

Proyecto de construcción de un muro de gaviones de 960 m³



Abstract

The present document shows a summary of relevant information about gabion walls, as well as its main applications, method of design, and advantages. Other applications of double-twisted hexagonal mesh are also addressed.

The process involved in the construction of a 960 m³, 80 m long gabion wall, with a variable height between 3.0 and 6.5 m is shown. The materials used were: rocks, double-twisted hexagonal mesh, galvanized wire to tie up the meshes, ballast to stabilize the base and #6 steel bars as framework.

The main objective of the project was to involve the student, directly, in a real civil engineering project, allowing him to apply the knowledge acquired along his academic preparation.

The total cost of the project is 27.215.592 colones, generating a utility of 13.591.960 colones, corresponding to 50% of the total cost. Besides, the estimated real duration of the project was 12 weeks, 2 weeks behind the original schedule.

Keywords: gabion walls, double-twisted hexagonal mesh, galvanized wire, civil engineering.

Resumen

El presente documento es un compendio de información relevante sobre el tema de muros de gaviones, sus principales aplicaciones, métodos de diseño, ventajas sobre otras alternativas de contención, así como otras aplicaciones de la malla hexagonal a doble torsión.

También, se presentan todos los procesos involucrados en un proyecto de construcción de un muro de gaviones de 960 m³, de una altura variable entre 3.0 y 6.5 m, y una longitud total de 80 m. Los materiales utilizados fueron: piedra bola, malla hexagonal a doble torsión, alambre galvanizado para amarrar las mallas, lastre para la estabilización de la base y varilla #6 como formaleta.

El objetivo principal del proyecto fue involucrar, directamente, al estudiante en un tema real de ingeniería civil, permitiéndole aplicar los conocimientos adquiridos a lo largo de su preparación académica.

El costo total del proyecto se estima en 27.215.592 colones, generando una utilidad de 13.591.960 colones, igual a un 50% del costo total. Además, la duración real estimada del proyecto es de 12 semanas, con un retraso de 2 semanas respecto al cronograma diseñado.

Palabras clave: muros de gaviones, malla hexagonal a doble torsión, alambre galvanizado, ingeniería civil.

Proyecto de construcción de un muro de gaviones de 960 m³

RAFAEL PIÑAR VENEGAS

Proyecto final de graduación para optar por el grado de
Licenciatura en Ingeniería en Construcción

Junio del 2008

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

Contenido

PREFACIO	1
RESUMEN EJECUTIVO	2
INTRODUCCIÓN	4
PRINCIPIOS DE LOS GAVIONES	5
MUROS DE CONTENCIÓN.....	5
MUROS DE GAVIONES	5
VENTAJAS DE LOS GAVIONES	10
DISEÑO DE MUROS DE GAVIONES.....	11
SUELO REFORZADO	22
OTRAS APLICACIONES DE LA MALLA HEXAGONAL	24
USO DE GEOTEXTIL NO TEJIDO	26
ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES	27
METODOLOGÍA	28
PROCESO CONSTRUCTIVO	30
DEMARCACIÓN TOPOGRÁFICA	30
EXCAVACIÓN.....	30
MEJORAMIENTO DE LA BASE.....	31
ARMADO DE GAVIONES	32
LLENADO DE GAVIONES.....	33
RELLENO	34
RESULTADOS	35
DISEÑO.....	35
PRESUPUESTO Y CONTROL DE COSTOS	36
PROGRAMACIÓN Y CONTROL DE AVANCE.....	38
ANÁLISIS DE RESULTADOS	39
DISEÑO.....	39
PRESUPUESTO Y CONTROL DE COSTOS.....	40
PROGRAMACIÓN Y CONTROL DE AVANCE.....	42
CONCLUSIONES	43
APÉNDICES	44
REFERENCIAS	45

Prefacio

Los muros de contención son una solución geotécnica, cuando se necesita optimizar el espacio disponible para la construcción de una obra, en los casos en que el terreno no posea suficiente capacidad para mantenerse estable a una diferencia de elevaciones.

Los muros de contención se clasifican como: gravedad, semi gravedad, voladizo y con contrafuertes. La selección del tipo de muro obedece a diversas razones, como el método constructivo, la altura del terreno por contener, las propiedades de los suelos, y el costo, entre otras.

En Costa Rica, los muros de contención de gaviones suponen una alternativa importante, ya que son, por lo general, más baratos que los muros tradicionales de mampostería o concreto. Su construcción es relativamente más sencilla y rápida y se emplean, básicamente, solo dos materiales (roca y malla hexagonal a doble torsión).

La importancia de construir estructuras de contención basadas en un diseño apropiado y siguiendo las correctas técnicas de construcción radica en la necesidad de dar una solución duradera a los problemas de estabilidad que sufren ciertos sitios del país, en donde se invierten millones de colones en reconstruir estructuras que fallaron y rehabilitar caminos que se han bloqueado por la ausencia de un elemento estabilizador.

El fin de la práctica fue investigar, ampliamente, el tema de muros de gaviones, así como dirigir el proyecto de construcción de un muro de gaviones de gran tamaño, llevando a cabo todas las etapas de un proyecto de este tipo, a saber: diseño, planos, presupuesto, programación, ejecución, control de costos, entre otros.

Mi agradecimiento para el Profesor Ing. Geol. Oldemar Ramírez Escribano, ya que sus consejos me sirvieron de guía en todo momento para cumplir con este proyecto.

Resumen ejecutivo

Los muros de contención de gaviones son estructuras de gran volumen que se clasifican como muros de gravedad. Están constituidos por cajas de malla hexagonal con dimensiones variables, siendo las más comunes las de 2x1x1m y las de 1.5x1x1m, las cuales son rellenas en la obra con bloques sanos de roca. Estos muros deben ser diseñados para soportar las cargas del terreno y las sobrecargas aplicadas sin que se genere la rotura o deformación excesiva de su estructura, de su fundación o del terreno sostenido.

Las características propias de los gaviones, como la flexibilidad, permeabilidad, facilidad constructiva y economía, los colocan como una de las soluciones de estabilidad preferidas en Costa Rica, principalmente, en obras de emergencia en las cuales se requiere una rápida intervención.

Como parte de las soluciones de los muros de gaviones en Costa Rica, se encuentra el proyecto de urbanización La Estefanía, ubicada en El Carmen de Guadalupe, Goicoechea. El acceso principal de dicha urbanización requirió ser estabilizado mediante una estructura de gaviones, de una longitud total de 80 metros y altura variable entre 3 y 6.5 metros. La empresa Gaviones Bekaert SA asumió la construcción de este muro de contención, cuyos resultados se muestran en el presente documento.

