

$$V_e = 16,1 \cdot d_m^{1/2} \quad (33)$$

donde:

V_e : velocidad admisible [m/s];

d_m : diámetro medio del material [m].

Al usarse un filtro de geotextil no tejido entre el colchón Reno® y el suelo, la velocidad del agua, después de atravesado el geotextil de arriba hacia abajo, en la interfase con el suelo, sufre una reducción y es dada por la ecuación (32), aún en el caso de filtro colmatado.

Si, aún con el empleo de un filtro geotextil, la velocidad del agua en la interfase con el material de base fuera superior a la admisible, es oportuno prever un filtro de grava o arena entre el filtro y el cauce.

Tal filtro debe tener un espesor de por lo menos 0,15 m a 0,20 m y también ser superior al valor:

$$S = \frac{d_v}{f} \cdot \left[1 - \left(\frac{v_e}{v_b} \right)^2 \right] \quad (34)$$

onde:

f : coeficiente de Darcy-Weisbach (en este caso se puede asumir $f=0,05$);

d_v : diámetro equivalente de los vacíos, que se puede asumir como 1/5 de la dimensión media de la grava que constituye el filtro, o sea:

$$d_v = \frac{d_{50}(\text{filtro})}{5} \quad (35)$$

La granulometría del filtro se determina con las siguientes relaciones:

$$\begin{aligned} \frac{d_{50}(\text{filtro})}{d_{50}(\text{suelo})} &\leq 40 \\ 5 &\leq \frac{d_{15}(\text{filtro})}{d_{15}(\text{suelo})} \\ \frac{d_{15}(\text{filtro})}{d_{85}(\text{suelo})} &\leq 5 \end{aligned} \quad (36)$$

Conviene recordar que este filtro de material no cohesivo (arena, grava) fue calculado para estar entre el suelo y el geotextil no tejido. Si fuera necesario el filtro de transición y no fuera utilizado ningún otro tipo de geotextil y el filtro estuviera directamente en contacto con las piedras del colchón Reno® o del gavión caja, entonces la granulometría del filtro también deberá obedecer a la condición de no pasar a través de los vacíos de las piedras del revestimiento. En este caso su cálculo será efectuado utilizando las mismas ecuaciones, con el cuidado de adoptar las respectivas granulometrías, o sea, el “filtro” pasa a ser la camada de revestimiento y el “suelo” pasa a ser la camada de filtro.

En estos casos, pueden ser necesarias más de una camada de filtro, lo cual vuelve la utilización de un geotextil no tejido, de manera general, más económico.

3.5 Estabilidad de la Sección - Geomantas

Como ya fue comentado, existen varios tipos de geomantas que pueden ser utilizadas como revestimiento de pequeños cursos de agua. Son estructuras recientes, confeccionadas con materiales sintéticos.

En el caso específico, será tratada la definición del dimensionamiento de las geomantas de la línea MacMat®, cuyo espesor varía de 10 mm MacMat®L a 20 mm MacMat®S y que son formadas por filamentos sintéticos, dispuestos aleatoriamente.

De manera general, este tipo de geomanta tiene como características principales dar soporte al desenvolvimiento de la vegetación y, debido a su estructura artificial, aumentar la resistencia de las márgenes contra la erosión.

Puede ser utilizado con sus vacíos llenados con tierra o pedrisco, pudiendo este, a su vez, ser consolidado en el obrador con emulsión asfáltica o, en obra, con cemento proyectado.

En el revestimiento de las márgenes, tiene mejor aplicación arriba de la línea de agua permanente en función de poder ser asociada a la vegetación. Puede ser usada por debajo del agua colmatada o con pedrisco suelto (en este caso su resistencia será menor que la del caso anterior), o consolidado con emulsión asfáltica.

3.5.1 Características Generales

Las geomantas pueden ser usadas como revestimiento de canales cuando la velocidad de la corriente no es muy alta y la duración de la crecida es corta.

El dimensionamiento de los revestimientos con geomantas tiene que tener en cuenta algunos factores típicos de esta solución: el movimiento de las piedras confinadas por la geomanta, el crecimiento de la vegetación, el comportamiento a fatiga del material, el sifonamiento del material del fondo etc.

También en este caso, antes del dimensionamiento del revestimiento, es necesario conocer cuales son las características y el comportamiento de los revestimientos en geomantas.

En general un revestimiento de material suelto es definido como estable cuando el flujo no es capaz de producir el movimiento de las partículas del revestimiento o de las partículas que constituyen la base de apoyo. El límite de estabilidad del revestimiento con geomanta es definido por la condición de inicio del movimiento de las partículas contenidas por esta o por un predeterminado valor (en profundidad y extensión) de la erosión por debajo de la misma.

En las geomantas, los granos de material suelto están semiconfinados entre el enmarañado formado por las fibras. Así como en el caso de los colchones Reno®, donde el movimiento de las piedras es impedido por la presión de la tapa y por la presencia de los diafragmas, en este caso el obstáculo al movimiento de las piedras son los enmarañados formados por los filamentos.

Debido a sus pequeñas dimensiones, las partículas son más expuestas a los efectos de la turbulencia de la lámina de agua en contacto con el fondo. En el caso de los revestimientos con geomantas, deben ser considerados no solamente los parámetros hidráulicos de la crecida, sino también su duración, especialmente en el caso de haber vegetación asociada.

Es importante resaltar la necesidad del anclaje de las geomantas, que puede ser obtenido con grampas o estacas metálicas clavadas en el terreno. Los anclajes inhiben movimientos durante el llenado y aumentan la resistencia del revestimiento en situaciones críticas.

El diseño del revestimiento con geomantas del tipo MacMat® puede ser hecho de la siguiente forma: inicialmente se aplica un método de preselección (en función de la velocidad máxima de la crecida, sin considerar su duración), que en realidad puede ser entendido como una definición del tipo de geomanta MacMat® que debe ser utilizada en cada caso o, también, si hay la necesidad o no de aplicar el revestimiento; el segundo paso es usar un método basado o en la velocidad crítica o en la tensión crítica para verificar la estabilidad del revestimiento escogido para las condiciones de diseño (teniendo en cuenta la duración de la crecida).

3.5.2 Predefinición del Tipo de Geomanta

Necesidad de la protección

Por tratarse de corrientes con velocidades no muy altas, antes de dimensionar el revestimiento, es necesario verificar si su aplicación es realmente necesaria, es decir si el canal, en condiciones naturales, es capaz de resistir bien a la acción del flujo.

El gráfico de la figura 3.5.2 define una velocidad crítica del flujo, o sea, una velocidad a partir de la cual inicia el movimiento de las partículas del cauce, considerando el diámetro característico d_{50} de diferentes tipos de suelo. Este gráfico es derivado del diagrama de Hjulström (1935) y no depende del factor duración.



Figura 3.5.1 - Colocación de la geomanta.

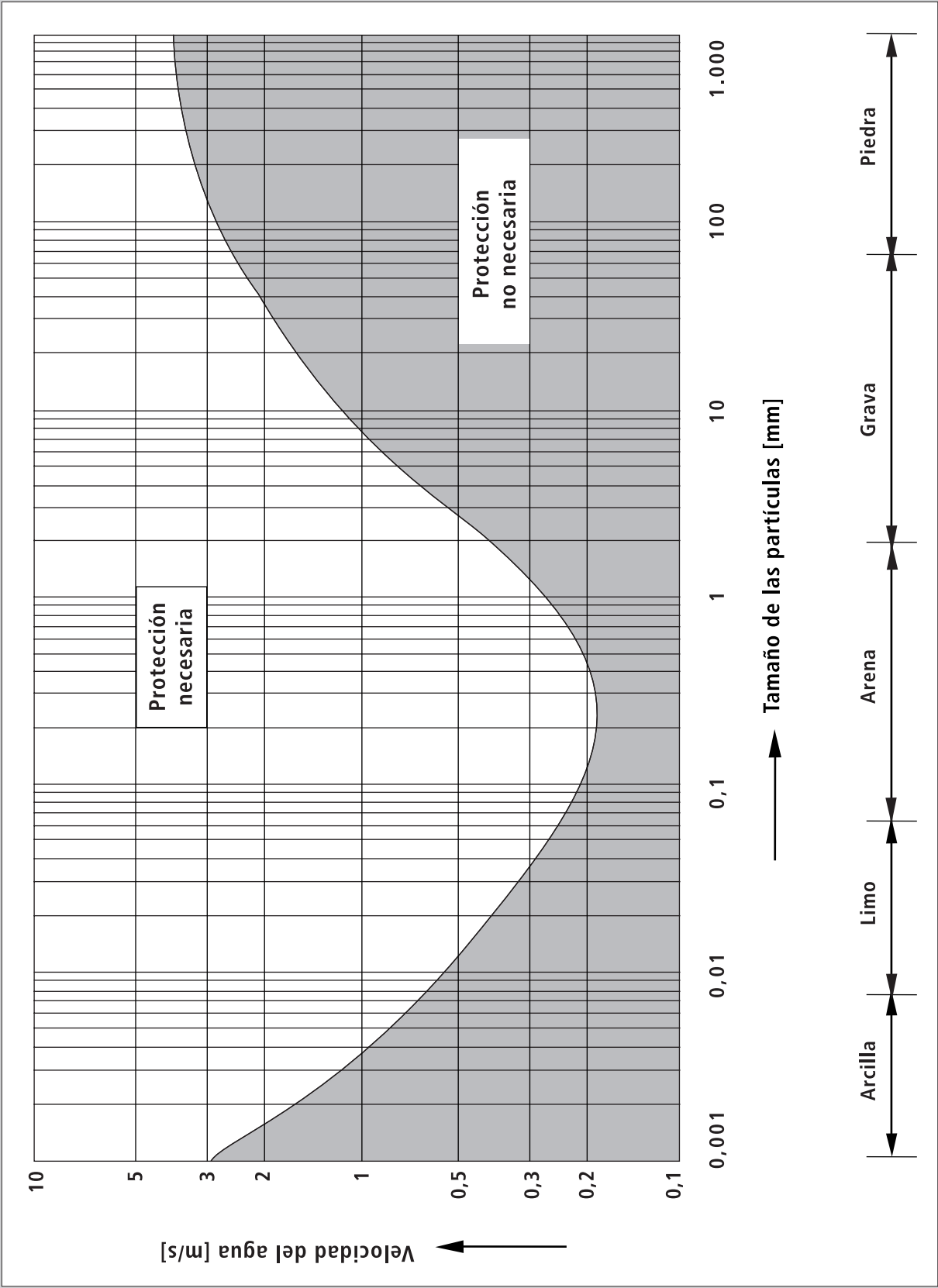


Figura 3.5.2 - Velocidad crítica para diversos tipos de suelo.

Posición y largo del revestimiento MacMat®

La posición y el largo del revestimiento dependen fundamentalmente de la variación del nivel de agua en el canal.

El nivel de agua máximo es estimado como:

- para canales con poca variación del nivel de agua y sin la influencia de las mareas: nivel de agua máximo normal;
- para canales con gran variación del nivel de agua, pero sin la influencia de las mareas: nivel de agua que es excedido un máximo de tres veces durante el año;
- para canales con la influencia de las mareas: nivel de agua máximo anual.

El nivel de agua mínimo es estimado como:

- para canales con variaciones significativas de nivel, pero sin la influencia de las mareas: nivel mínimo normal;
- para canales donde hay influencia de las mareas: nivel de agua mínimo anual.

Elección del tipo adecuado de geomanta MacMat®

La elección del tipo de geomanta y su dimensionamiento es función del período en que ésta estará sumergida y del tipo e intensidad de la acción a que estará sometida, es decir: la acción de la corriente y la acción de las olas.

Como ya fue mencionado, la acción de la vegetación aumenta la estabilidad de la geomanta. El hecho de estar bajo agua por largos períodos, inhibe el desenvolvimiento de la vegetación y por lo tanto la resistencia será apenas función de la geomanta con o sin relleno. Estando por períodos largos arriba del nivel de agua o sea, sumergida, por períodos cortos (durante las crecidas y por la acción de las olas provocadas por las embarcaciones o por el viento), aumenta significativamente la estabilidad del conjunto, debiéndose admitir el desarrollo de la vegetación (de preferencia sembrada) asociada a la geomanta con o sin relleno.



Figura 3.5.3 - Trinidad - Bolivia.

3.5.3 Estabilidad del Revestimiento

En el caso que sea necesaria la protección del canal, debe ser verificado si este permanece constantemente cubierto por el agua o se mantiene seco, después de haber sido revestido, por el tiempo suficiente para permitir el crecimiento de la vegetación y posteriormente sumergido por períodos breves.

En el primer caso (cuando el revestimiento está siempre sumergido) la geomanta debe ser colocada sobre el cauce, firmemente anclada y llenada con pedrisco. En el segundo caso, donde el revestimiento queda sumergido por cortos períodos de tiempo, la geomanta debe ser sembrada y cubierta con tierra.

Estabilidad en términos de velocidad

- Revestimiento permanente bajo agua

En este caso no se tiene la acción complementaria de la vegetación y la geomanta debe ser dimensionada en función de sus propias características. Para definir el tipo de revestimiento es necesario determinar la velocidad máxima y la duración de la crecida.

Una vez establecidos los valores de velocidad del flujo y la duración media de las crecidas, es posible definir el tipo más adecuado de revestimiento con geomanta.

La figura 3.5.5 provee, para el caso de trechos planos (en el fondo), las condiciones de contorno para la elección del tipo de relleno en las geomantas MacMat®S en función de la velocidad crítica (velocidad por la cual se produce el movimiento inicial de las partículas de relleno de los vacíos) y de la duración de la crecida, (que provoca la erosión del fondo y el consiguiente colapso del revestimiento) para situación de revestimiento sin vegetación.



Figura 3.5.4 - Estados Unidos.

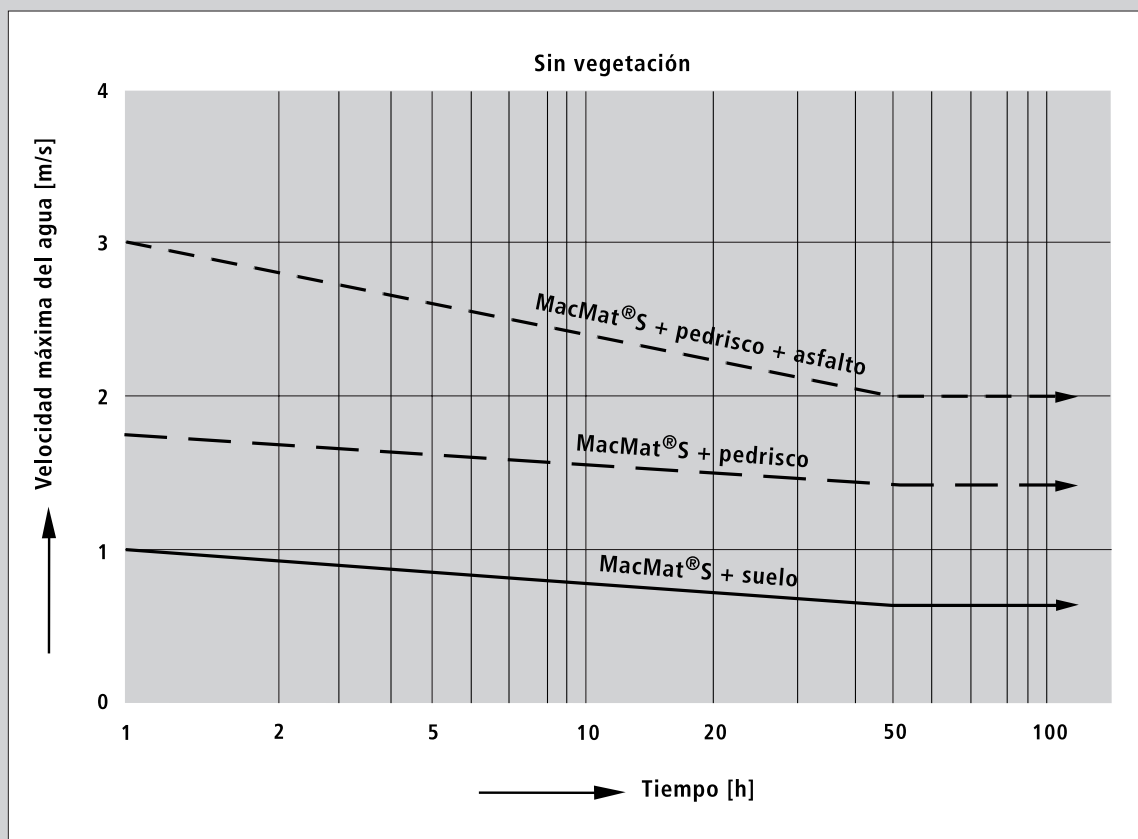


Figura 3.5.5 - Tipos de MacMat® relacionados con la acción del flujo, para situación sin desarrollo de vegetación en el revestimiento.

Es recomendable aplicar sobre el tiempo de duración o sobre las velocidades críticas un factor de seguridad entre 1,2 y 1,5.

Es siempre imprescindible garantizar una buena adherencia entre la geomanta y el suelo. Esto se consigue con la aplicación de un lastre y/o a través de la colocación de estacas que fijen el revestimiento en el suelo, siguiendo las siguientes especificaciones:

- condiciones normales: 1 estaca cada 3 o 4 m²;
- condiciones severas (alta turbulencia): 1 estaca cada 1 m²;
- a lo largo de los solapes: 1 estaca cada metro.