El objetivo principal de la práctica fue llevar a cabo todos los procesos de ingeniería del proyecto de muro de gaviones ubicado en dicha localidad, con un volumen estimado de 989.25 m³. Para tal fin, se desarrolló el diseño de cada una de las secciones en que se dividió el muro, se generó el plano respectivo y se verificó la correcta construcción de los gaviones.

La rama específica en la que se ubica el proyecto es la Geotecnia, pero, también, se aplicaron técnicas de la administración de proyectos, como el control de costos, programación y controles de avance.

Los objetivos específicos de la práctica se basaron, principalmente, en solucionar un

problema real de Ingeniería Civil, para lo cual se debieron aplicar los conocimientos estudiados en la carrera de Ingeniería en Construcción del Instituto Tecnológico de Costa Rica, así como realizar un control efectivo de los costos reales contra el presupuesto, la duración real contra la programación, y la inspección de la obra.

El documento contiene una sección con información relevante acerca del tema de muros de gaviones, teniendo un especial énfasis en el diseño de los mismos. Entre los puntos analizados se encuentra la manera de determinar el empuje activo y pasivo de un suelo, la aplicación de las teorías de diseño más utilizadas, a saber: Rankine y Coulomb, los efectos sísmicos, de la cohesión del suelo y de la superficie freática, entre otros.

Se indican además los pasos por seguir previos al análisis, como lo es suponer una cierta geometría del muro basada en el peso específico de los gaviones, que a su vez, varía según el tipo de bloques que se utilicen y del grado de acomodo que se logre. Además, se debe conocer la altura total que deberá tener el muro, el espacio disponible para la base, y el ángulo de inclinación hacia el interior del terreno.

Seguidamente, se enuncian los tipos de falla más comunes en los muros de gaviones, y se desarrolla la manera de realizar las respectivas revisiones de estabilidad. Entre las mismas se analizan: la seguridad contra el deslizamiento de la base, contra el volcamiento, la excentricidad y las presiones sobre la fundación, así como las estabilidades interna y global.

Por último, se destacan otros tipos de soluciones de la malla hexagonal, como las canalizaciones, obras deflectoras y apoyo de puentes, pero, especialmente, se enfatiza en el sistema de suelo reforzado conocido como Terramesh, que ha tenido una gran aceptación en los últimos años.

La cantidad de materiales utilizados, comúnmente, en la construcción de un muro de gaviones es mínimo: los más importantes son los

bloques sanos de roca y las mallas de gavión. En el caso específico del Proyecto La Estefanía, los materiales empleados fueron piedra bola, malla hexagonal a doble torsión, alambre galvanizado para amarrar las mallas, alambre negro, lastre para la estabilización de la base y varilla #6 como formaleta.

Para la construcción del muro, primero se realizó la demarcación topográfica, con el fin de indicar la línea excavación, con la cual se prepararon las diferentes terrazas sobre las cuales se asentó el muro. A continuación se mejoró la base con una capa de 20 cm de lastre compactado, y se procedió a colocar los gaviones.

El proceso constructivo siguiente se basó en procesos repetitivos, por camadas, a lo largo de todo el muro. Estos consistieron en efectuar las actividades del armado de los gaviones, el llenado, y la compactación del relleno. Con esto lo que se pretendió fue ir levantando todas las secciones del muro, simultáneamente, para no dejar el corte desprotegido y de esta manera, prevenir que se derrumbara.

Entre los documentos del proyecto que fueron generados para cada etapa, se tiene el diseño de las secciones, el plano constructivo, el presupuesto, la programación, así como los respectivos controles de costos y de avance.

El primer documento generado fue el presupuesto del proyecto, partiendo de un diseño preliminar de 5 metros de altura, con la plena certeza de que en la obra y después de la excavación, se determinaría con precisión el volumen total del muro. Este presupuesto fue la base de la cotización de Gaviones Bekaert S.A., la cual fue aprobada, con un cierre de \$83/m³ de gavión instalado.

Posteriormente, se realizó el diseño específico para cada una de las secciones del muro, utilizando el programa GawacWin de la Empresa Maccaferri. Para todas las secciones se contempló el tipo de gavión de 2.4 mm de diámetro del alambre. No se consideró la presencia de nivel freático. Debido a que en ese momento no se contó con un estudio de suelos del sitio, se diseñó el muro considerando parámetros típicos de un suelo CH o MH, que son suelos de mala calidad.

Una vez efectuados los diseños, se procedió a realizar el plano del muro de gaviones, que sirvió de guía a todos los involucrados en el

proyecto, desde el constructor hasta el propietario.

Seguidamente, se elaboró el cronograma de la obra. Dicha programación fue realizada con el programa Microsoft Project 2003, desglosándose el proyecto en 5 actividades, a saber: excavación, preparación de la base, armado de gaviones, llenado de gaviones, y compactación del relleno. El tiempo planeado para la ejecución del proyecto fue de 10 semanas.

Una vez iniciadas las labores, se generaron los documentos de control de costos y control de avance, además de la inspección de la obra.

Para realizar efectivos controles de avance y costos, se implementó la técnica de Valor Ganado (Earned Value), utilizada para medir, integralmente, el proyecto, tanto en tiempo como en costo.

Por su parte, el control de avance se llevó también con la técnica de Valor Ganado, con lo cual se determinó que el proyecto llevaba una semana de atraso, y se proyectó que el atraso total sería de 15 días naturales. Asimismo, se llevó el seguimiento de la obra con el programa Microsoft Project 2003, el cual muestra en el diagrama de Gannt el retraso de la obra con respecto al calendario original.

Finalmente, durante la inspección se dio especial énfasis en el correcto armado y amarre de los gaviones, la colocación de alambres tensores y varillas en el frente del muro, el uso de geotextil en la interfase muro relleno, el llenado completo de las cajas de gavión y el cierre adecuado de las mismas, para garantizar la seguridad y durabilidad de la obra.

Introducción

En el distrito de Mata de Plátano, cantón de Goicoechea, se llevará a cabo la segunda etapa del proyecto de la urbanización La Estefanía, cuyo movimiento de tierra será realizado por la empresa Payco S.A. (Pavimentos y Construcción S.A.). El acceso principal se ubica a unos 500 metros de la calle principal, a través de un corte de ladera, generando un talud de 5 metros de altura y una longitud de 80 metros aproximadamente.