Conforme ya fue informado, la velocidad crítica, para situaciones donde la vegetación no se haya desarrollado, depende del tamaño de los granos y de la cohesión del suelo.

En los últimos años diversos laboratorios han realizado ensayos para establecer la velocidad crítica para revestimientos del tipo MacMat®. En particular fueron realizados ensayos en escala real en el Utah Water Research Laboratory de la Utah State University para las geomantas MacMat®S y MacMat®R en las condiciones sin relleno y vegetadas (figuras 3.5.6 y 3.5.7).



Figura 3.5.6 - Preparación de la prueba realizada con MacMat®R.

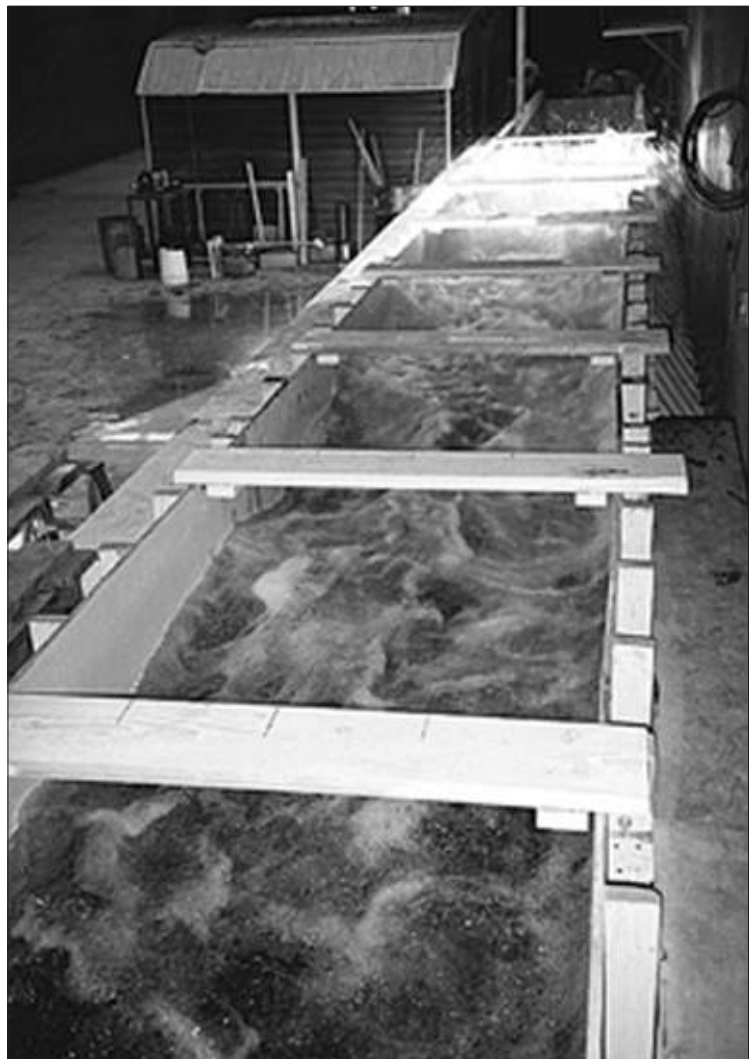


Figura 3.5.7 - Prueba realizada en escala real.

Todos estos ensayos fueron ejecutados con régimen de flujo permanente y uniforme. Este hecho es importante ya que, en general, la acción del flujo es más intensa para situaciones de flujo no uniforme, que es la situación que casi siempre ocurre.

En la práctica, se ha mostrado que el MacMat® puede resistir a velocidades de flujos mayores que las indicadas en laboratorio por cortos períodos de tiempo. La tabla 3.5.1 y el gráfico de la figura 3.5.9 presentan los resultados de velocidad crítica para diversos tipos de revestimientos similares, obtenidos a través de ensayos de laboratorio.

TIPO DE GEOMANTA	V_{cr} [m/s]	REFERENCIA
Geomanta con espesor 10 mm	0,55	Berkhout, 1979
Dos geomantas con espesor 10 mm con 8 kg/m ² de pedrisco de Ø 2 - 6 mm colocado en el medio (tipo sandwich)	1,70	Berkhout, 1986
Geomanta con espesor 10 mm cubierta con 5 kg/m ² de pedrisco de Ø 2 - 6 mm	1,15	Berkhout, 1977
Geomanta con espesor 10 mm cubierta con 10 kg/m ² de pedrisco de Ø 2 - 6 mm	1,20	Delft Hydraulics, 1977
Geomanta con espesor 20 mm	0,75	Berkhout, 1979
Geomanta con espesor 20 mm cubierta con 15 kg/m ² de pedrisco de Ø 2 - 6 mm	1,65	Berkhout, 1979
Geomanta con espesor 10 mm cubierta con pedrisco y emulsión asfáltica	2,50	Berkhout, 1986

Tabla 3.5.1 - Velocidades críticas para revestimiento del tipo MacMat®, para situaciones sin el desarrollo de vegetación en el revestimiento.



Figura 3.5.8 - Estados Unidos.

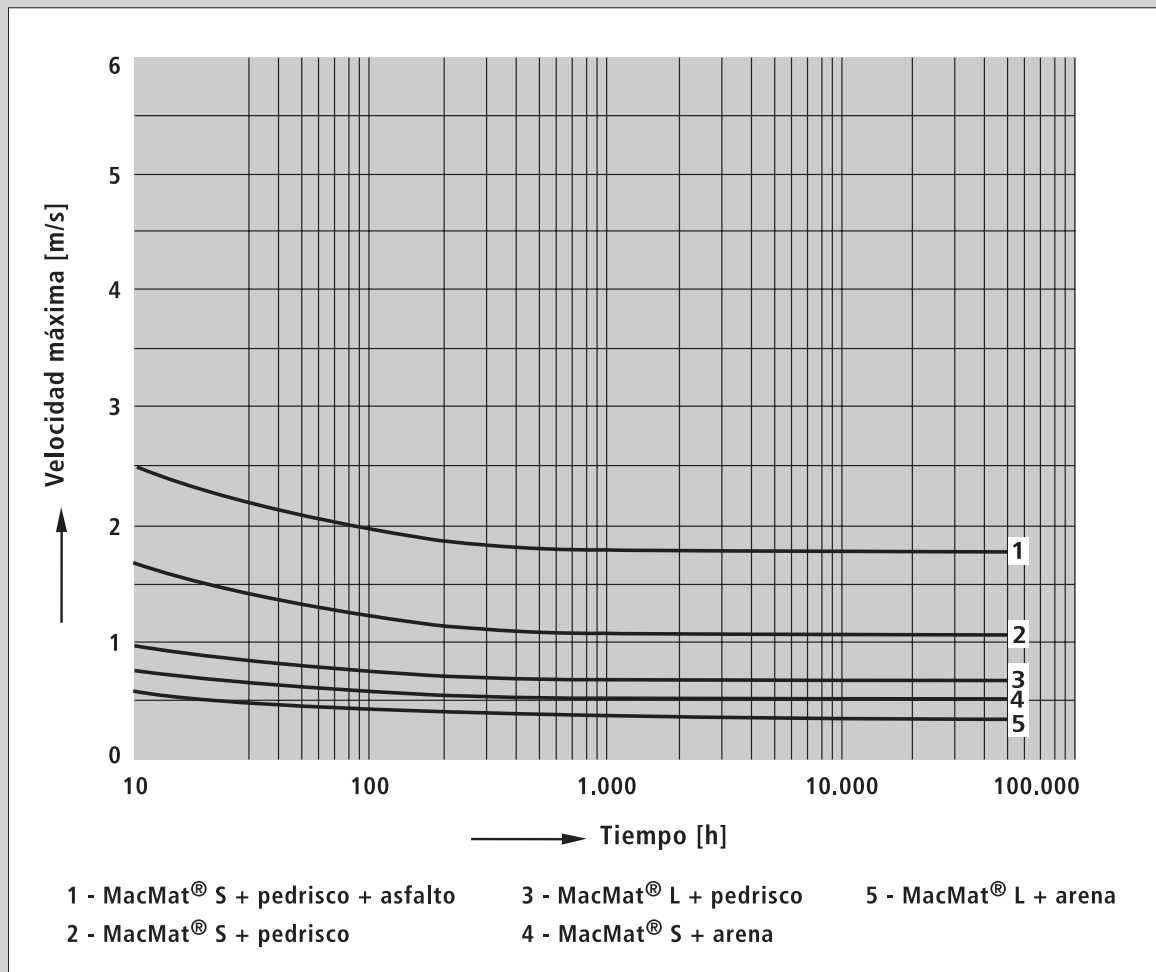


Figura 3.5.9 - Velocidades críticas para revestimiento del tipo MacMat®, para situaciones sin el desarrollo de vegetación en el revestimiento, en función de la duración de la crecida y del material de relleno.

• Revestimiento parcialmente sumergido

Como ya fue explicado, en los casos en que el revestimiento no quede sumergido o quede bajo agua por cortos períodos de tiempo, posibilitando así el desarrollo de vegetación, puede ser utilizada la geomanta sembrada y cubierta con tierra.

Para definir este tipo de revestimiento es por lo tanto necesario evaluar si, entre la instalación y la primera crecida, es garantizado el crecimiento de la vegetación.

La figura 3.5.10 permite escoger según el criterio de la velocidad crítica el tipo más adecuado de revestimiento MacMat® para la condición de vegetación permanente ya establecida.

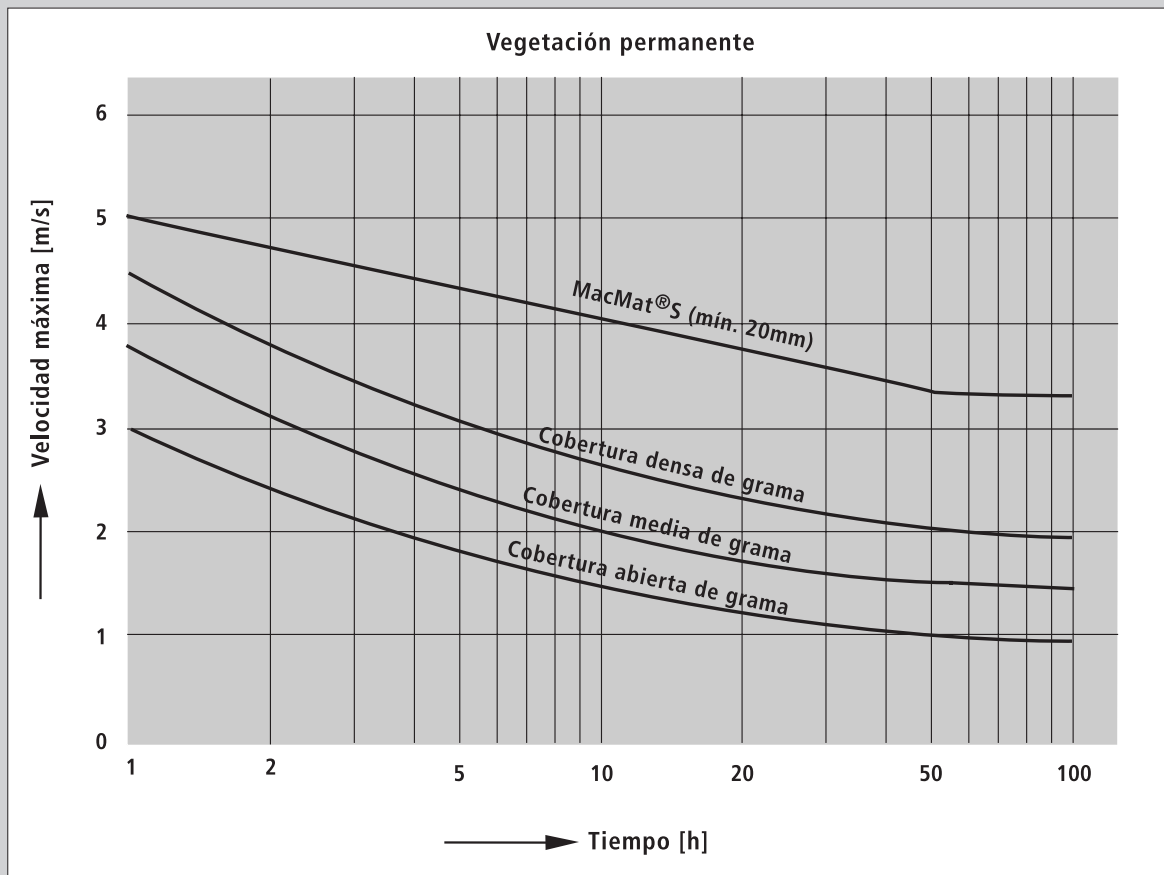


Figura 3.5.10 - Tipo de revestimiento MacMat® en función de la acción del flujo, para la situación de vegetación permanente.

En este caso, el gráfico de la figura 3.5.10 permite definir, para los trechos planos y para el fondo del canal, el tipo de revestimiento estable para las diferentes condiciones de velocidad de la corriente y duración de la crecida, considerando el mayor o menor desarrollo de la vegetación en la geomanta.

Es importante resaltar que, para los casos donde la vegetación es pobre, debe ser aplicado un factor de seguridad de 1,5, mientras que, en los casos donde la vegetación es densa, el coeficiente puede ser de 1,2.

- Revestimiento en las márgenes del canal

En las márgenes los valores encontrados deben ser corregidos en función del ángulo del talud y del ángulo de reposo del terreno, con la ecuación (37):

$$V_m = t \cdot V \quad (37)$$

donde:

V_m : velocidad crítica en la margen;

V : velocidad crítica en el fondo;

t : factor de inclinación.

El factor t es dado por:

$$t = \left(1 - \frac{\sin^2 \alpha}{\sin^2 \psi} \right)^{1/4} \quad (38)$$

donde:

α : ángulo de inclinación del talud;

ψ : ángulo de reposo del terreno.

Conforme ya fue mencionado, en el caso en que el recubrimiento de vegetación sea escaso o nulo, deberá ser aplicado un coeficiente de seguridad de 1,5; en el caso en que el recubrimiento sea bien desarrollado, deberá ser aplicado un coeficiente de seguridad de 1,2.

Estabilidad en términos de tensión de arrastre

No existen investigaciones relacionando directamente la resistencia de las geomantas con la tensión de arrastre del flujo, definiendo su tensión crítica.

Entretanto se puede calcular estas tensiones a partir de estudios desarrollados con relación a la velocidad media del flujo al través de las ecuaciones (15) y (17).

De la ecuación (15) se puede determinar directamente:

$$i = \frac{V^2 \cdot n^2}{R_H^{4/3}} \quad (39)$$

Substituyendo (39) en (17), tenemos:

$$\tau_c = \gamma_w \cdot \frac{V_c^2 \cdot n^2}{R_H^{1/3}} \quad (40)$$

onde:

T_c : tensión de arrastre crítica del material [N/m^2];

γ_w : peso específico del agua [N/m^3];

V_c : velocidad crítica del material [m/s];

R_H : radio hidráulico [m];

n : coeficiente de Manning [$s \cdot m^{1/3}$].

A partir de las condiciones hidráulicas del flujo se conoce o se pueden determinar todos los parámetros usados en la ecuación (40), siendo necesario adoptar una rugosidad para determinar el coeficiente de Manning. De esta forma, es posible determinar el valor de la tensión crítica de arrastre con base en la velocidad crítica.

Experiencias desarrolladas en el Laboratorio de Delft (1977) procuraron determinar la rugosidad absoluta (k_s) de geomantas similares rellenas con pedrisco.

Conociendo esta rugosidad absoluta, para un dado radio hidráulico, es posible calcular una rugosidad equivalente de Manning (n), ya que tanto el valor de k_s cuanto el de n pueden ser escritos a partir del coeficiente de Chezy (C), o sea:

$$C = 18 \cdot \log \left(\frac{12 \cdot R_H}{K_s} \right) \quad (41)$$

$$C = \frac{R_H^{1/6}}{n} \quad (13)$$

Así, queda claro que:

$$n = \frac{R_H^{1/6}}{18 \cdot \log \left(\frac{12 \cdot R_H}{K_s} \right)} \quad (42)$$

A pesar del número de Manning variar con el radio hidráulico (R_H), para valores de R_H entre 0,25 m y 1,50 m, esta variación es pequeña, pudiéndose atribuir un valor medio a este coeficiente.

En los ensayos realizados en Delft con geomantas similares, fueron ensayadas dos situaciones distintas: en la primera, fue considerada apenas la geomanta como revestimiento, obteniendo un valor de $k_s = 0,014$ m; en la segunda, fue considerada la misma geomanta con la adición de pedrisco y recubrimiento de emulsión asfáltica, obteniendo un valor de $k_s = 0,010$ m.

Considerando el radio hidráulico en la faja de 0,25 m a 1,50 m, para los valores de k_s arriba mencionados, se puede adoptar como valores medios de la rugosidad de Manning (sin cometer grandes errores):

$$\begin{aligned} k_s = 0,014 \text{ m} & \Leftrightarrow n \approx 0,019; \\ k_s = 0,010 \text{ m} & \Leftrightarrow n \approx 0,018. \end{aligned}$$

Los gráficos de las figuras 3.5.11 y 3.5.12 presentan los resultados de la tensión crítica considerando las condiciones ensayadas en Delft.

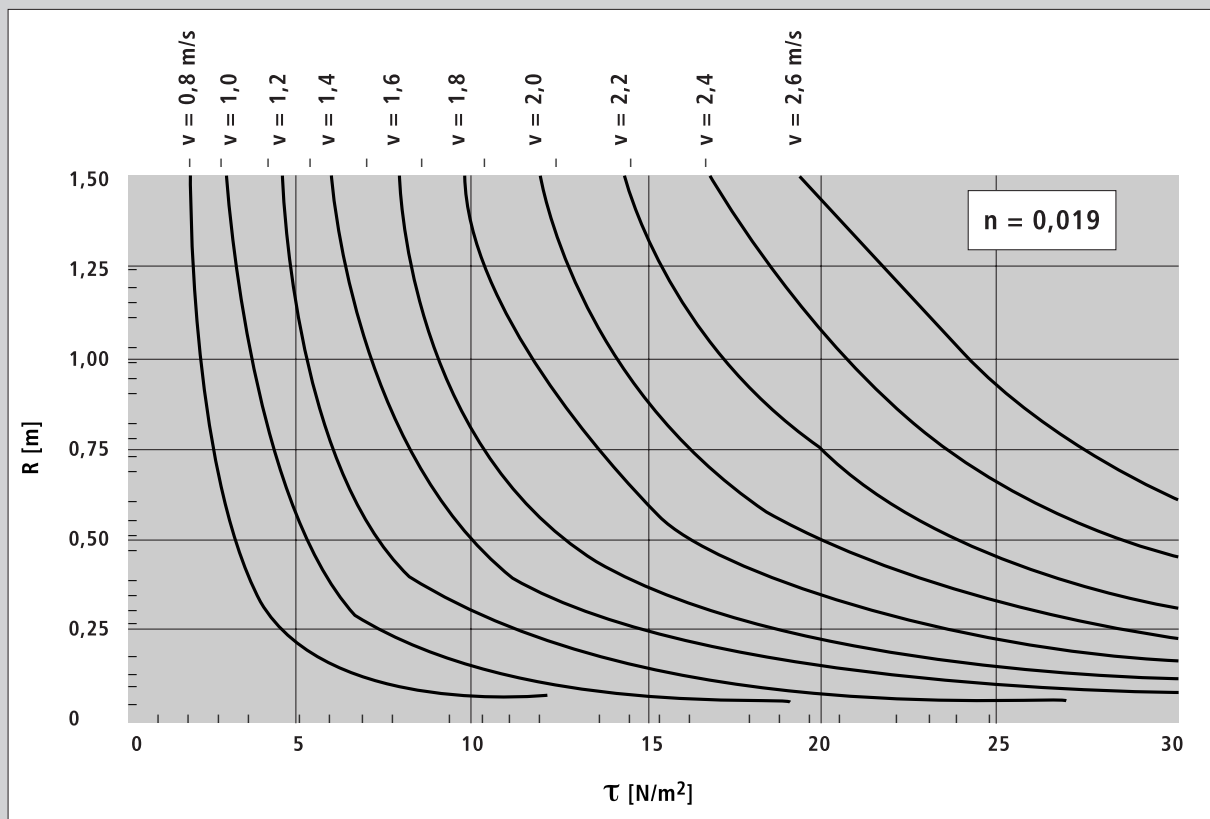


Figura 3.5.11 - Tensión de arrastre crítica en función del radio hidráulico para geomantas de espesor 20 mm.

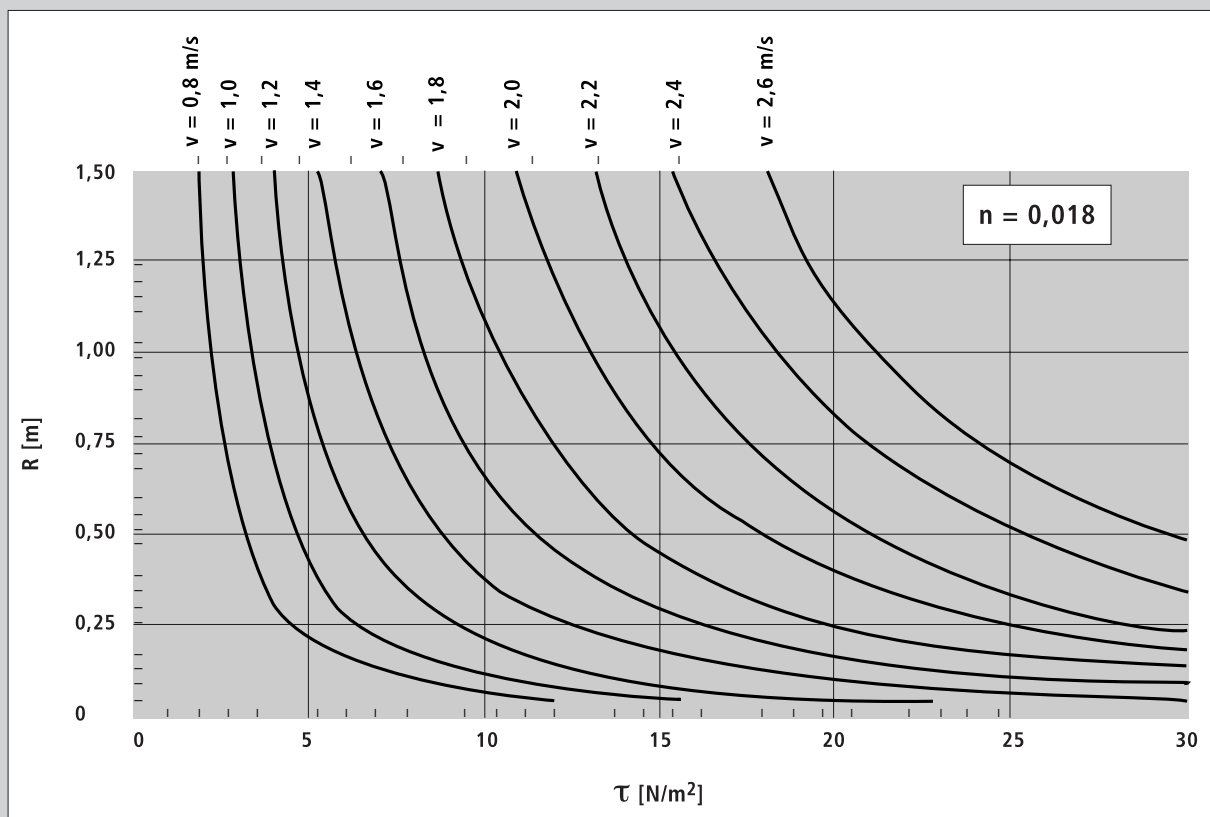


Figura 3.5.12 - Tensión de arrastre crítica en función del radio hidráulico para geomantas cubiertas con pedrisco y emulsión asfáltica.

Estos ensayos experimentales fueron efectuados sin admitir el desarrollo de vegetación. Para el cálculo de la rugosidad según Manning, para superficie con vegetación (gramináceas, grama), se puede utilizar el gráfico de la figura 3.5.13, resultado de ensayos realizados en Utah sobre geomantas MacMat[®], que relaciona el parámetro $V \cdot R_H$ (producto de la velocidad media del flujo por el radio hidráulico) con el coeficiente n en función de la altura de la vegetación.

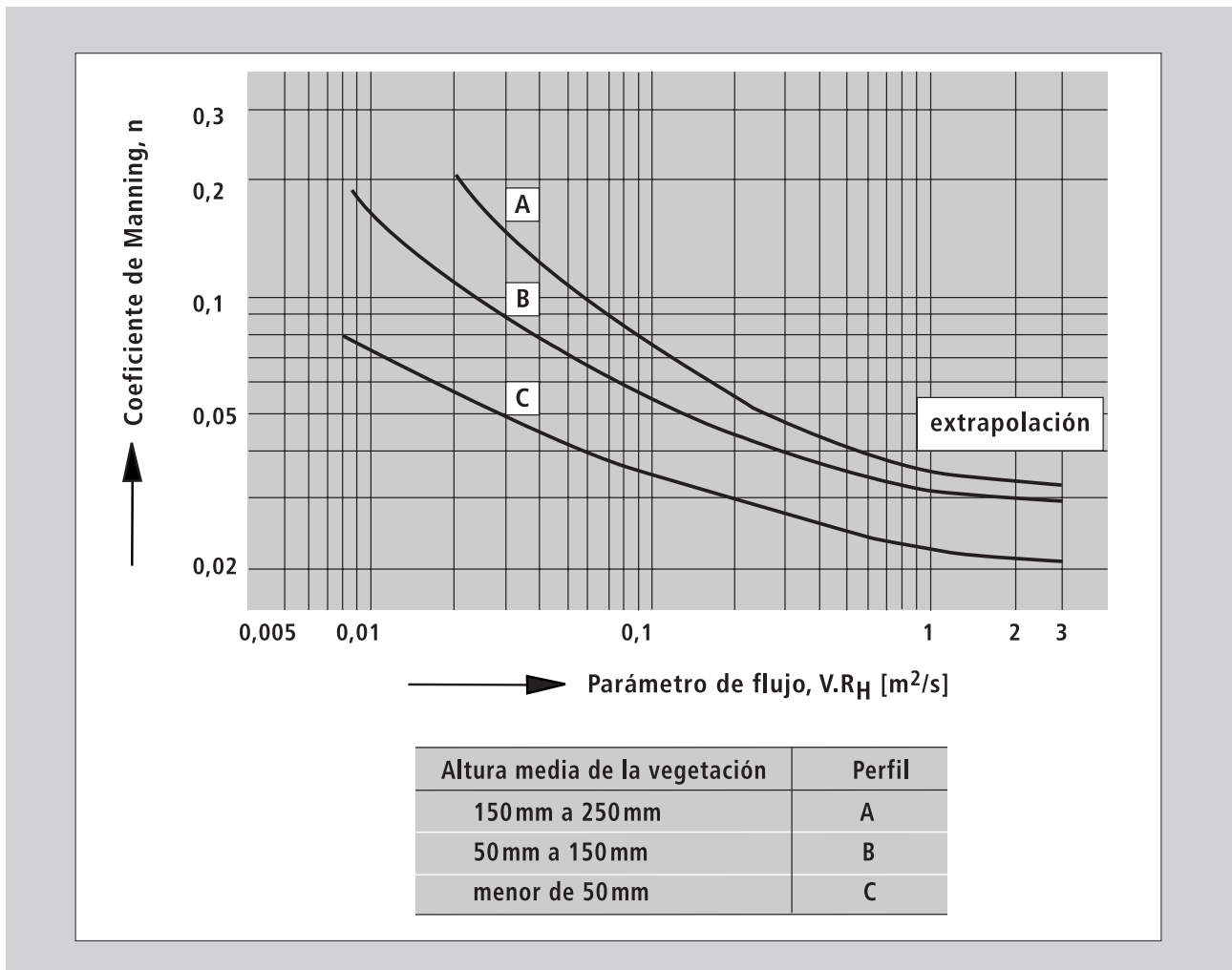


Figura 3.5.13 - Determinación del coeficiente de Manning para revestimientos con cobertura vegetal.

Por lo tanto, para una determinada velocidad y radio hidráulico, se tiene un valor de n para varias alturas de vegetación (grama).

En poder de este valor, se puede calcular la velocidad resultante en función de la geometría de la sección y de la pendiente. Comparando el valor de $V \cdot R_H$ adoptado con el $V \cdot R_H$ calculado, se puede determinar el valor de n por sucesivas iteraciones, corrigiendo el valor de $V \cdot R_H$ a cada paso.

Con el valor de n y $V \cdot R_H$, se calcula la respectiva tensión crítica en el fondo y en los taludes, comparando estos valores con las respectivas tensiones críticas debido a la acción del flujo, que son dadas por las ecuaciones (24) y (25), o sea:

$$\tau_o = K_f \cdot \gamma_w \cdot y \cdot i$$

(24)

$$\tau_m = K_m \cdot \gamma_w \cdot y \cdot i$$

(25)

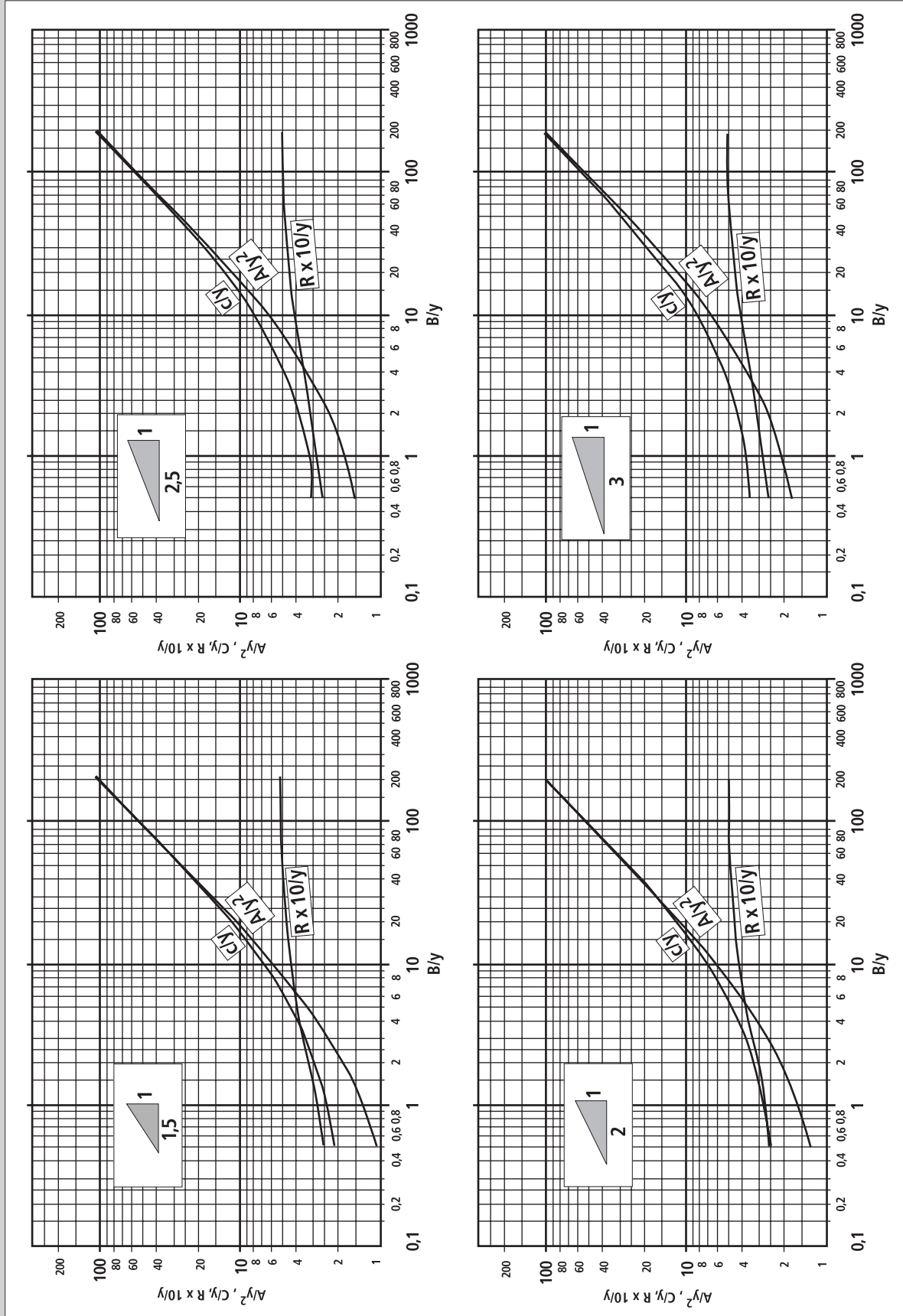
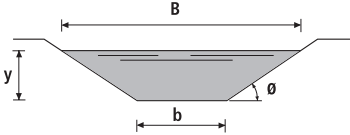
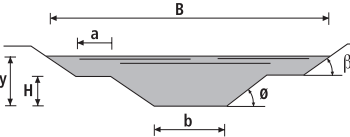
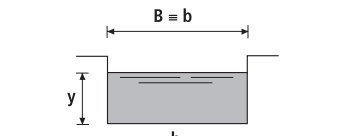
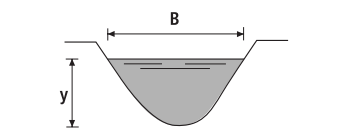
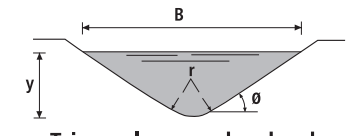
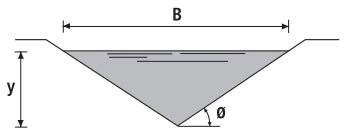


Figura 3.5.14 - Características geométricas e hidráulicas de un canal con sección trapezoidal para algunas inclinaciones de márgenes.

Tabla 3.5.2 - Elementos geométricos-hidráulicos de algunas secciones.