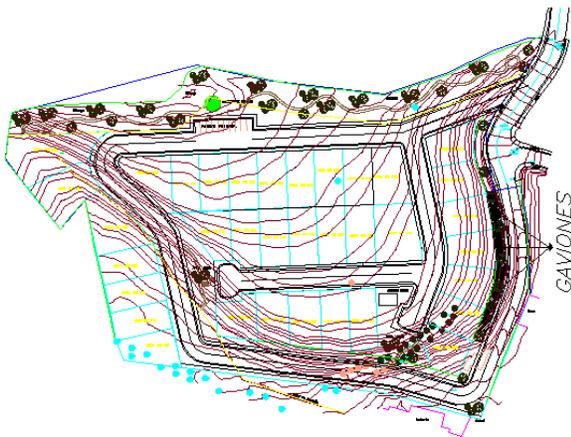


Figura 1. Proyecto de urbanización La Estefanía 2ª Etapa.

Dicho talud debió ser estabilizado mediante una estructura de contención, previo a la construcción de la urbanización, debido a la maquinaria pesada que circularía sobre él. En la figura 2, se muestra el perfil original del terreno.



Figura 2 Perfil natural del terreno donde se ubicaría el muro de gaviones.

La Empresa Gaviones Bekaert fue adjudicada por Payco S.A. en enero del 2008, para construir el muro de contención, el cual serviría además como Proyecto de Graduación.

El objetivo principal de la práctica fue llevar a cabo todos los procesos de ingeniería relacionados con el proyecto de construcción del muro de gaviones del Proyecto La Estefanía, con un volumen estimado de 989.25 m^3 . La rama específica en la cual se ubica el Proyecto, es la Geotecnia, pero, también, se aplicaron técnicas de la administración de proyectos, tales como: el control de costos, programación y controles de avance.

Los objetivos específicos de la práctica fueron involucrar al estudiante en un problema real de Ingeniería Civil, para que este le buscara solución aplicando los conocimientos adquiridos durante su preparación académica en el Instituto Tecnológico de Costa Rica. Asimismo, realizar un control efectivo de los costos reales contra el presupuesto, estimar la duración real contra la programación, y la inspección de la obra para que la misma cumpliera con las expectativas del cliente y de la empresa Gaviones Bekaert.

Principios de los gaviones

A continuación, se presenta un resumen detallado acerca de las principales características que poseen los muros de contención de gaviones, así como su presentación y dimensiones más comunes, sus principales ventajas comparativas respecto a otras soluciones, y su método de diseño. Además, se presentan otros tipos de soluciones a base de malla hexagonal, como suelo reforzado (sistema terramesh) y obras deflectoras.

Muros de contención

Se entiende por muro de contención, a la estructura que provee la estabilidad de un material o suelo que tiene un nivel diferente a la superficie de apoyo del mismo. Un muro de contención es una estructura predominantemente vertical, diseñada y construida con un margen de seguridad en cuanto a estabilidad, resistencia y durabilidad; tomando en cuenta aspectos económicos y estéticos¹.

Los muros de contención, comúnmente, se clasifican de acuerdo con el material del que están contruidos (concreto, mampostería, metal, gaviones) o de la manera como funcionan estructuralmente (muros de gravedad, de voladizo, anclados, con contrafuertes)¹.

Un muro de gravedad es aquel que debe su estabilidad, fundamentalmente, a su propio peso. Consiste en grandes masas de contención que, por su peso y resistencia al vuelco, pueden soportar las presiones ejercidas por el terreno¹. Es un muro de gran volumen en relación con su altura. Un ejemplo típico de muro de gravedad son los gaviones.

¹ Ver Prodac, 2004, Pirka Soft 1.0.

Muros de gaviones

Los muros de gaviones son estructuras flexibles, constituidas por cajas fabricadas de malla de alta resistencia, con dimensiones que vienen en fracciones de medio metro, las cuales son rellenas con bloques sanos de roca. Esta conformación permite que se pueda realizar un esquema modular, lo que facilita la configuración de una amplia variedad de posibilidades de geometría para el muro². En Costa Rica, su uso es muy frecuente como elemento estabilizador de laderas o taludes en diversas condiciones.

En el sitio de la obra, los gaviones se unen entre sí con una costura manual del mismo alambre de la malla. Los bloques de roca que se utilizan para el llenado no deben ser susceptibles de meteorización o disgregación y deben tener una dimensión de una a dos veces la menor dimensión de la malla, para evitar pérdidas de material y asegurar la mayor densidad posible².

El material sostenido está compuesto, normalmente, por un relleno que es colocado posteriormente a la construcción del muro entre este y el terreno original. Estos, junto con las eventuales sobrecargas que se aplicarán sobre el terraplén, forman las cargas que actúan sobre el muro. Por lo tanto, este debe ser dimensionado de forma tal que soporte estas cargas sin que se produzca una rotura o deformación excesiva de su estructura, de su fundación o del resto del macizo de tierra³.

Los gaviones son de fácil instalación y se adecuan e integran armoniosamente a su entorno, logrando que inclusive la vegetación pueda desarrollarse en ella, presentando así, un paisaje agradable contraponiéndose con las soluciones rígidas de concreto o enrocados⁴.

² Ver Tapia, 2006, Diseño geotécnico.

³ Ver Maccaferri, 2003, Gawac BR-2.0.

⁴ Ver Prodac, 2007, Soluciones para el control de la erosión.

Gaviones tipo caja y tipo colchón

Los gaviones tipo caja y tipo colchón representan una solución técnica y económica eficiente, a la vez que estética y ecológica para su aplicación en obras de ingeniería civil, dado que se adaptan a cualquier ambiente, clima, y su construcción también es posible en sitios de difícil acceso⁴.

Son paralelepípedos rectangulares de diferentes dimensiones constituidos por una red de malla metálica tejida a doble torsión que forman una base, paredes verticales y una tapa, la cual, eventualmente, puede ser formada por separado. Son rellenos en obra con bloques sanos de roca de peso apropiado⁴. Para este propósito, el peso específico de los bloques debe ser mayor o igual a 2 ton/m³. Por la conformación de las mallas, estas pueden ser:

- De abertura hexagonal (tejidos).
- De abertura ortogonal (electrosoldados).

Se suelen llamar tipo caja a aquellos cuya altura varía entre 0.50 m – 1.00 m y tipo colchón a aquellos cuya altura varía entre 0.17 m – 0.30 m. Interiormente, los gaviones pueden estar divididos por diafragmas formando celdas cuya longitud no debe ser mayor a una vez y media el ancho de la malla. Usualmente, esta separación es de 1 m. Las aristas de los paneles de malla son reforzadas con alambres de mayor diámetro⁴.