SECCIÓN	ÁREA (A)	PERÍMETRO MOJADO (C)	RADIO HIDRÁULICO (R_H)
 Trapezoidal	$y (b + y \cotg \phi)$	$b + \frac{2y}{\sen \phi}$	$\frac{y (b + y \cotg \phi)}{b + \frac{2y}{\sen \phi}}$
 Doble trapecio	$(b + 2a) \cdot y + y^2 \cotg \phi - 2aH$ (1)	$b + 2a + \frac{2y}{\sen \phi}$ (1)	$\frac{(b + 2a) \cdot y + y^2 \cotg \phi - 2aH}{b + 2a + \frac{2y}{\sen \phi}}$ (1)
 Rectangular	$b y$	$b + 2y$	$\frac{b y}{b + 2y}$ (2)
 Parabólica	$\frac{2}{3} B y$	$B + \frac{8}{3} \frac{y^2}{B}$ (3)	$\frac{2B^2 y}{3B^2 + 8y^2}$ (3)
 Triangular arredondeada en el fondo	$\frac{B^2 \tg \phi}{4} - r^2 \tg \phi + r^2 \phi$ (4)	$\frac{B}{\phi \cos \phi} - 2r \tg \phi + 2r$ (4)	$\frac{\frac{B^2 \tg \phi}{4} - r^2 \tg \phi + r^2 \phi}{\frac{B}{\cos \phi} - 2r \tg \phi + 2r}$ (4)
 Triangular	$y^2 \cdot \cotg \phi$	$\frac{2 y}{\sen \phi}$	$\frac{y}{2} \cos \phi$

(1) En el caso de $\beta = \theta$

(2) Cuando $B \gg y \Rightarrow R \equiv y$

(3) Satisfecha con suficiente aproximación
si $0 < x \leq 1$
donde $x = 4y/B$

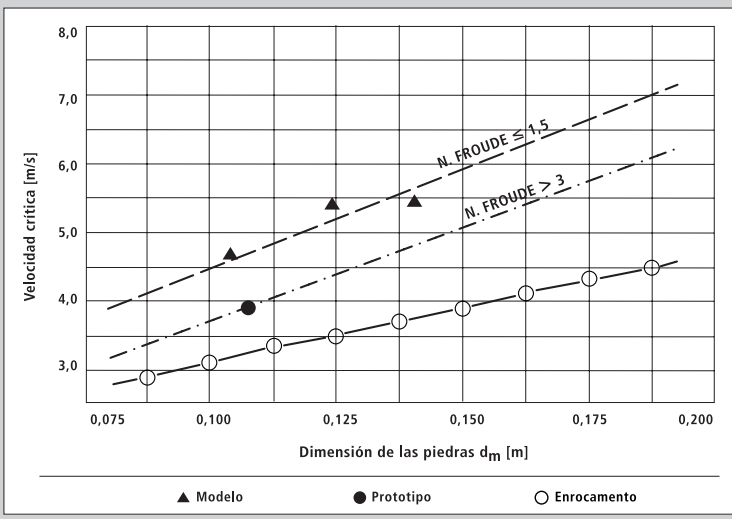
Cuando $x > 1$ se usará la expresión:

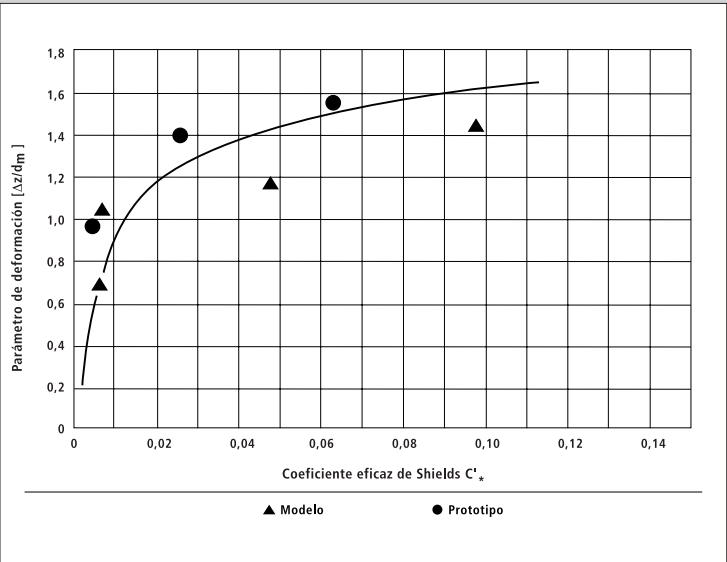
$$C = \frac{B}{2} \left[\sqrt{1 + x^2} + \frac{1}{x} \ln (x + \sqrt{1 + x^2}) \right]$$

(4) θ en radianes.

4. EJEMPLOS DE CÁLCULO PARA COLCHONES RENO®

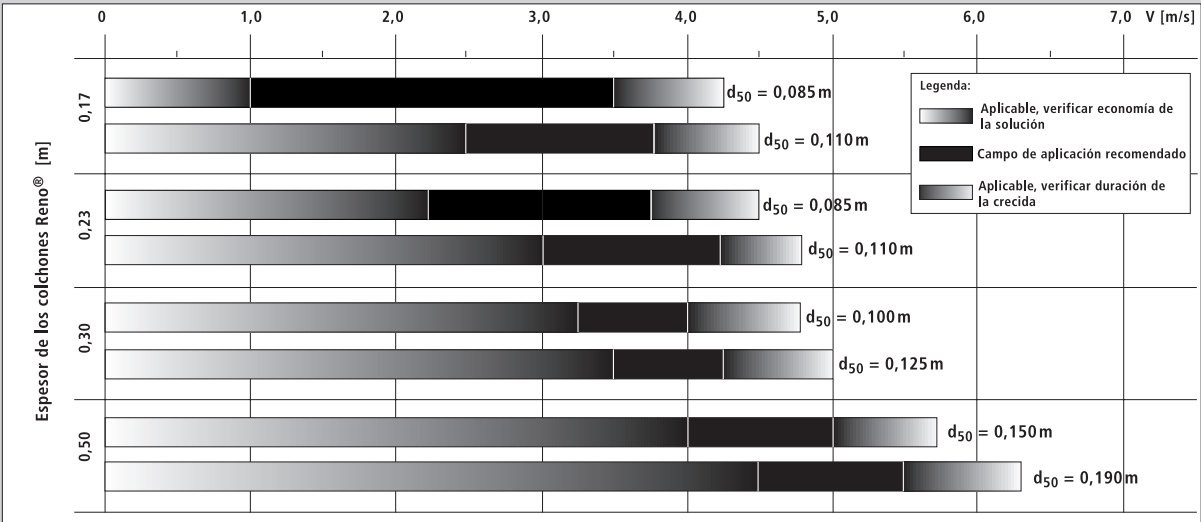
4.1 Secuencia de Cálculo

PASO	VERIFICACIÓN	FÓRMULAS
1	Selección del tipo de colchón Reno®	- Determinar d_{90} y d_{50} (tabla); - Determinar rugosidad $n = \frac{d_{90}^{1/6}}{26}$
2	Criterio de la velocidad crítica	- Ecuación de resistencia al flujo (Manning): $V = \frac{1}{n} \cdot R_H^{2/3} \cdot i^{1/2}$ - Número de Froude: $F = V / \sqrt{g R_H}$; - Determinar V_c en función de F y V de la figura: 
3	Verificación de la tensión de arrastre	- Tensión de arrastre en el fondo: $\tau_b = K_f \cdot \gamma_w \cdot R_H \cdot i$; - Tensión crítica de arrastre: $\tau_c = 0,10 \cdot (\gamma_s - \gamma_w) \cdot d_{50}$; - Condición límite: $\tau_b \leq \tau_c$; - Tensión de arrastre en las márgenes: $\tau_m = K_m \cdot \tau_b$; - Tensión crítica de arrastre en las márgenes: $\tau_s = \tau_c \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \alpha}{\sin^2 \Psi}}$ - Condición límite: $\tau_m \leq \tau_s$.

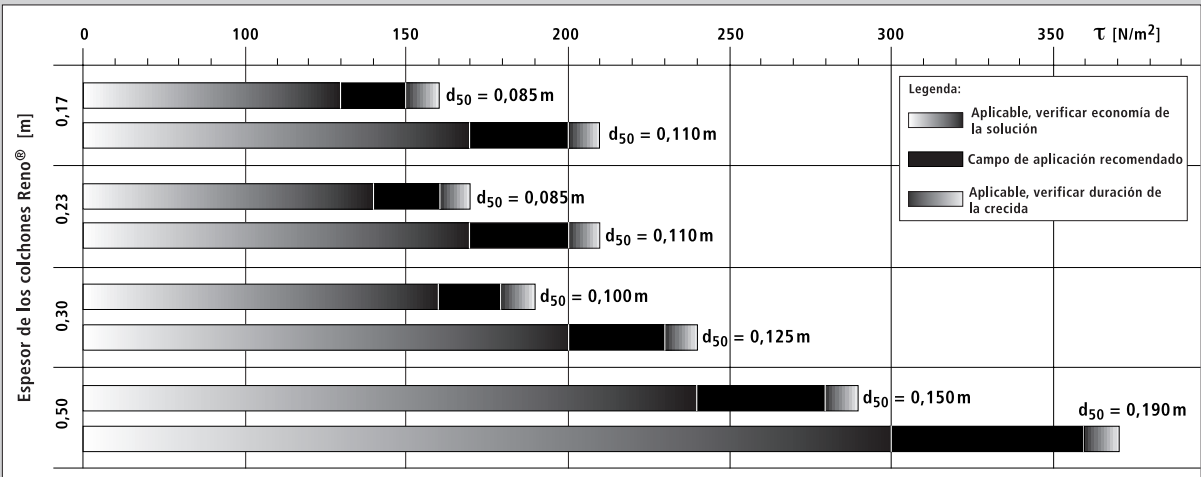
PASO	VERIFICACIÓN	FÓRMULAS
4	Control de las deformaciones	- Determinar los parámetros: $C'_* = \frac{\tau_b - \tau_c}{(\gamma_s - \gamma_w) \cdot d_{50}} \quad y$ $C'_* = \frac{\tau_m - \tau_s}{(\gamma_s - \gamma_w) \cdot d_{50}} \quad \text{para el fondo y margen.}$ - Verificar el parámetro $\Delta z / d_m$ en la figura que sigue: 
5	Verificación en la interfase colchón Reno®/suelo	- Velocidad admisible del material de la base: $V_e = 16,1 \cdot d_{50}^{1/2}$ - Velocidad en el contacto colchón Reno®/suelo: $V_b = \frac{1}{n_f} \left(\frac{d_{50}}{2} \right)^{2/3} \cdot i^{1/2}$ - Adoptar $n_f = 0,02$ si hubiera geotextil o ningún filtro y $n_f = 0,025$ si hubiera filtro de grava; - Velocidad límite $V_b \leq V_e$.

4.2 Cuadros de Selección

Selección con base en el criterio de la velocidad crítica.



Selección con base en el criterio de la tensión crítica.



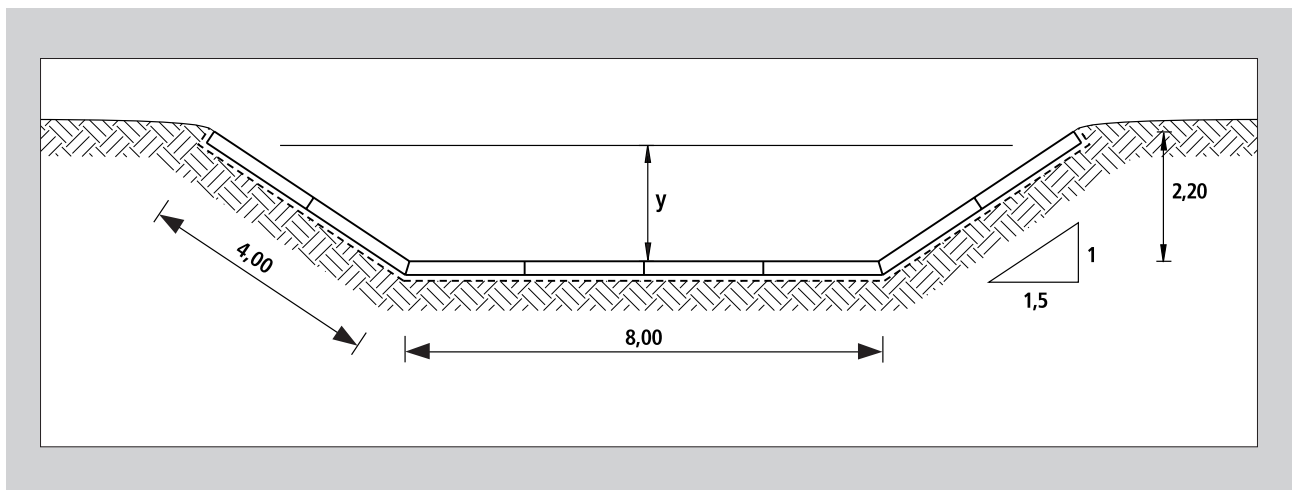
4.3 Ejemplo 1

4.3.1 Datos de entrada:

- pendiente longitudinal del canal: 0,002 m/m;
- sección: trapecial con inclinación de las márgenes de 1:1,5;
- caudal: $35 \text{ m}^3/\text{s}$;
- suelo del fondo: arcilla arenosa, arena < 50% y;
- porcentaje de vacíos: 0,6.

4.3.2 A verificar:

- as pendientes de la sección propuesta;
- tipo de revestimiento propuesto;
- estabilidad del fondo.



4.3.3 Dimensionamiento por el Criterio de la Velocidad Crítica

La granulometría de las piedras disponibles para el llenado de los colchones Reno® es:

$$d_{50} = 85 \text{ mm}$$

$$d_{90} = 95 \text{ mm}$$

Consecuentemente se estima poder usar para el revestimiento de los colchones Reno® una red tipo 6 x 8 producida con alambre de diámetro 2,00 mm (por estar siempre en contacto con el agua el revestimiento será Galfan® + PVC), con $e = 0,17 \text{ m}$ que será verificado (usando los colchones Reno® de dimensiones $4 \times 2 \times 0,17 \text{ m}$, en el fondo serán colocados 4 elementos en sentido longitudinal y en cada orilla un elemento en sentido transversal. En total, tendremos dos colchones Reno® por metro lineal).

El coeficiente de rugosidad n puede ser calculado con la ecuación:

$$n = \frac{d_{90}^{1/6} \cdot 0,095^{1/6}}{26} = \frac{0,0260}{26} = 0,0260$$

El área de la sección transversal, el perímetro mojado y el radio hidráulico, definidos en función de la profundidad, son expresados por las siguientes relaciones (tabla 3.5.2):

$$A = b \cdot y + y^2 \cdot \cotg \varnothing = 8 \cdot y + 1,5 \cdot y^2$$

$$P = b + \frac{2 \cdot y}{\sen \varnothing} = 8 + 3,605 \cdot y$$

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

Con la fórmula de Manning-Strickler, puede ser expreso el caudal Q :

$$Q = \frac{1}{n} \cdot R_H^{2/3} \cdot i^{1/2} \cdot A = \frac{1}{n} \cdot A^{5/3} \cdot P^{-2/3} \cdot i^{1/2} \cdot \frac{Q \cdot n}{i^{1/2}} \Rightarrow \frac{A^{5/3}}{P^{2/3}}$$

Considerando las fórmulas de A , P y R_H mencionadas arriba, la última relación puede ser escrita como:

$$\frac{35 \cdot 0,0260}{0,002^{1/2}} = \frac{(8 \cdot y + 1,5 \cdot y^2)^{5/3}}{(8 + 3,605 \cdot y)^{2/3}} \Rightarrow y = 1,6 \text{ m}$$

En poder del valor de y , se determina:

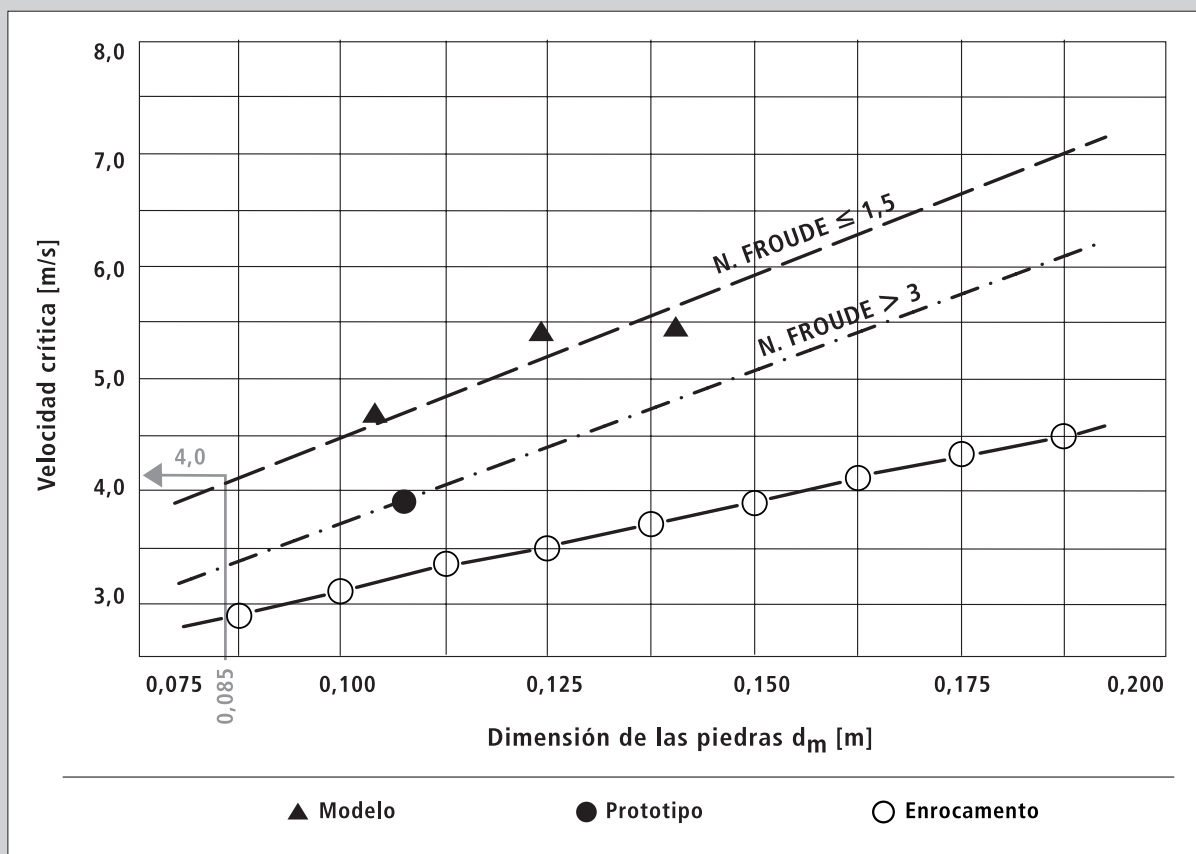
$$\left\{ \begin{array}{l} A = 17,54 \text{ m}^2 \\ P = 14,02 \text{ m} \\ R_H = 1,25 \text{ m} \end{array} \right.$$

$$V = 2,0 \text{ m/s}$$

El número de Froude (Fr) vale entonces:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{\frac{g \cdot A}{P}}} = 0,55$$

El flujo se encuentra en la condición de corriente subcrítica. A partir del gráfico que sigue, se puede determinar la velocidad crítica (V_c).



Siendo $Fr < 1,5$ e $d_{50} = 85$ mm, entonces $V_c \approx 4$ m/s $> V$.

Por lo tanto el revestimiento es estable.

4.3.4 Verificación por el Criterio de la Tensión Crítica

Haciendo la verificación del fondo, en términos de tensión de arrastre, se encuentra:

$$\tau_b = \gamma_w \cdot y \cdot i = 1000 \cdot 1,67 \cdot 0,002 = 3,34 \text{ kgf} / \text{m}^2 = 33,4 \text{ N} / \text{m}^2$$

$$\tau_c = 0,10 \cdot (\gamma_s - \gamma_w) \cdot d_{50} = 0,10 \cdot (2400 - 1000) \cdot 0,085 = 11,9 \text{ kgf} / \text{m}^2 = 119 \text{ N} / \text{m}^2$$

Siendo entonces $\tau_b < \tau_c$, el revestimiento es estable, no produciendo el movimiento de las piedras contenidas en los colchones Reno®.

Haciendo la misma verificación para las márgenes, se encuentra:

$$\tau_m = 0,75 \cdot \tau_b = 0,75 \cdot 3,34 = 2,5 \text{ kgf} / \text{m}^2 = 25 \text{ N} / \text{m}^2$$

$$\tau_s = \left(1 - \frac{\sin^2 \alpha}{\sin^2 41^\circ}\right)^{1/2} \cdot \tau_c = \left(1 - \frac{\sin^2 33,7^\circ}{\sin^2 41^\circ}\right)^{1/2} \cdot 11,9 = 6,35 \text{ kgf} / \text{m}^2 = 63,5 \text{ N} / \text{m}^2$$

Siendo $\tau_m < \tau_s$ el revestimiento también es estable en las márgenes.

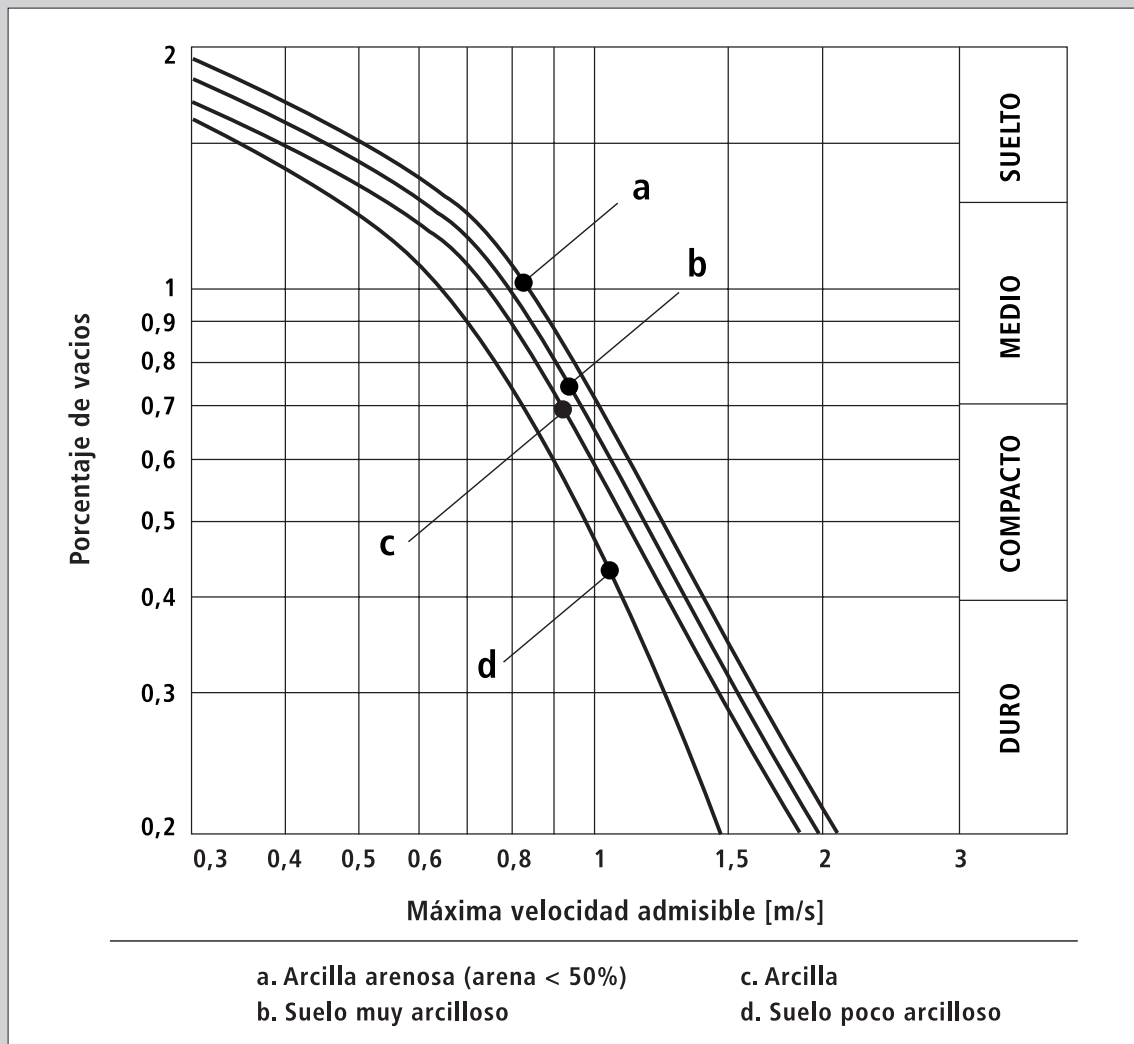
Siendo que ambas condiciones son satisfechas abundantemente, no es necesario hacer el cálculo de las deformaciones para caudales de crecida superiores a la de diseño.

4.3.5 Verificación de la Velocidad debajo del Colchón Reno®

La velocidad por debajo del colchón Reno® (V_b) es calculada con la fórmula:

$$V_b = \frac{1}{n_f} \left(\frac{d_{50}}{2} \right)^{2/3} i^{1/2} = \frac{1}{0,02} \cdot \left(\frac{0,085}{2} \right)^{2/3} \cdot (0,02)^{1/2} = 0,27 \text{ m/s}$$

La velocidad admisible del suelo puede ser determinada a través del gráfico:



Del gráfico, $V_e \approx 1,1 \text{ m/s}$.

Siendo $V_b < V_e$ no es necesario un filtro.

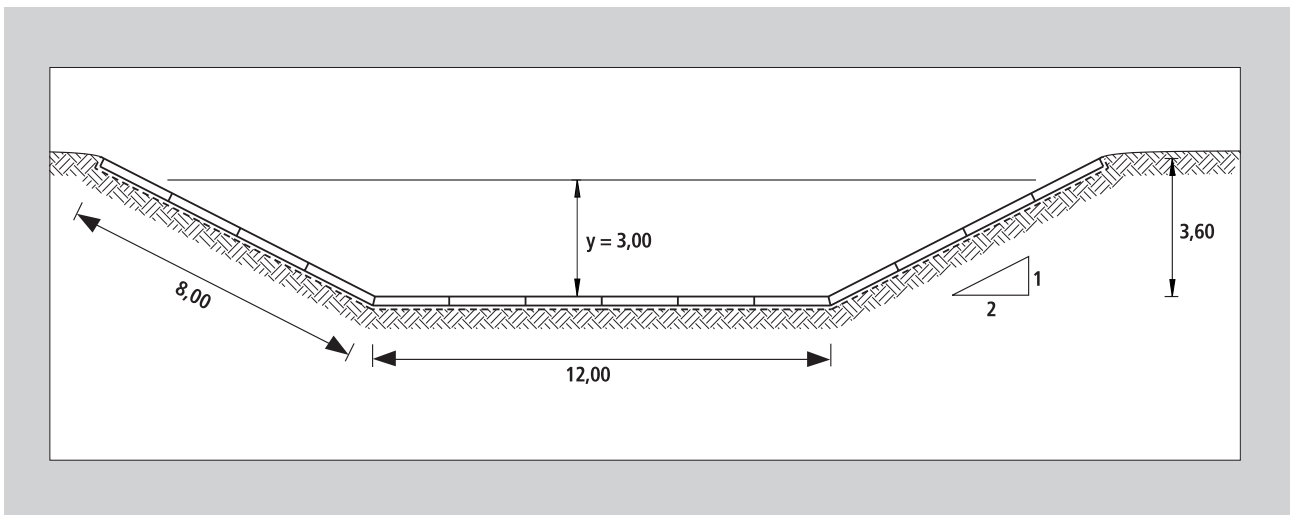
4.4 Ejemplo 2

4.4.1 Datos de entrada:

- pendiente longitudinal del canal: 0,008 m/m;
- sección: trapecial con inclinación de las márgenes de 1:2;
- profundidad del agua: 3 m;
- suelo del fondo: arena con $d_{50} = 0,5 \text{ mm}$.

4.4.2 A verificar:

- las dimensiones de la sección propuesta;
- tipo de revestimiento propuesto;
- estabilidad del fondo;
- alternativa en rip-rap.



4.4.3 Dimensionamiento por el Criterio de la Velocidad Crítica

La granulometría de las piedras disponibles para el llenado de los colchones Reno® es:

$$d_{50} = 140 \text{ mm}$$

$$d_{90} = 170 \text{ mm}$$

Consecuentemente se estima poder usar para el revestimiento colchones Reno® en malla tipo 6 x 8, producida con alambre de diámetro 2,00 mm (por estar siempre en contacto con el agua el revestimiento será Galfan® + PVC), con $e = 0,30 \text{ m}$ que será verificado (usando los colchones Reno® de dimensiones 4 x 2 x 0,30 m, en el fondo serán colocados 6 elementos en sentido longitudinal y, en cada orilla, 2 elementos en sentido transversal. En total, 3.5 colchones Reno® por metro lineal).

El coeficiente de rugosidad n puede ser calculado con la ecuación:

$$n = \frac{d_{90}^{1/6}}{26} = \frac{0,170^{1/6}}{26} = 0,0286$$

El área de la sección transversal, el perímetro mojado y el radio hidráulico, definidos en función de la profundidad, son expresados por las siguientes relaciones:

$$A = b \cdot y + y^2 \cdot \cotg \varnothing = 12 \cdot 3 + 3^2 \cdot 2 = 54 \text{ m}^2$$

$$P = b + \frac{2 \cdot y}{\sen \varnothing} = 12 + \frac{2 \cdot 3}{0,447} = 25,42 \text{ m}$$

$$R_H = \frac{A}{P} = 2,124 \text{ m}$$

El ancho de la superficie libre del agua es calculada por:

$$B = b + 2 \cdot y \cdot \cotg \varnothing = 12 + 2 \cdot 3 \cdot 2 = 24 \text{ m}$$

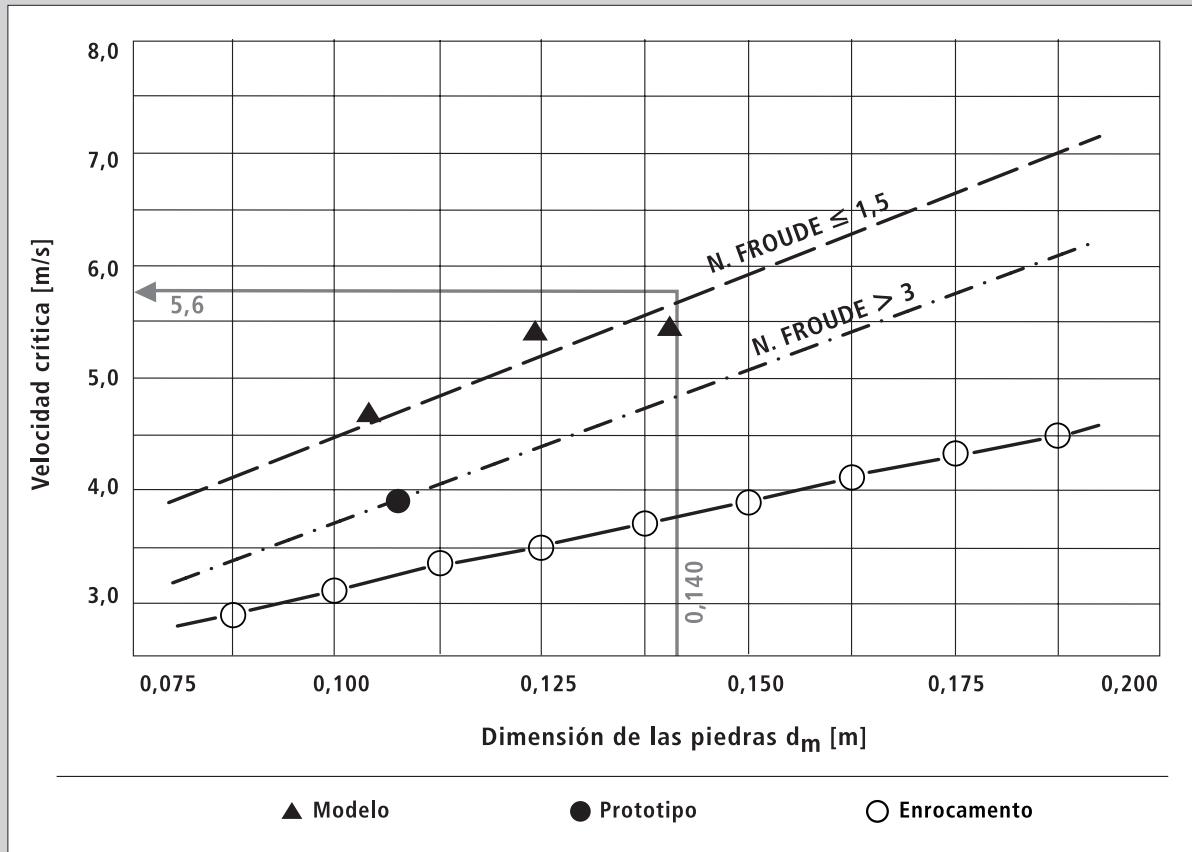
La velocidad (V), el caudal (Q) y el número de Froude (Fr) pueden ser calculados con las siguientes fórmulas:

$$V_{\text{m/s}} = \frac{1}{n} \cdot R_H^{2/3} \cdot i^{1/2} = \frac{1}{0,0286} \cdot 2,124^{2/3} \cdot 0,008^{1/2} = 5,17$$

$$Q = V \cdot A = 5,17 \cdot 54 = 279 \text{ m}^3 / \text{s}$$

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{\frac{g \cdot A}{P}}} = \frac{5,17}{\sqrt{\frac{9,81 \cdot 54}{24}}} = 1,10$$

A partir del gráfico que sigue, es posible determinar la velocidad crítica (V_c).



Siendo $Fr < 1,5$ y $d_{50} = 140$ mm, entonces $V_c \approx 5,6$ m/s $> V$.

Por lo tanto el revestimiento es estable.

4.4.4 Verificación por el Criterio de la Tensión Crítica

Haciendo la verificación del fondo, en términos de tensión de arrastre, se encuentra:

$$\tau_b = \gamma_w \cdot y \cdot i = 1000 \cdot 3 \cdot 0,008 = 24 \text{ kgf / m}^2 = 240 \text{ N / m}^2$$

Considerando el peso específico de las piedras del terreno $\gamma_s = 2500 \text{ kgf/m}^2$, la tensión de arrastre en el fondo vale:

$$\tau_c = 0,10 \cdot (\gamma_s - \gamma_w) \cdot d_{50} = 0,10 \cdot (2500-1000) \cdot 0,14 = 21 \text{ kgf / m}^2 = 210 \text{ N / m}^2$$

De la misma forma para las márgenes:

$$\tau_m = 0,75 \cdot \tau_b = 0,75 \cdot 24 = 18 \text{ kgf / m}^2 = 180 \text{ N / m}^2$$

$$\tau_s = \left(1 - \frac{\sin^2 \alpha}{\sin^2 41^\circ}\right)^{1/2} \cdot \tau_c = \left(1 - \frac{\sin^2 265^\circ}{\sin^2 41^\circ}\right)^{1/2} \cdot 21 = 15,4 \text{ kgf / m}^2 = 154 \text{ N / m}^2$$

Por ser $\tau_b > \tau_c$, siendo la diferencia menor de 20%, y $\tau_m > \tau_s$, siendo también la diferencia menor de 20%, el revestimiento es estable pudiendo ser esperados pequeños movimientos de las piedras contenidas en los colchones Reno®.