A continuación, se muestran las dimensiones típicas según el tipo de gavión:

Cuadro 1. Dimensiones del gavión tipo caja ⁴				
Largo (m)	Ancho (m)	Altura (m)	Nº Diafragmas	Volumen (m ³)
1.5	1.0	1.0	-	1.5
2.0	1.0	0.5	1	1.0
2.0	1.0	1.0	-	2.0
2.0	1.0	1.0	1	2.0
3.0	1.0	0.5	2	1.5
3.0	1.0	1.0	2	3.0
4.0	1.0	0.5	3	2.0
4.0	1.0	1.0	3	4.0
4.0	1.5	1.0	3	6.0
5.0	1.0	0.5	4	2.5
5.0	1.0	1.0	4	5.0
5.0	1.5	1.0	4	7.5
6.0	2.0	0.5	5	6.0

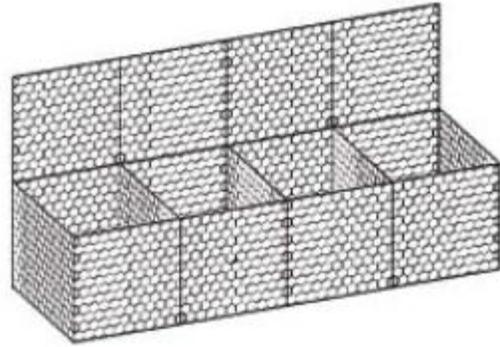


Figura 3. Gavión tipo caja⁴.

Cuadro 2. Dimensiones del gavión tipo colchón ⁴				
Largo (m)	Ancho (m)	Altura (m)	Nº Diafragmas	Volumen (m ³)
4.0	2.0	0.17	3	1.36
4.0	2.0	0.23	3	1.84
4.0	2.0	0.30	3	2.40
5.0	2.0	0.17	4	1.70
5.0	2.0	0.23	4	2.30
5.0	2.0	0.30	4	3.00
6.0	2.0	0.17	5	2.04
6.0	2.0	0.23	5	2.76
6.0	2.0	0.30	5	3.60

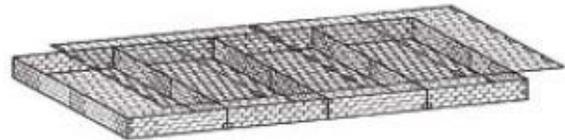


Figura 4. Gavión tipo colchón⁴.

Gaviones tipo saco

Existe un tercer tipo de gavión denominado saco utilizado principalmente en obras de emergencia, sumergidas, cuando van apoyadas sobre suelos de baja capacidad de soporte, o en lugares donde no es posible realizar una instalación en condiciones óptimas⁴.

Son elementos constituidos por un único paño de malla, que en sus bordes libres presentan

⁴ Ver Prodac, 2004, Soluciones para el control de la erosión.

⁴ Ver Prodac, 2004, Soluciones para el control de la erosión.

un alambre grueso que pasa alternativamente por las mallas.

Debido al contacto constante con el agua son fabricados en alambres con revestimiento pesado de zinc y protección adicional en material plástico.

A diferencia de los gaviones tipo caja o tipo colchón, los gaviones saco se arman fuera de la obra y con maquinaria pesada se colocan en su posición final⁴.

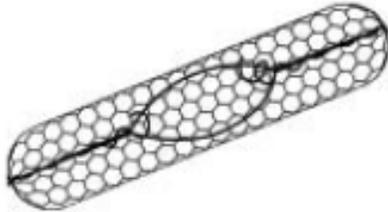


Figura 5. Gavión tipo saco⁴.

Características de los alambres

Todos los alambres que se utilizan para la fabricación, armado e instalación de los gaviones deben ser de acero dulce recocido de acuerdo con las normas de la Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT NBR) 8964 y de la American Society for Testing Materials (ASTM) 641, esto es, el alambre deberá tener una tensión de ruptura media de 38 a 48 kg/mm², cumpliendo con la siguiente proporción⁵:

Material Base

Carbono: % C 0.06 - 0.10

Fósforo: % P máx. 0.04

Azufre: % S máx. 0.05

Asimismo, todos los alambres deben ser revestidos con una aleación de zinc-5% aluminio (Zn 5 Al MM) de acuerdo con las especificaciones de la ASTM 856, esto es⁵:

Cuadro 3. Revestimiento del alambre⁵

Diámetro nominal del alambre (mm)	Mínimo peso de revestimiento (g/m ²)
2.2	240.0
2.4 y 2.7	260.0
3.0	275.0

El revestimiento de zinc debe adherir al alambre de tal forma que, después de que el alambre haya sido enrollado 15 veces por minuto alrededor de un mandril de diámetro igual a 3 veces el del alambre, no pueda ser escamado o removido con el dedo, de acuerdo con la especificación ASTM 641.

Los ensayos de elongación de los alambres deben ser hechos antes de la fabricación de la red, sobre una muestra de alambre de 30 cm de largo. La elongación no debe ser menor que 12%⁵.

Malla

La malla está constituida por una red tejida de forma hexagonal obtenida de entrecruzar dos hilos de alambre por tres medios giros (doble torsión), de acuerdo con las especificaciones NBR 10514 y ASTM 975⁵.

Debido a que las estructuras están sometidas a tensiones producidas por asentamientos diferenciales del terreno, empujes externos, entre otros, no se recomienda utilizar gaviones con aberturas de malla mayores a 8 x 10 cm. Una abertura de malla mayor reduciría el área de acero de los gaviones y provocaría, en consecuencia, el debilitamiento de la estructura⁵.

Experiencias de campo han demostrado que el rango de aberturas de las mallas (a x b en la figura 6) deben ser de 8 x 10 cm para las cajas y 6 x 8 cm para los colchones. Esta menor abertura para los colchones se debe a que como estos están, generalmente, ubicados en contacto con agua y sólidos que arrastran los ríos, deben resistir las exigencias físicas y mecánicas como el impacto, la tracción y la abrasión⁵.

⁴ Ver Prodac, 2004, Soluciones para el control de la erosión.

⁵ Ver Maccaferri, 2005, Gaviones y otras soluciones en malla hexagonal a doble torsión.

⁵ Ver Maccaferri, 2005, Gaviones y otras soluciones en malla hexagonal a doble torsión.

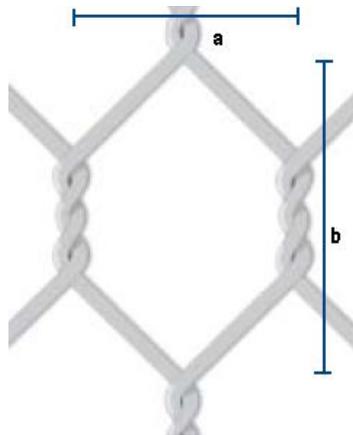


Figura 6. Abertura de la malla⁴.

La tolerancia en las dimensiones de la apertura de la malla es de $\pm 10\%$.

Los diámetros de los alambres usados en la fabricación de los gaviones dependen de las condiciones estructurales a los cuales estará sometida la estructura. Los productores de malla generalmente las proveen con alambre de 2.4 y 2.7 mm, además de un recubrimiento de PVC, cuando los gaviones requieran de una protección contra agentes corrosivos.

Alambre de bordes

Todas las aristas del gavión desdoblado, inclusive el lado superior de los laterales y de los diafragmas, deben ser de mayor diámetro que el de la malla, para que estos proporcionen mayor resistencia y consistencia a la unidad⁴. La unión entre el alambre de borde y la malla debe tener una resistencia mínima de 11.7 kN/m^5 .

Los diámetros usados se muestran a continuación:

Cuadro 4. Diámetro de los alambres para gaviones tipo caja⁴					
Tipo de alambre	Recubrimiento metálico diámetro (mm)			Recubrimiento PVC diámetro (mm)	
	Abertura de malla 8x10 cm				
Malla	2.40	2.70	3.00	3.50	3.70
Borde	3.00	3.40	3.90	4.10	4.10
Amarres y tensores	2.20	2.20	2.20	3.20	3.20

Cuadro 5. Diámetro de los alambres para gaviones tipo colchón⁴						
Tipo de alambre	Recubrimiento metálico diámetro (mm)			Recubrimiento PVC diámetro (mm)		
	Abertura de malla (cm)					
	6x8	8x10		6x8	8x10	
Malla	2.20	2.70	3.00	3.20	3.50	3.70
Borde	2.70	3.40	3.90	3.70	4.10	4.40
Amarres y tensores	2.20	2.20	2.20	3.20	3.50	3.20

Alambre para amarres y tensores

Los alambres para amarres se utilizan para coser las mallas hexagonales que formarán el gavión, así como para la unión de los mismos para conformar las estructuras deseadas. El alambre de los tensores es aquel que se usa para evitar las deformaciones, principalmente, en la cara visible del muro de gaviones.

Junto con las mallas de gavión es provista una cantidad suficiente de alambre para amarres y tensores. Este alambre debe tener un diámetro de 2.2 mm y su cantidad, en relación al peso de los gaviones, es de 8% para los de 1.0 m de altura y de 6% para los de 0.5 m de altura.

Recubrimiento plástico

Es una camada de compuesto termoplástico a base de PVC, que sirve de recubrimiento al alambre zincado. Sus características, de acuerdo

⁴ Ver Prodac, 2004, Soluciones para el control de la erosión.

⁵ Ver Maccaferri, 2005, Gaviones y otras soluciones en malla hexagonal a doble torsión.

⁴ Ver Prodac, 2004, Soluciones para el control de la erosión.

con las especificaciones NBR 10514 y ASTM 975, son las siguientes⁵:

Espesor mínimo: 0.4 mm,
 Peso específico: 1.30 a 1.35 kg/dm³,
 Dureza: 50 a 60 Shore D,
 Resistencia a la tracción: mayor que 210 kg/cm²,
 Elongación de ruptura: mayor que 250%,
 Temperatura de fragilidad: menor que -9°C.

Tolerancias

Se admite una tolerancia en el diámetro del alambre zincado de $\pm 2.5\%$. A su vez, las tolerancias tanto en el largo, ancho y altura de los gaviones tipo caja y tipo colchón son las siguientes:

Gavión tipo caja: largo $\pm 3\%$; ancho y altura $\pm 5\%$.
 Gavión tipo colchón: largo y ancho $\pm 5\%$; y altura $\pm 10\%$ ⁵.

Gaviones electrosoldados

Los gaviones electrosoldados son estructuras formadas por alambres con galvanización pesada, eléctricamente soldados que forman unidades eficientes y económicas. Este gavión forma una unidad de acero, roca y suelo con la cual se obtiene una estructura flexible⁴. Se fabrican en las siguientes dimensiones:

Cuadro 6. Dimensiones del gavión electrosoldado⁴			
Tipo	Largo (m)	Ancho (m)	Altura (m)
G-0.90	3.0	1.0	0.3
G-1.00	2.0	1.0	0.5
G-1.35	3.0	1.5	0.3
G-1.50	3.0	1.0	0.5
G-1.80	3.0	2.0	0.3
G-2.00	2.0	1.0	1.0
G-2.25	3.0	1.5	0.5
G-3.00	3.0	1.0	1.0
G-4.50	3.0	1.5	1.0

Las mallas están constituidas por alambres que forman aberturas ortogonales, cuyo módulo puede ser de 75 x 75 mm (3" x 3") y de

⁵ Ver Maccaferri, 2005, Gaviones y otras soluciones en malla hexagonal a doble torsión.

⁴ Ver Prodac, 2004, Soluciones para el control de la erosión.

100 x 100 mm (4" x 4"). Los diámetros de los alambres usados en la fabricación de los gaviones electrosoldados dependen de las condiciones a las cuales estará sometida la estructura. De acuerdo con experiencias de campo de la empresa Productos de Acero Cassado S.A. (PRODAC), fabricante de gaviones electrosoldados, se recomiendan los siguientes calibres:
 BWG # 11 (Diámetro 3.05 mm).
 BWG # 10 (Diámetro 3.40 mm).
 BWG # 8 (Diámetro 4.20 mm).

Ensayos y pruebas

Se han realizado investigaciones sobre el comportamiento de los gaviones y productos en malla hexagonal a doble torsión a través de ensayos sobre modelos y en escala real en varios países como Italia, Inglaterra, Francia, Estados Unidos y Argentina.

Entre las distintas pruebas se puede destacar la prueba de resistencia sobre modelos y en escala real para la obtención de las características mecánicas de los gaviones (figura 7).



Figura 7. Prueba de resistencia de los gaviones⁵.

⁵ Ver Maccaferri, 2005, Gaviones y otras soluciones en malla hexagonal a doble torsión.