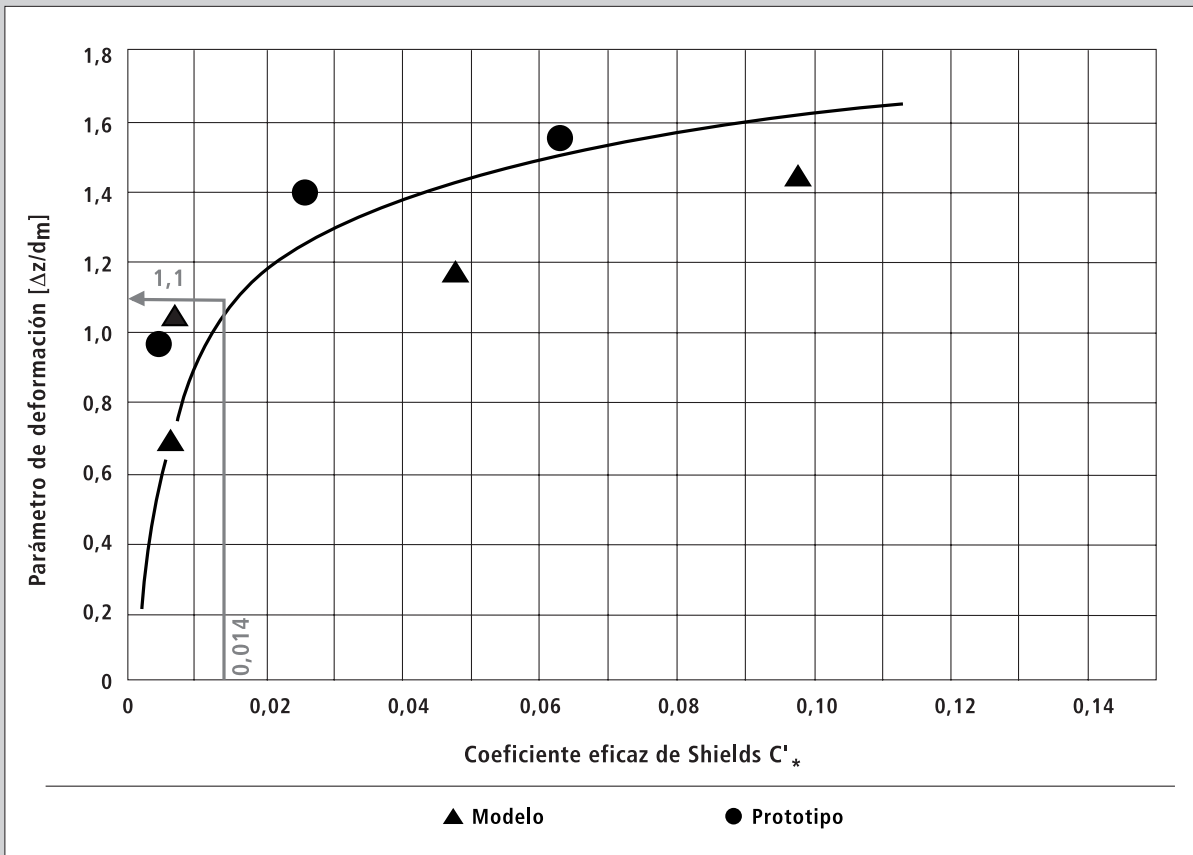
Las deformaciones del revestimiento en el fondo pueden ser evaluadas calculando el coeficiente:

$$C'_* = \frac{(\tau_b - \tau_c)}{(\gamma_s - \gamma_w) \cdot d_{50}} = \frac{24-21}{(2500-1000) \cdot 0,14} = 0,014$$

De la misma forma, para el revestimiento de las márgenes:

$$C'_* = \frac{(\tau_m - \tau_s)}{(\gamma_s - \gamma_w) \cdot d_{50}} = \frac{18 - 15,4}{(2500-1000) \cdot 0,14} = 0,012$$

Del gráfico que sigue se puede determinar:



Considerando que el coeficiente de Shields $C'_* = 0,014$ es el mayor entre los dos valores encontrados (fondo y margen), tenemos:

$$C'_* = 0,014 \Rightarrow \frac{\Delta z}{d_{50}} \approx 1,1$$

Y así:

$$\Delta z = 1,1 \cdot 0,14 = 0,15m$$

Lo cual significa que dentro del colchón Reno®, el espesor de las piedras se reducirá, aguas arriba, de $\frac{\Delta z}{2} = 0,077m$, reduciéndose por lo tanto a $0,30 - 0,077 = 0,22m$.

Este espesor, siendo mayor que el d_{50} es suficiente para no exponer el material del fondo a la acción erosiva de la corriente.

4.4.5 Verificación de la Velocidad debajo del Colchón Reno®

La velocidad por debajo del colchón Reno® (V_b) es calculada con la fórmula:

$$V_b = \frac{1}{n_f} \cdot \left(\frac{d_{50}}{2} \right)^{2/3} \cdot i^{1/2} = \frac{1}{0,02} \cdot \left(\frac{0,14}{2} \right)^{2/3} \cdot (0,008)^{1/2} = 0,76 \text{ m/s}$$

La velocidad admisible del suelo, tratándose de terreno arenoso, puede ser encontrada con el auxilio de la ecuación:

$$V_e = 16,1 \cdot d_{50}^{1/2} = 16,1 \cdot 0,0005^{1/2} = 0,36 \text{ m/s}$$

Por lo tanto la velocidad $V_b > V_e$.

En este caso se debe colocar un filtro geotextil que reduce aproximadamente 50% la velocidad residual en la superficie inferior en contacto con el suelo, eventualmente con la adición de una pequeña camada de material arenoso.

Alternativamente puede ser previsto un filtro natural de material arenoso.

4.4.6 Alternativa en Rip-Rap

Vamos dimensionar un revestimiento en piedras sueltas, manteniendo las mismas hipótesis y para el mismo caudal calculado ($Q=279 \text{ m}^3/\text{s}$).

Serán empleadas piedras de tamaño 350 - 500 mm, con $d_{50} = 400 \text{ mm}$ y $d_{90} = 480 \text{ mm}$.

El espesor del revestimiento (t) será:

$$t = 2 \cdot d_{50} = 0,80 \text{ m}$$

El coeficiente de rugosidad (n) será:

$$n = \frac{d_{90}^{1/6}}{26} = 0,034$$

La profundidad del agua, el área de la sección mojada, el perímetro mojado, el radio hidráulico y la velocidad media del flujo, comparativamente con la alternativa en colchón Reno® será:

	RIP-RAP	COLCHÓN RENO®
y [m]	3,29	3
A [m ²]	61,12	54
P [m]	26,72	25,42
R _H [m]	2,288	2,124
v [m]	4,57	5,17
Q [m ³ /s]	279	279

Las tensiones de arrastre debido a la acción del flujo y admisible, para el fondo, son:

$$\tau_b = \gamma_w \cdot y \cdot i = 1000 \cdot 3,29 \cdot 0,008 = 26,32 \text{ kgf / m}^2 = 263,32 \text{ N / m}^2$$

$$\tau_c = C^* \cdot (\gamma_s - \gamma_w) \cdot d_{50} = 0,047 \cdot 1500 \cdot 0,40 = 28,2 \text{ kgf / m}^2 = 282 \text{ N / m}^2$$

Las tensiones de arrastre debido a la acción de la corriente y admisible, para las márgenes son:

$$\tau_m = 0,75 \cdot \tau_b = 0,75 \cdot 28,32 = 19,74 \text{ kgf / m}^2 = 197,4 \text{ N / m}^2$$

$$\tau_s = \left(1 - \frac{\sin^2 \alpha}{\sin^2 41^\circ}\right)^{1/2} \cdot \tau_c = 20,67 \text{ kgf / m}^2 = 206,7 \text{ N / m}^2$$

Así, $\tau_b < \tau_c$ y $\tau_m < \tau_s$. Por lo tanto, se concluye que la protección es estable tanto para el fondo cuanto para las márgenes.

La velocidad del agua por debajo del rip-rap vale:

$$V_b = \frac{1}{n_f} \cdot v \cdot \left(\frac{d_{50}}{\sqrt{2}}\right)^{2/3} \cdot i^{1/2} = \frac{1}{0,025} \cdot \left(\frac{0,40}{2}\right)^{2/3} \cdot (0,008)^{1/2} = 1,22 \text{ m/s}$$

Recordando que $V_e \approx 0,36 \text{ m/s}$, se tiene que $V_b \approx 4 \cdot V_e$. Por lo tanto, es necesario prever un filtro de material arenoso.

5. EJEMPLOS DE CÁLCULO PARA GEOMANTAS

5.1 Secuencia de Cálculo

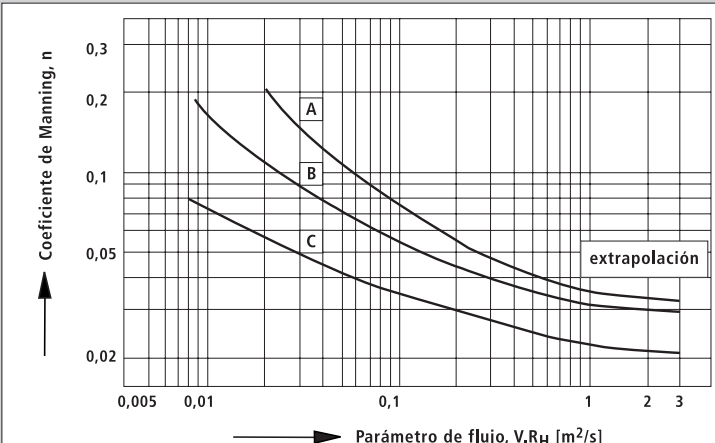
5.1.1 Situación de Revestimiento sin el Desarrollo de la Vegetación

PASO	VERIFICACIÓN	FÓRMULAS
1	Selección del tipo de geomanta	• Escoger un tipo de MacMat®; • Determinar la rugosidad n (resultante de ensayos).
2	Criterio de la velocidad crítica	• Determinar la velocidad en el fondo (Manning): $V_{\text{fondo}} = \frac{1}{n} \cdot R_H^{2/3} \cdot i^{1/2}$ • Determinar la velocidad en las márgenes: $V_{\text{margen}} = \left(1 - \frac{\sin^2 \alpha}{\sin^2 \Psi} \right)^{1/4} \cdot V_{\text{fondo}}$ • Determinar V_c (tablas o gráficos); • Condición límite: $V \leq V_c$; • En el caso que no atienda la condición, escoger otro tipo de geomanta MacMat® y repetir el procedimiento.



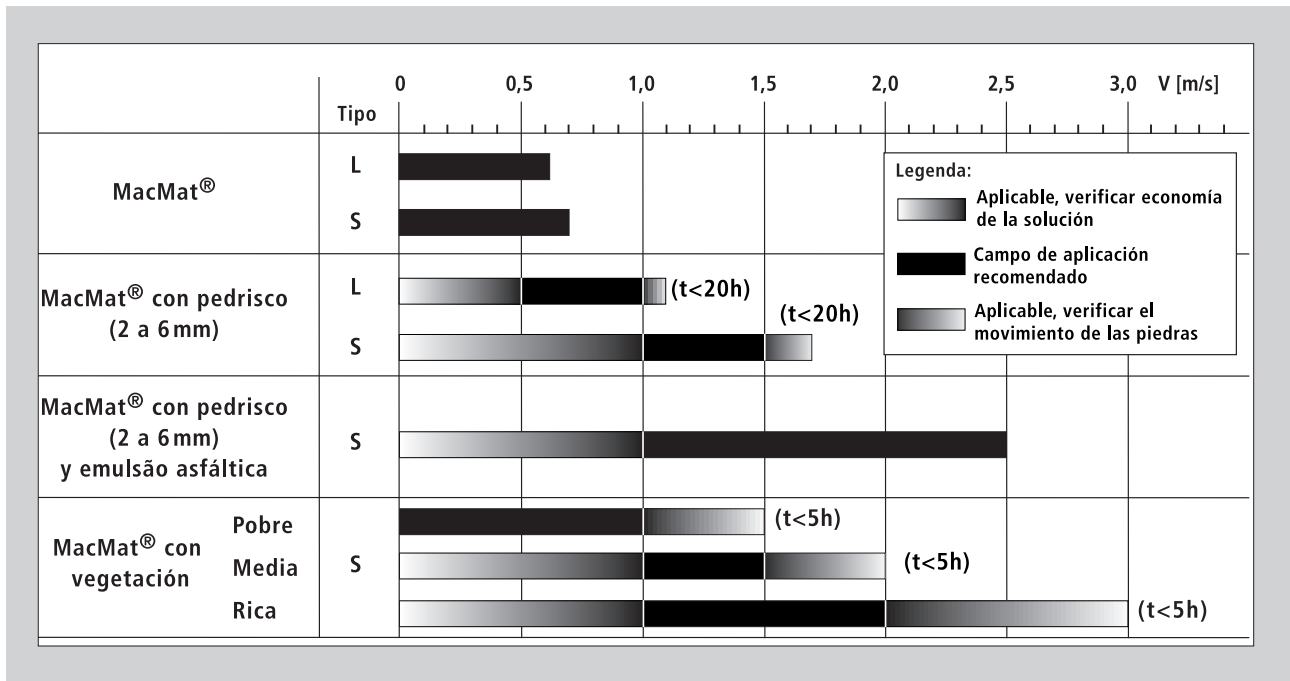
Figura 5.1.1 - Holanda.

5.1.2 Situación de Revestimiento con el Desarrollo de la Vegetación

PASO	VERIFICACIÓN	FÓRMULAS								
1	Selección del tipo de geomanta	• Escoger un tipo de crecimiento de la vegetación esperado y atribuir a esta condición un valor para la rugosidad (n).								
2	Criterio de la velocidad crítica	• Determinar la velocidad en el fondo (Manning): $V_{\text{fondo}} = \frac{1}{n} \cdot R_H^{2/3} \cdot i^{1/2}$ • Determinar la velocidad en las márgenes: $V_{\text{margen}} = \left(1 - \frac{\text{sen}^2 \alpha}{\text{sen}^2 \Psi} \right)^{1/4} \cdot V_{\text{fondo}}$ • Determinar V_C (tablas o gráficos); • Condición límite: $V \leq V_C$; • En el caso que no atienda la condición, debe ser verificado si el valor atribuido a n es razonable, a través de $V \cdot R_H$ y del gráfico de la figura 3.5.13; <table data-bbox="893 1856 1262 1973"><tr><th>Altura media de la vegetación</th><th>Perfil</th></tr><tr><td>150 mm a 250 mm</td><td>A</td></tr><tr><td>50 mm a 150 mm</td><td>B</td></tr><tr><td>menor de 50 mm</td><td>C</td></tr></table>	Altura media de la vegetación	Perfil	150 mm a 250 mm	A	50 mm a 150 mm	B	menor de 50 mm	C
Altura media de la vegetación	Perfil									
150 mm a 250 mm	A									
50 mm a 150 mm	B									
menor de 50 mm	C									
		• En el caso que el valor sea muy diferente, es necesario repetir el procedimiento adoptando el nuevo valor de n.								

5.2 Cuadros de Selección

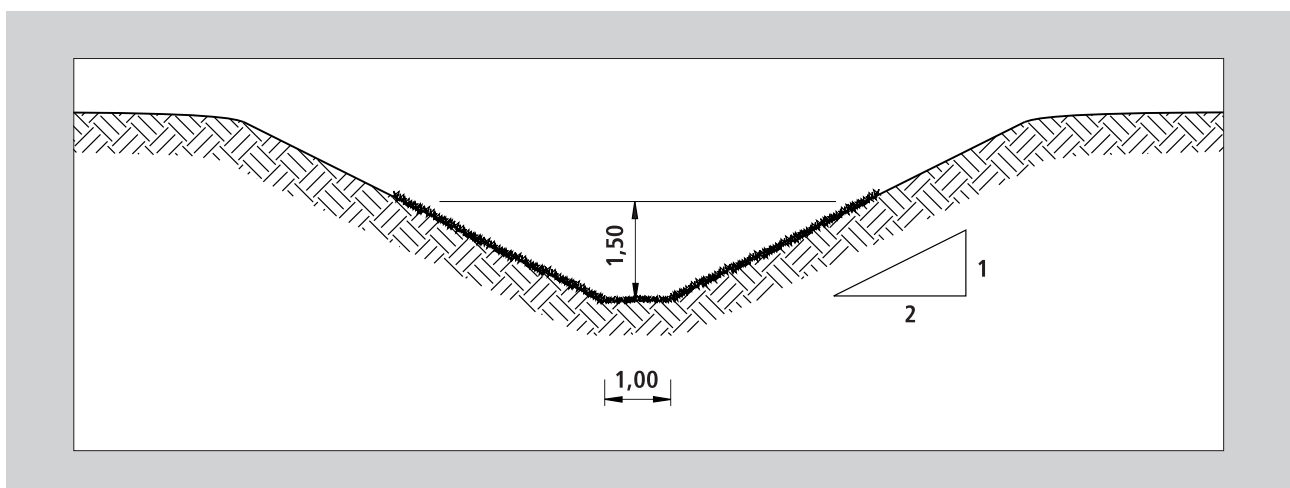
Selección con base en el criterio de la velocidad crítica.



5.3 Ejemplo 1

5.3.1 Datos de Entrada:

Dada la siguiente sección transversal:



Datos:

- pendiente longitudinal del canal 0,001 m/m;
- ángulo de fricción interno del material constituyente del revestimiento: 45°;
- inclinación del talud: 1:2;
- profundidad del flujo: 1,5 m.

5.3.2 Determinación de la Rugosidad

Admitiendo el revestimiento con la geomanta MacMat® de 20 mm, llenada con pedrisco de 2 a 6 mm, se tiene, a través de los ensayos de Delft:

$$n \approx 0,020$$

5.3.3 Cálculo de la Velocidad del Flujo

El área mojada de la sección transversal, el perímetro mojado y el radio hidráulico valen respectivamente:

$$A = \frac{(7 + 1) \cdot 1,5}{2} = 6 \text{ m}^2$$

$$P = 2 \cdot \sqrt{3^2 + 1,5^2} + 1 = 7,71 \text{ m}$$

$$R_H = \frac{A}{P} = \frac{6}{7,71} = 0,778 \text{ m}$$

Por lo tanto la velocidad del flujo en el fondo vale:

$$V_{\text{fondo}} = \frac{1}{n} \cdot R_H^{2/3} \cdot i^{1/2} \cdot \frac{1}{0,02} \cdot (0,778)^{2/3} \cdot (0,001)^{1/2} \Rightarrow V_{\text{fondo}} = 1,34$$

Adoptando el coeficiente de seguridad de 1.2 (debido a la presencia de la vegetación):

$$V_{\text{fondo}} = 1,2 \cdot 1,34 = 1,60 \text{ m/s}$$

Para las márgenes:

$$V_{\text{margen}} = t \cdot V_{\text{fondo}} = \left(1 - \frac{\sin^2 \alpha}{\sin^2 \psi}\right)^{1/4} \cdot V_{\text{fondo}} = 0,73 \cdot 1,60 \Rightarrow V_{\text{margen}} = 1,17 \text{ m/s}$$

5.3.4 Velocidad Crítica

Por el cuadro presentado en el ítem 5.2, para el MacMat® de 20 mm llenado con pedrisco de 2 mm a 6 mm, la velocidad crítica es de 1,50 m/s. Si la velocidad del flujo estuviera entre 1,50 m/s e 1,65 m/s, la geomanta también resistirá, siempre que la duración de la crecida sea inferior a 20 horas. Considerando esta última situación, el revestimiento es estable tanto para el fondo como para las márgenes.

5.4 Ejemplo 2

5.4.1 Datos de Entrada:

Se consideran a los mismos del ejercicio 5.3, variando apenas la pendiente longitudinal del canal, que longitudinal do canal, pasa a ser de 0,002 m/m.

5.4.2 Determinación de la Rugosidad

Inicialmente consideraremos la misma solución utilizada en el ejercicio 5.3 con MacMat® de 20 mm llenada con pedrisco de 2 mm a 6 mm. Por lo tanto $n \approx 0,020$.

En el caso que esta solución no sea viable, es posible pensar en utilizar MacMat® con emulsión asfáltica, adoptando el mismo valor para la rugosidad.

Otra alternativa que podría ser tomada en consideración es aquella en que hubiera desarrollo de la vegetación en el revestimiento. En este caso, si tuviéramos grama con altura de entre 50 mm a 150 mm, podría ser adoptado $n \approx 0,035$.

Como fue indicado en el ítem 5.1.2, este valor de la rugosidad debe ser confirmado al final del cálculo, en el caso de revestimiento con desarrollo de la vegetación.

5.4.3 Análisis de la Estabilidad por la Velocidad Crítica

Sin en desarrollo de la vegetación

El área mojada de la sección transversal, el perímetro mojado y el radio hidráulico valen respectivamente:

$$A = \frac{(7 + 1) \cdot 1,5}{2} = 6 \text{ m}^2$$

$$P = 2 \cdot \sqrt{3^2 + 1,5^2} + 1 = 7,71 \text{ m}$$

$$R_H = \frac{A}{P} = \frac{6}{7,71} = 0,778 \text{ m}$$

Por lo tanto la velocidad del flujo en el fondo vale:

$$V_{\text{fondo}} = \frac{1}{n} \cdot R_H^{2/3} \cdot i^{1/2} = \frac{1}{0,02} \cdot (0,778)^{2/3} \cdot (0,002)^{1/2} \Rightarrow V_{\text{fondo}} = 1,89 \text{ m/s}$$

Adoptando el coeficiente de seguridad de 1,5:

$$V_{\text{fondo}} = 1,5 \cdot 1,89 = 2,83 \text{ m/s}$$

Utilizando el cuadro presentado en el ítem 5.2, queda claro que no es posible adoptar la misma solución del ejercicio anterior. En este caso se pueda utilizar el MacMat® con emulsión asfáltica, cuya velocidad crítica es de alrededor de 2 m/s pero que, por crecidas de duración inferior a 20 horas, soporta velocidades de hasta 3 m/s.

Con desarrollo de la vegetación

Imaginando que se desarrolle la vegetación, con grama de altura entre 50 mm la velocidad en el fondo, con $n = 0,035$ vale:

$$V_{\text{fondo}} = \frac{1}{n} \cdot R_H^{2/3} \cdot i^{1/2} = \frac{1}{0,035} \cdot (0,778)^{2/3} \cdot (0,002)^{1/2} \Rightarrow V_{\text{fondo}} = 1,08 \text{ m/s}$$

Adoptando el coeficiente de seguridad de 1.2 (debido a la presencia de la vegetación):

$$V_{\text{fondo}} = 1,2 \cdot 1,08 = 1,30 \text{ m/s}$$

Utilizando el cuadro presentado en el ítem 5.2, queda claro que, para la velocidad de 1,30 m/s el revestimiento propuesto cumple bien, aún para crecidas de larga duración.

Para verificar el valor de n adoptado, se calcula el parámetro de flujo:

$$V \cdot R_H = 0,84 \text{ m}^2/\text{s}$$

A través del gráfico de la figura 3.5.13, se obtiene:

$$n \approx 0,030$$

Rehaciendo los cálculos para este valor de la rugosidad:

$$V_{\text{fondo}} = \frac{1}{n} \cdot R_H^{2/3} \cdot i^{1/2} = \frac{1}{0,030} \cdot (0,778)^{2/3} \cdot (0,002)^{1/2} \Rightarrow V_{\text{fondo}} = 1,26 \text{ m/s}$$

Adoptando el coeficiente de seguridad de 1.2:

$$V_{\text{fondo}} = 1,2 \cdot 1,26 = 1,51 \text{ m/s}$$

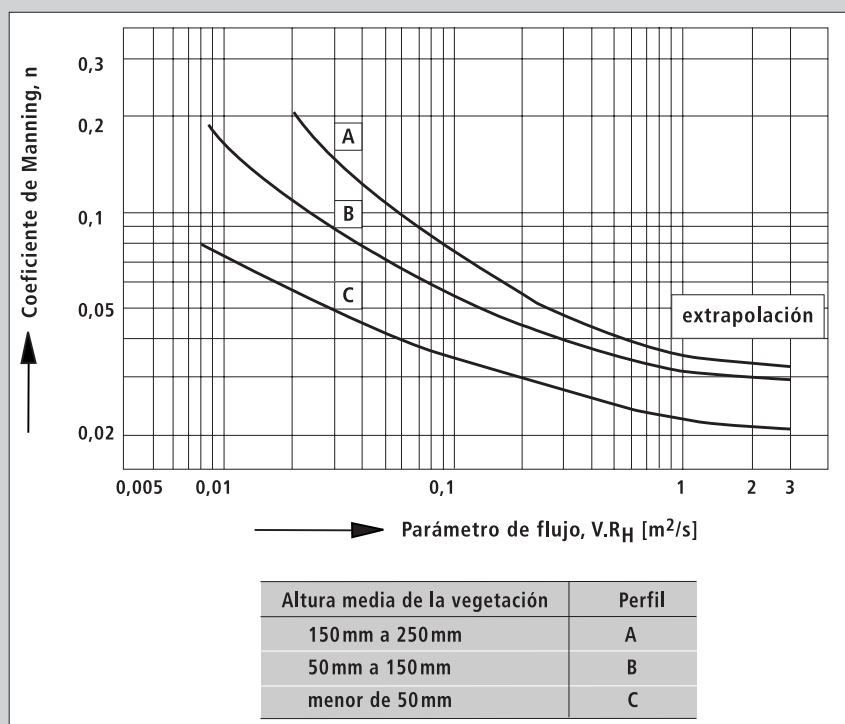
Para este valor de velocidad, el revestimiento propuesto es también estable, pero se debe evitar aplicarlo en lugares donde esta condición se verifique por largos períodos (períodos de crecida deben ser menores que 5 horas).

Verificando el valor de n:

$$V \cdot R_H = 0,98 \text{ m}^2/\text{s}$$

A través del gráfico de la figura 3.5.13, se obtiene:

$$n \approx 0,030 \quad (\text{OK})$$



6. REVESTIMIENTOS DE MÁRGENES SUJETOS AL EFECTO DE LAS OLAS

Las márgenes de los grandes ríos y canales, de los reservorios originados por las presas y de los grandes lagos están sujetas a sollicitaciones de oleaje generados por el viento, de forma similar a lo que ocurre en las costas marítimas, pero en menor escala, y por el pasaje de embarcaciones.

Por ejemplo, las olas generadas por el viento con una velocidad de 80 a 100 km/h (en una superficie de agua con varios kilómetros de longitud, una centena de metros de ancho y una profundidad de algunos metros) pueden generar alturas de 0,50 a 0,80 m.

Las márgenes de los canales navegables están sujetas a la acción de las olas provocadas por el pasaje de embarcaciones. La altura de estas olas depende de la velocidad y de la dimensión de la embarcación con respecto a la sección líquida del canal.

El parámetro principal en el proyecto de los revestimientos contra la erosión causada por las olas es la altura de las mismas.

6.1 Tipos de Revestimientos

En general, son los mismos usados en el revestimiento de canales mencionados en los capítulos anteriores. Los mas usados son:

- rip-rap: piedras sueltas colocadas una al lado de la otra sobre un filtro de material de dimensiones menores. Puede ser constituido por una o mas capas. Las piedras pueden ser lanzadas o colocadas ordenadamente y compactadas;
- colchones Reno® y gaviones caja: ya descriptos en el capítulo 2.2;
- geomantas: ya descriptas en el capítulo 2.3.

6.1.1 Rip-Rap

El U.S. Army Corps of Engineers en Vicksburg desarrolló por Hudson una fórmula para determinar la estabilidad de los elementos de estructuras de protección en piedras:

$$W = \frac{\gamma_s \cdot R_H^3}{\cotg 1/2\phi \cdot K_D \cdot (S_r - 1)^3} \quad (43)$$

donde:

W: peso de un elemento de protección;

γ_s : peso específico del elemento;

S_r : peso específico relativo del elemento;

ϕ : inclinación de la estructura con la horizontal;

K_D : coeficiente de estabilidad variable de 2 a 4,5 para las piedras de cantera.

Conocido el peso W del elemento de protección, se asume como dimensión media (d_m) de las piedras el valor medio entre el diámetro de la esfera y el lado del cubo de peso W y cuyo peso específico es γ_s .

6.1.2 Colchones Reno® y gaviones caja

C.T. Brown realizó una investigación de laboratorio sobre el uso de los colchones Reno® y gaviones caja para revestimientos de costas marítimas y encontró que el deslizamiento es la principal causa de colapso de los colchones Reno® aplicados sobre márgenes con inclinaciones mayores que 1:2, en cuanto el colapso por fluctuación es predominantemente para colchones Reno® aplicados sobre márgenes con pequeñas inclinaciones.

Fueron desarrolladas dos ecuaciones para determinar el espesor necesario de los colchones Reno® para protección de márgenes.

Para inclinaciones superiores a 1:3,5:

$$t = \frac{H_D}{3 \cdot (1 - V) \cdot (S_r - 1) \cdot \cotg^{1/3}\phi} \quad (44)$$

donde:

t: espesor del colchón Reno®;

H_D : altura de la ola de proyecto;

V: porcentaje dos vacíos de las piedras de relleno.

Para inclinaciones inferiores a 1:3,5

$$t = \frac{H_D}{7 \cdot (1 - V) \cdot (S_r - 1) \cdot \cotg^{1/3}\phi} \quad (45)$$

Para piedras comunes de cantera resulta:

$$\frac{(1 - V) \cdot (S_r - 1)}{1} \approx \quad (46)$$

Comparando la ecuación (43) con la (44) y (45) (colchones Reno®), se verifica que el uso de un revestimiento en rip-rap requiere mucho más material del que necesita un revestimiento en colchones Reno® (recordando que el espesor de un revestimiento en enrocado es del orden de 1,5 a 2 veces el valor de la dimensión media de las piedras d_m).

Por ejemplo, para un revestimiento de inclinación 1:2 y con olas de proyecto de 1 m, el espesor necesario para los colchones Reno® es aproximadamente 0,23 m, en cambio el espesor requerido para el rip-rap es de 0,45 a 0,60 m.

El Sogreah Ingénieurs Conseils (Grenoble – França), condujo en el período de julio de 1982 a octubre de 1983 un programa de pruebas y de investigaciones para determinar la eficiencia de los colchones Reno® utilizados como revestimiento de márgenes contra los efectos de la acción de las olas.

Las pruebas fueron ejecutadas en escala 1:5 y consideraron los siguientes parámetros (dados en escala real):

- altura e ola: hasta 2,20 m;
- inclinación de la margen 1:3, 1:2 e 1:1,5;
- espesor de los colchones Reno®: 0,15 m a 0,25 m;
- período de la ola: de 2,7 s a 5,15 s.

Las pruebas permitieron la definición de las curvas límite de estabilidad, según la inclinación de la margen y de su permeabilidad. En la figura 6.1.1 están relacionadas tales curvas para colchones Reno® de 0,15 m de espesor en escala real.

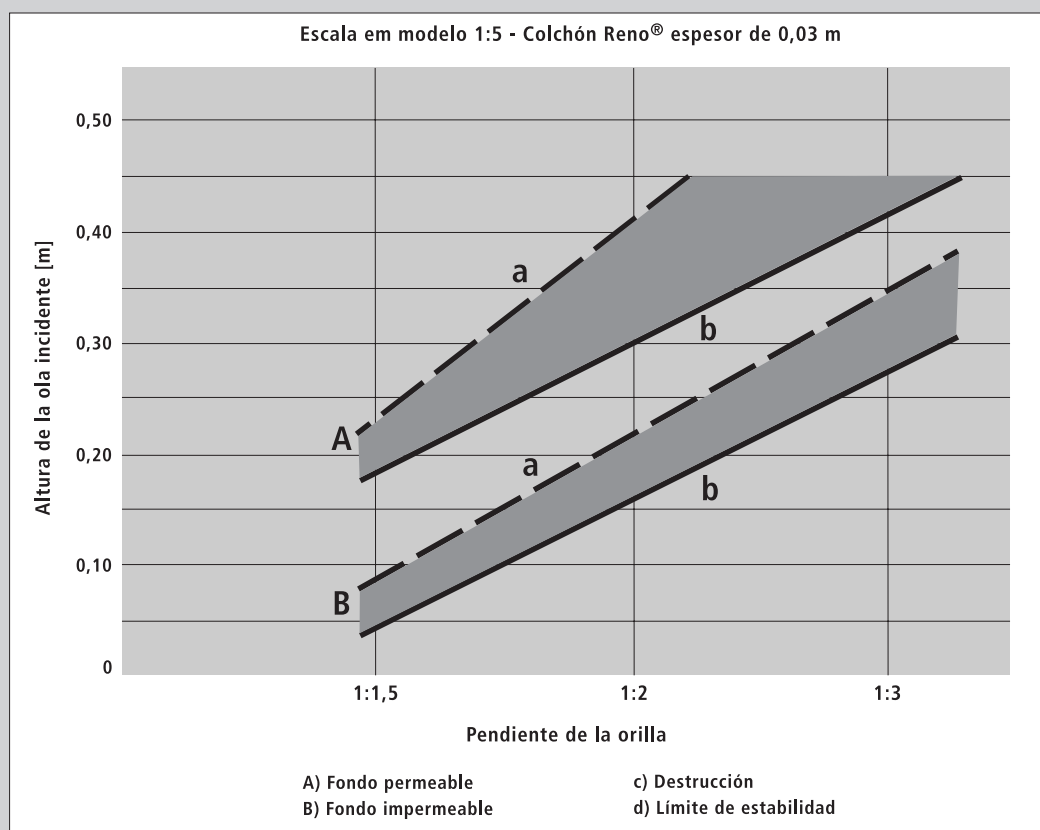


Figura 6.1.1 - Altura de la ola incidente en función de la inclinación de la margen.