Ventajas de los gaviones

Flexibilidad

Las estructuras en gaviones, debido a su flexibilidad, permiten asentamientos y deformaciones sin perder su eficiencia y función estructural. Esta propiedad es, esencialmente, importante cuando la obra debe soportar grandes empujes del terreno y, a la vez, está fundada sobre suelos inestables o expuestos a grandes erosiones. Al contrario de las estructuras rígidas, el colapso no ocurre de manera repentina, lo que permite acciones de recuperación eficientes⁴.

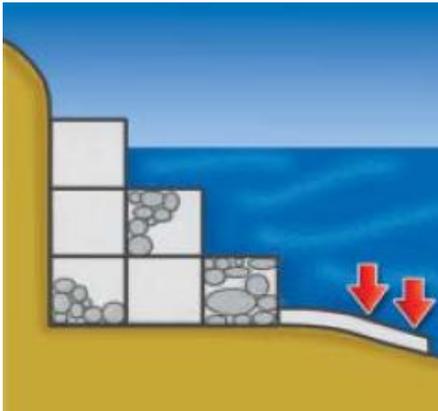


Figura 8. Flexibilidad de los muros de gaviones⁴.

muro, para evitar que el material fino penetre en el gavión, y obstruya el paso de las aguas. Este material drenante deberá estar constituido por partículas con tamaños comprendidos entre el tamiz de 19 mm (3/4") y el de 75 mm (3"), y el porcentaje pasando el tamiz #200 deberá ser menor o igual al 3%. De esta manera se garantiza que no se generarán presiones hidrostáticas, a largo plazo, para las cuales el muro no ha sido diseñado.

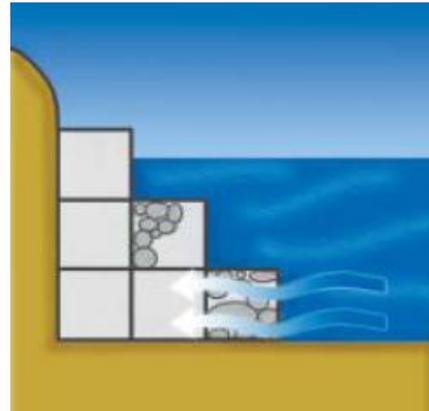


Figura 9. Permeabilidad de los muros de gaviones⁴.

Permeabilidad

Los gaviones, al estar constituidos por malla y bloques sanos de roca, son estructuras altamente permeables, lo que impide que se generen presiones hidrostáticas. Del mismo modo se constituyen como drenes que permiten la evacuación de las aguas de percolación, optimizando así las secciones de dichas estructuras⁴.

Sumado a lo anterior, es recomendable la utilización de geotextil sobre toda el área de contacto suelo-muro, o bien, la colocación de un material granular, como filtro, en la espalda del

⁴ Ver Prodac, 2004, Soluciones para el control de la erosión.

Durabilidad

Debido a la presencia de la malla de acero, el peso propio y el carácter monolítico, las estructuras en gaviones son capaces de resistir esfuerzos de tracción y empujes generados por el terreno y cargas adyacentes. Los recubrimientos de protección de los alambres utilizados en la fabricación de los gaviones garantizan la vida útil de los mismos.

La triple capa de zinc o "galvanización pesada", asegura una buena protección contra los fenómenos de corrosión y abrasión. La protección adicional del alambre con material plástico

⁴ Ver Prodac, 2004, Soluciones para el control de la erosión.

garantiza la integridad de la estructura en presencia de ambientes corrosivos o contaminados.

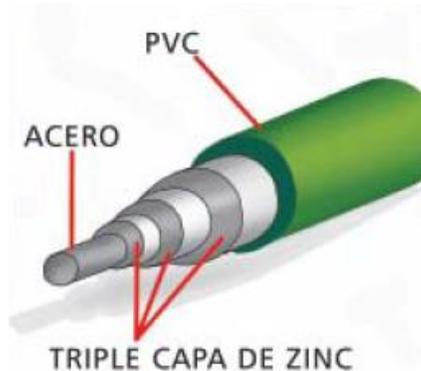


Figura 10. Recubrimiento del alambre de la malla de gaviones⁴.

Estética e integración al ambiente

Los muros de gaviones se integran de forma natural a su entorno, no constituyen obstáculos al paso de las aguas y están constituidos por materiales inertes que favorecen el crecimiento de vegetación conservando el ecosistema existente⁴.

Economía

Cuando son comparados con otras técnicas constructivas, los muros de gaviones presentan costos más bajos. La facilidad de armado de los gaviones hace que estos no requieran mano de obra especializada. Las herramientas necesarias son simples (cizallas, alicates, etc.), logrando altos rendimientos en la instalación. Los bloques de relleno, muchas veces, son extraídos del mismo lugar donde se efectúa la instalación, influyendo a favor de la reducción del costo final de la obra. Además, elimina por completo la necesidad de costosas fundaciones profundas.

Según datos de la empresa Maccaferri, para alturas iguales, el costo de construir un muro de concreto reforzado es de 1.5 a 2 veces más alto que el de construir un muro de gaviones.

⁴ Ver Prodac, 2004, Soluciones para el control de la erosión.

Resistencia

Los materiales con los cuales se fabrican los gaviones deben cumplir con los estándares internacionales de calidad exigidos, (como las normas NBR y ASTM descritas anteriormente) asegurando, de esta forma, un 100% de confiabilidad⁴. Se debe velar, entre otras cosas, por los calibres de los alambres y la abertura de las mallas.

Versatilidad

Por la naturaleza de los materiales que se emplean en los gaviones, estos permiten su construcción de manera manual o mecanizada en cualquier condición climática, ya sea en presencia de agua o en lugares de difícil acceso. Su construcción es rápida y después de haber sido montados, rellenos y cerrados, están listos para desarrollar su función. Del mismo modo, permite su ejecución por etapas y una rápida reparación si se produjera algún tipo de falla⁴.

Diseño de muros de gaviones

Los muros de gaviones trabajan como muros de gravedad, siendo su función principal la de soportar los empujes laterales del terreno. Específicamente, estas estructuras son diseñadas para el empuje activo del terreno, dado que por su flexibilidad, es de esperar que se den las deformaciones del suelo suficientes para que se alcance esta condición, con la correspondiente reducción de la resistencia cortante, en relación a la condición de reposo.

Por otra parte, se debe tener presente que el muro en sí, es una estructura drenante, por eso no es posible que se generen empujes a causa del agua. Sin embargo, debe verificarse esta condición en sitio, de manera que se tenga garantía de que no existan elementos que

⁴ Ver Prodac, 2004, Soluciones para el control de la erosión.

permitan la acumulación de agua tras el muro, con los consecuentes empujes horizontales².

En Mecánica de Suelos se admite que la resistencia al corte de los suelos sigue el criterio de falla de Mohr-Coulomb, según el cual la resistencia en cualquier plano de falla potencial dentro del suelo es función del esfuerzo normal efectivo que actúa sobre él. Sin embargo, debido a la dificultad de realizar el análisis de esfuerzos efectivos a corto plazo en suelos de baja permeabilidad, a menudo se recurre utilizar los esfuerzos totales⁶.

La resistencia al corte en el plano de falla potencial puede ser cuantificada por la siguiente expresión:

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \dots (Ec.1)$$

Donde:

τ = resistencia al corte total en el plano de falla.

c = cohesión total del suelo.

ϕ = ángulo de fricción total del suelo.

σ = esfuerzo normal total en el plano de falla.

Determinación del empuje

El empuje de tierra es la resultante de las presiones laterales ejercidas por el suelo sobre una estructura de sostenimiento o de fundación. Estas presiones son debidas al peso propio del suelo y a sobrecargas aplicadas sobre él.

La magnitud del empuje sobre una estructura depende, fundamentalmente, de la deformación que esta sufre bajo la acción del empuje. De esta manera, si se utiliza un elemento vertical móvil que soporta un desnivel de suelo, es posible verificar que la presión ejercida por el suelo sobre el elemento varía con el desplazamiento del mismo³.

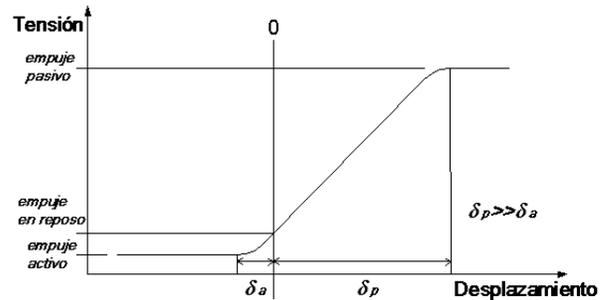


Figura 11. Empuje de suelo sobre un elemento móvil⁷.

Cuando el elemento se aleja del suelo sostenido, ocurre una disminución del empuje hasta un valor mínimo. Esta condición se obtiene con un pequeño desplazamiento del elemento y es llamado estado activo. El empuje actuante en ese instante, entonces, es llamado empuje activo. Si por el contrario, el elemento es desplazado contra el suelo sostenido, habrá un aumento del empuje hasta un valor máximo, en el cual se desarrollará la resistencia total del suelo. A este valor máximo se le llama empuje pasivo y la condición de deformación en que ocurre se conoce como estado pasivo. A diferencia del estado activo, el estado pasivo solo es alcanzado después de un desplazamiento mucho mayor del elemento³.

En el caso de que el elemento se mantenga inmóvil en su posición inicial, el empuje, conocido como empuje en reposo, se mantendrá entre los valores del empuje activo y del empuje pasivo. Esta condición no representa un desarrollo completo de la resistencia del suelo.

Como se mencionó anteriormente, los muros de contención de gravedad permiten una deformación del suelo suficiente para que se alcance la condición del estado activo. Por lo tanto, deben ser diseñados sobre la acción del empuje activo.

Teoría de Rankine

Al analizar el estado de tensión de una porción de suelo localizada a una profundidad z junto al elemento vertical de la figura 12, se puede determinar el esfuerzo total vertical σ_v definido por:

² Ver Tapia, 2006, Diseño geotécnico.

⁶ Ver Asociación Costarricense de Geotecnia, 2003, Código de Cimentaciones de Costa Rica.

³ Ver Maccaferri, 2003, Gawac BR-2.0.

⁷ Ver Maccaferri, 2005, Estructuras en suelo reforzado con el sistema Terramesh.

³ Ver Maccaferri, 2003, Gawac BR-2.0.

$$\sigma_v = \gamma z \dots (Ec.2)$$

Mientras el elemento permanece en reposo, la tensión horizontal actuante sobre él es indeterminada, pero cuando el suelo llega a la deformación de estado activo esta tensión puede ser determinada por la envolvente de la resistencia del material³, como se muestra en la figura 12. En este instante, la tensión horizontal está dada por:

$$\sigma_h = k_a \gamma z - 2c \sqrt{k_a} \dots (Ec.3)$$

Donde:

$$k_a = \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} \right) \dots (Ec.4)$$

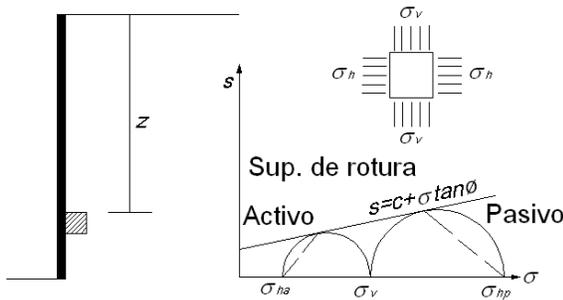


Figura 12. Determinación de la presión horizontal³.

A través de este resultado, se puede determinar el valor del empuje activo resultante sobre el elemento:

$$P_a = \frac{1}{2} K_a \gamma H^2 - 2cH \sqrt{k_a} \dots (Ec.5)$$

Donde H es la altura total del desnivel del suelo. En caso de desplazamiento contra el suelo hasta alcanzar el estado pasivo, se tiene que:

$$\sigma_h = k_p \gamma z + 2c \sqrt{k_p} \dots (Ec.6)$$

Donde:

$$k_p = \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right) \dots (Ec.7)$$

Entonces, el empuje pasivo está dado por:

$$P_p = \frac{1}{2} K_p \gamma H^2 + 2cH \sqrt{k_p} \dots (Ec.8)$$

Las ecuaciones anteriores son válidas en caso que el terreno soportado esté formado por una sola camada de suelo (suelo homogéneo). Cuando el terreno soportado está constituido por varias camadas de suelos diferentes, se debe determinar un empuje debido a cada una de las camadas, y el empuje total que actúa sobre el elemento es determinado por la suma vectorial de los diferentes empujes.

La teoría de Rankine no considera esfuerzos de fricción entre las paredes del muro y el relleno. Por tal motivo, las presiones activas o pasivas calculadas tienen una inclinación respecto al paramento de la estructura igual a la inclinación del terraplén. Por lo tanto, si el terraplén es horizontal, las presiones serán también horizontales.