El Laboratorio de Hidráulica Aplicada del INCYTH (Instituto Nacional de Ciencia y Técnicas Hídricas)/Buenos Aires - Argentina, condujo en el período de 1987 a 1989 un programa de pruebas e investigaciones para determinar la eficiencia de los colchones Reno® usados como revestimientos de márgenes contra los efectos de la acción de las olas provocadas por el viento y la trepada de las olas.

Las pruebas fueron ejecutadas en escala 1:16 y consideraron los siguientes parámetros (en escala real):

- altura de ola: hasta 2,53 m;
- inclinación del margen: 1:3, 1:2 y 1:1,5;
- espesor de los colchones Reno®: 0,17 m, 0,30 m y 0,50 m;
- período de la ola: aleatorio;
- margen permeable e impermeable.

Para el cálculo de la sobreelevación (run-up) fueron obtenidas expresiones que tienen en cuenta la amplitud de la ola y el ángulo del talud. La expresión para la trepada significativa (R_s) encontrada es:

$$R_s = \frac{H_s^{0,8} \cdot (g \cdot T^2)^{0,2}}{\cotg \phi^{0,25}} \quad (47)$$

donde:

- H_s : altura significativa de las olas incidentes;
- T : período de las olas;
- ϕ : ángulo de la margen a proteger.

La expresión de la trepada máxima (R_m):

$$R_m = \frac{H_s^{0,8} \cdot (g \cdot T^2)^{0,2}}{\cotg \phi^{0,25}} \quad (48)$$

Es conveniente indicar que en las pruebas no fueron estudiados los efectos provocados por el movimiento de las piedras dentro de los colchones Reno® y gaviones caja. Recomendamos, como ya fué indicado en los capítulos anteriores, evaluar la frecuencia y duración de las olas, considerando que el movimiento de las piedras contenidas dentro de las estructuras metálicas puede desgastar el revestimiento de los alambres, especialmente en márgenes con presencia de arena por el efecto abrasivo de ésta.

Debido al contacto con el agua, deben siempre ser usados colchones Reno® y gaviones caja producidos con alambre con revestimiento Galfan® y recubrimiento adicional de material plástico.

A partir de los resultados de estos ensayos del INCYTH, además de los valores obtenidos en el Laboratorio de Sogreah y de la aplicación de la ecuación experimental de C.T. Brown, se puede adoptar para el proyecto los valores máximos de las amplitudes de olas soportados por los varios tipos de colchones (0,17 m, 0,23 y 0,30 m) y gaviones (0,50 m) para las diversas condiciones de inclinación del talud y permeabilidad de la base:

Talud 1:3 - Altura de las Olas					
Material	Espesor	Talud impermeable		Talud permeable	
		Límite superior [m]	Máximo admisible [m]	Límite superior [m]	Máximo admisible [m]
Colchones Reno®	0,17	0,40	0,45	0,60	0,65
Colchones Reno®	0,23	0,45	0,50	0,65	0,75
Colchones Reno®	0,30	0,50	0,60	0,75	0,90
Gaviones caja	0,50	0,60	0,70	0,90	1,05

Talud 1:2 - Altura de las Olas					
Material	Espesor	Talud impermeable		Talud permeable	
		Límite superior [m]	Máximo admisible [m]	Límite superior [m]	Máximo admisible [m]
Colchones Reno®	0,17	0,30	0,35	0,45	0,50
Colchones Reno®	0,23	0,35	0,40	0,50	0,60
Colchones Reno®	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70
Gaviones caja	0,50	0,50	0,60	0,70	0,85

Talud 1:1,5 - Altura de las Olas					
Material	Espesor	Talud impermeable		Talud permeable	
		Límite superior [m]	Máximo admisible [m]	Límite superior [m]	Máximo admisible [m]
Colchones Reno®	0,17	0,20	0,25	0,30	0,35
Colchones Reno®	0,23	0,25	0,30	0,35	0,45
Colchones Reno®	0,30	0,30	0,40	0,45	0,55
Gaviones caja	0,50	0,40	0,50	0,55	0,70

Tabla 6.1.1 - Dimensionamiento de colchones Reno® y gaviones caja de acuerdo con la altura de las olas.

El talud (soporte del revestimiento) constituido por suelo natural puede ser considerado impermeable. Para ser considerado permeable se deben tener camadas bajo el gavión constituidas por piedras, grava o arena, con espesores del orden de 30 a 50 cm.

6.1.3 Geomantas

En el caso de márgenes solicitadas por la acción de olas de menor altura, las geomantas pueden ser usadas como protección para olas de 0,20 a 0,30 m, en el caso de ser rellenas con pedrisco y bitumen. Para olas de mayor amplitud (del orden de 0,50 m) el tiempo de permanencia de la agitación es importante para definir la estabilidad del revestimiento. También en este caso fueron realizadas pruebas para estudiar el comportamiento y definir métodos de dimensionamiento para este material.

La figura 6.1.2 ilustra las principales dimensiones de proyecto que deben ser utilizadas para revestimientos con geomantas, considerando los niveles máximo y mínimo de agua, juntamente con la acción de las olas.

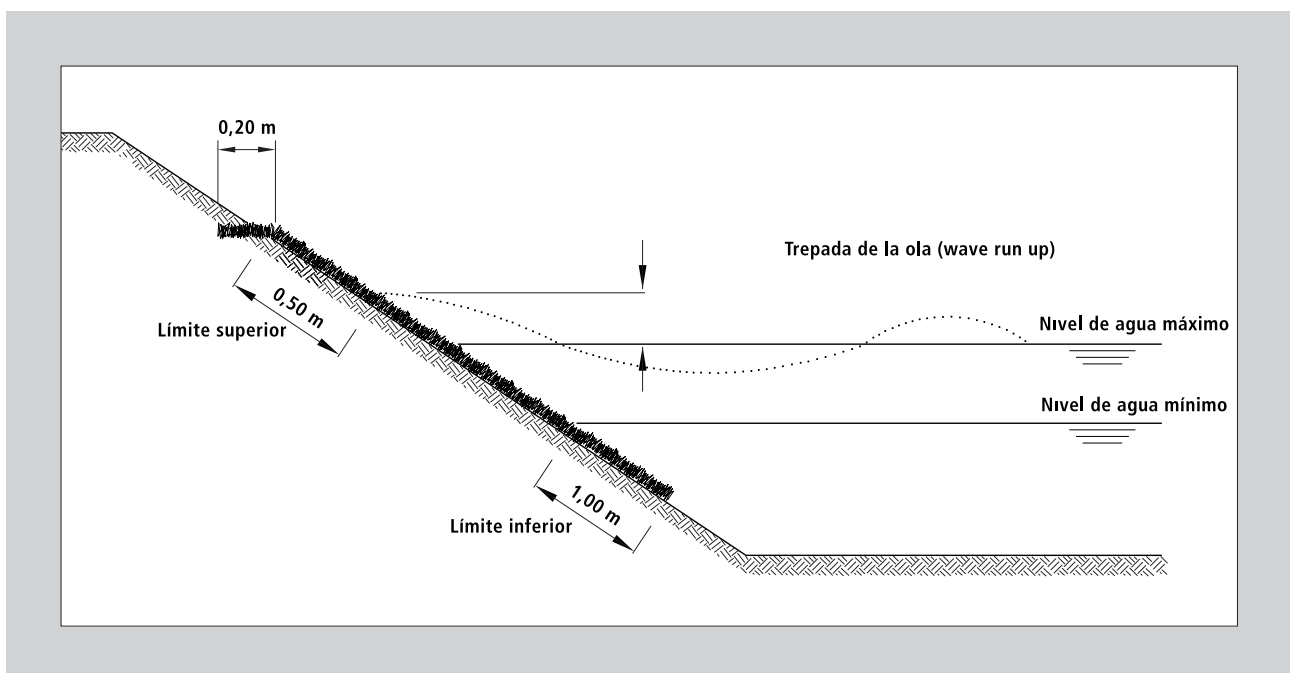


Figura 6.1.2 - Dimensiones de proyecto para protección de márgenes con geomantas.

La longitud ("upper boundary") que debe quedar por encima de la trepada provocada por la acción de las olas ("wave run up") es del orden de 0,5 m, medidos a lo largo de la superficie inclinada.

La altura de la trepada es función de la altura de la ola y de la inclinación de las márgenes del canal. Para determinarla se puede utilizar la tabla 6.1.2.

Altura de trepada [m]			
Altura de la ola [m]	Inclinación de los taludes de las márgenes		
	26° (1:2)	18° (1:3)	14° (1:4)
0,1	0,40	0,25	0,20
0,2	0,80	0,55	0,40
0,3	1,20	0,80	0,60

Tabla 6.1.2 - Altura de trepada [m] en función de la altura de ola y de la inclinación de los taludes de las márgenes.

La longitud inferior (“lower boundary”) que debe quedar por debajo del nivel mínimo es establecido de la siguiente forma:

- cuando el revestimiento es atacado por olas menos intensas, esta longitud puede ser calculada como 1,5 a 2 veces el valor de la amplitud de la ola, con un valor mínimo de 1 m, medido a lo largo de la superficie inclinada del talud;
- cuando el revestimiento es también sometido permanentemente a la acción de escurrimiento, toda la superficie de la margen, del nivel mínimo hasta el fondo, debe ser recubierta independientemente de estar también sometida a la acción de olas.

Ensayos efectuados en 1996, en el Waterloopkundig Laboratorium, indican que taludes con vegetación bien desarrollada ha resistido olas de hasta 0,40 m por un período de agitación de 1 a 2 días.

No existe hasta el momento ningún resultado de la utilización conjunta de geomantas con vegetación desarrollada, bajo la acción de oleaje.

Por lo tanto, en función de los ensayos efectuados es aconsejable la utilización de geomantas rellenas con pedrisco bituminado hasta olas de 0,30 m y con una acción continua de hasta algunos días.



Figura 6.1.3 - Holanda.

6.2 Criterios de Cálculos

6.2.1 Colchones Reno® y gaviones caja

En el caso se tenga la acción simultanea de olas y escurrimiento, prevalece la protección que atiende a las dos condiciones. Para el dimensionamiento contra la acción de las olas, utilizar la tabla 6.1.1, siempre para la condición de talud impermeable.

Por ejemplo, para un talud con inclinación de 1V:2H, con olas de hasta 0,45 m de amplitud, se precisa de una protección con gaviones tipo colchón Reno® de 0,30 m de espesor.

Para definir la altura de la protección en función de la trepada, utilizar las ecuaciones obtenidas por el Laboratorio de Hidráulica del INCYTH, pudiendo adoptarse olas con períodos del orden de 5 segundos, manteniéndose siempre un mínimo del orden de 1,0 m.

6.2.2 Geomantas

La utilización de geomantas queda restringida para olas de hasta 0,30 m de altura y con la utilización de relleno con pedrisco bituminado.

Para el dimensionamiento de la protección de acuerdo con la altura de la trepada utilizar la tabla 6.1.2.



Figura 6.2.1 - Estados Unidos.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] CHOW, V.T. - Open Channel Hydraulics. McGraw-Hill, 1959.
- [2] DI PIETRO, P.; URROZ, G. - Performance Testing on a Three Dimensional Composite High Strength Soil Erosion TRM (Turf Reinforcement Mat). Maccaferri. Utah Water Research Laboratory.
- [3] ENKAMAT DESIGN MANUAL - Geosynthetics. Akzo Nobel, 1997.
- [4] LENCASTRE, A. - Hidráulica Geral. Hidroprojecto. Edição luso-brasileira, 1983.
- [5] R. AGOSTINI, A. CONTE, G. MALAGUTI, A. PAPETTI; MACCAFERRI - Revestimentos flexíveis em colchões Reno e gabiões nos canais e cursos de água canalizados. Critérios de projeto e cálculo dos revestimentos em Colchões Reno e Gabiões nos canais a céu aberto. Capítulo III, 1985.
- [6] PILARCZYK, K. - Aplicación de revestimientos geosintéticos en la ingeniería hidráulica. Geosynthetics News. Akzo Nobel. Vol. 2, nº 3, Maio 1997.
- [7] SIMONS, D. B.; CHEN, Y. H.; SWENSON, L. J. - Hydraulic test to develop design criteria for the use of Reno Mattresses. Civil Engineering Department - Engineering Research Center - Colorado State University - Fort Collins Colorado, 1984.
- [8] U. PUPPINI, Idraulica, Ed. Zanichelli, Bologna, 1947.
- [9] G. DE MARCHI - Nozioni di idraulica con particolare riguardo ai problemi delle bonifiche e delle irrigazioni, Ed. Agricole, Bologna, 1964.
- [10] G. SUPINO, Idraulica Generale, Ed. Patron, Bologna, 1965.
- [11] F. M. HENDERSON, Open channel flow, Mac Millan Company, New York, 1966.
- [12] E. MARCHI, Il moto uniforme delle correnti liquide nei condotti chiusi ed aperti, L'Energia Elettrica nº 4-5, 1961.
- [13] D. B. SIMONS, R. H. LI, W. S. LIANG, Design guidelines & criteria. Channels & hydraulic structures on sandy soil, Fort Collins, Colorado, 1981.
- [14] A. A. FIUZAT, Y. H. CHEN, D. B. SIMONS, Stability tests of rip-rap in flood control channels, Fort Collins, Colorado, 1982.
- [15] U. S. DEPARTMENT OF THE ARMY CORPS OF ENGINEERS, Wire mesh gabions (slope and channel protection), CW-02541, 1980.
- [16] N. R. OSWALD, J. F. GEORGE, G. A. PICKERING, Fourmile Run Local flood-control project, Alexandria and Arlington County, Virginia, U. S. Army Engineer District, Baltimore, 1975.
- [17] R. R. COPELAND, Old River overbank structure outlet modifications, U. S. Army Engineer District, New Orleans, 1980.
- [18] N. R. OSWALD, S. T. MAYNORD, Bank Protection techniques using gabions, in Streambank Erosion Control Evaluation and Demonstration, U. S. Army Engineers Waterway Experiment Station, Vicksburg, 1978.
- [19] U. S. CORPS OF ENGINEERS, Hydraulic Design Criteria, Vol. 1, sheet 712-1.

- [20] C. T. BROWN, Gabion Report on some factors affecting the use of Maccaferri gabions and Reno mattresses for coastal revetments, Manly Vale, N. S. W., 1979.
- [21] R. Y. HUDSON, Wave forces on rubble mound breakwaters and jetties, Misc. paper 2-453, U. S. Army Corps of Engineers Waterway Experiment Station, Vicksburg, Mississippi, 1961.
- [22] SOGREAH INGÉNIEURS CONSEILS, Protection de berges de pente 1/3 contre le batillage par matelas Reno, rapporto 32 0839 R1, Grenoble, Luglio, 1982.
- [23] SOGREAH INGÉNIEURS CONSEILS, Protection de berges de pente 1/1,5 contre le batillage par matelas Reno, rapporto 32 0839 R2, Grenoble, Ottobre, 1982.
- [24] SOGREAH INGÉNIEURS CONSEILS, Protection de berges de pente 1/1,5 contre le batillage par matelas Reno consolidé avec du mastic de bitume, rapporto 32 0839 R3, Grenoble, Febbraio, 1983.
- [25] SOGREAH INGÉNIEURS CONSEILS, Protection de berges de pentes 1/3 et 1/2 contre le batillage par matelas Reno, rapporto 32 0888 R4, Grenoble, Ottobre, 1983.
- [26] HYDRAULIC LABORATORY DENVER, Hydraulic model study to determine the required cover blanket to prevent fine base material from leaching due to wave action-Kennewich Main Canal, Yakima Project, Washington, Hydraulic Laboratory Report n° Hyd 381, 1954.



MACCAFERRI

AMERICA LATINA

Matriz.
Av. José Benassi, 2601 - Distrito Industrial FazGran
CEP 13.213.085 - Jundiaí - SP - Brasil
T: +(55) 11 4525-5000
E: info.br@maccaferri.com
www.maccaferri.com/br



Sistema de Gestión de Calidad
Certificado de Conformidad con la
Norma ISO 9001



Maccaferri de Argentina S.A.
T: (+54) 3327 412201
E: info.ar@maccaferri.com

Maccaferri de Bolivia Ltda.
T: (+591) 3 322-8042
E: info.bo@maccaferri.com

Maccaferri del Caribe.
T: (+809) 472-3380
E: info.do@maccaferri.com

Maccaferri de Centroamérica Ltda.
T: (+506) 2244-6090
E: info.cr@maccaferri.com

Maccaferri de Chile S.P.A.
T: (+56) 2 2940-2347
E: info.cl@maccaferri.com

Maccaferri de Colombia Ltda.
T: (+57) 1 636 9230
E: info.co@maccaferri.com

Maccaferri de Ecuador S.A.
T: (+593) 2 3820-971
E: info.ec@maccaferri.com

Maccaferri de Guatemala S.A.
T: (+502) 2208-3535
E: info.gt@maccaferri.com

Maccaferri de México.
T: (+52) 442 229 43 00
E: info.mx@maccaferri.com

Maccaferri de Panamá S.A.
T: (+507) 292-8608
E: info.pa@maccaferri.com

Maccaferri de Perú S.A.C.
T: (+51) 1 206-2600
E: info.pe@maccaferri.com