Teoría de Coulomb

Para el cálculo del empuje de tierras se utiliza, por lo general, el método de Coulomb. Este se basa en que en el instante del desarrollo final de la resistencia del suelo se forman superficies de deslizamiento o de rotura, que delimitarán una porción del terreno que se desplazará en relación al resto³.

³ Ver Maccaferri, 2003, Gawac BR-2.0.

³ Ver Maccaferri, 2003, Gawac BR-2.0.

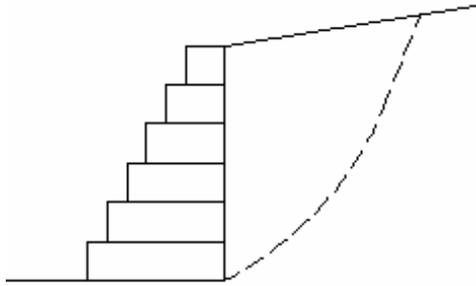


Figura 13. Superficie de rotura³.

Si esta porción de suelo se considera como un cuerpo rígido, el empuje puede, entonces, ser determinado del equilibrio de fuerzas actuantes sobre este cuerpo rígido. El método de Coulomb asume que las superficies de rotura son planas y el empuje es aquel que actúa sobre la más crítica de estas superficies³.

La ventaja de este método reside en el hecho de que se puede considerar la influencia de la fricción entre la estructura y el suelo, además de posibilitar el análisis de estructuras con un paramento no vertical³.

Las fuerzas que actúan sobre la cuña de suelo formada en estado activo, se muestran en la figura 14. Estas fuerzas son su peso propio, la reacción del terreno, que debido a la fricción interna tiene una inclinación δ en relación a la superficie de rotura, y el empuje activo que exhibe, también, una inclinación δ en relación al paramento de la estructura³.

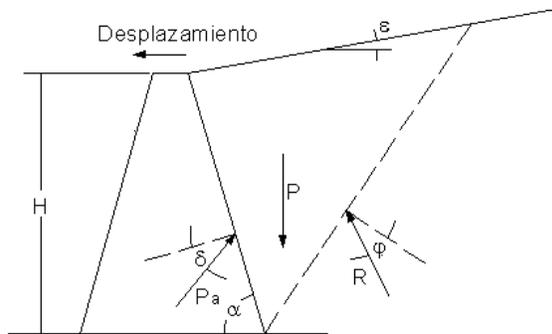


Figura 14. Fuerzas actuantes sobre la cuña de suelo³.

La superficie más crítica es aquella que lleva el valor del empuje activo a un máximo, y, en

caso que el suelo sea homogéneo, está dado por la ecuación:

$$P_a = \frac{1}{2} K_a \gamma H^2 \dots (Ec.9)$$

La misma se localiza a una altura H/3 sobre la base del muro.

En el estado pasivo hay una inversión de las inclinaciones de las fuerzas actuantes debido a la inversión en el sentido del desplazamiento de la estructura y la superficie más crítica es aquella que lleva el valor del empuje pasivo a un mínimo, y, en caso de suelo homogéneo, está dado por la ecuación:

$$P_p = \frac{1}{2} K_p \gamma H^2 \dots (Ec.10)$$

En tales condiciones, tanto el empuje activo como el pasivo son resultado de una distribución triangular de presiones laterales: entonces, el punto de aplicación de este último, también está localizado a una altura H/3 de la base de la estructura. Si el terreno soportado estuviese constituido por varias camadas de suelos diferentes, los empujes podrían tomar una distribución de presiones laterales trapezoidal, y su punto de aplicación se puede determinar como el centro de gravedad de dichas presiones.

En el caso de que haya una sobrecarga uniforme distribuida sobre el terraplén, esta provocará un aumento en el valor del empuje. Este aumento se determina sumando la resultante de la sobrecarga que actúa sobre la superficie de rotura al peso propio de la cuña.

Efecto de la cohesión del suelo

En caso que el suelo que compone el terreno sostenido sea cohesivo, surge una fuerza resistente adicional C que actúa sobre la superficie de rotura. Esta fuerza se determina multiplicando la cohesión del suelo por la longitud de la superficie de rotura³.

³ Ver Maccaferri, 2003, Gawac BR-2.0.

³ Ver Maccaferri, 2003, Gawac BR-2.0.

Además, en el estado activo surgen tensiones en la parte superior del terraplén. Estas tensiones generan la aparición de grietas de tracción que disminuyen el área útil resistente de la superficie de rotura, aumentando el empuje sobre la estructura de contención³. Para efectos de diseño, la profundidad de estas grietas z_0 se calcula como:

$$z_0 = \frac{2c}{\gamma} \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right) \dots (Ec.11)$$

De esta forma, la posición más crítica para la ocurrencia de una grieta de tracción es al final de la superficie de rotura, disminuyéndola (Figura 15). En el diseño, el uso de las grietas de tracción se debe a la incapacidad del suelo de soportar esfuerzos de tensión, por lo que se elimina la porción del terreno sometido a esta condición. Por lo tanto, el resultado de la ecuación 11 no debe entenderse como la profundidad real de la grieta de tracción, sino como una estimación de diseño para no considerar la resistencia a tensión del suelo.

Las fuerzas que actúan sobre una cuña de suelo cohesivo, formada por la superficie de rotura y la grieta de tracción, se pueden ver a continuación:

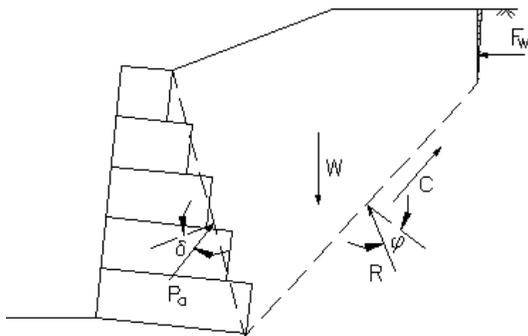


Figura 15. Fuerzas actuantes sobre la cuña de suelo cohesivo³.

Efecto sísmico

Durante un movimiento sísmico, el empuje activo sufre un incremento debido a las aceleraciones

³ Ver Maccaferri, 2003, Gawac BR-2.0.

horizontales y verticales del suelo. Estas aceleraciones provocan la aparición de fuerzas de inercia en las direcciones horizontal y vertical que deben ser consideradas en el equilibrio de fuerzas³.

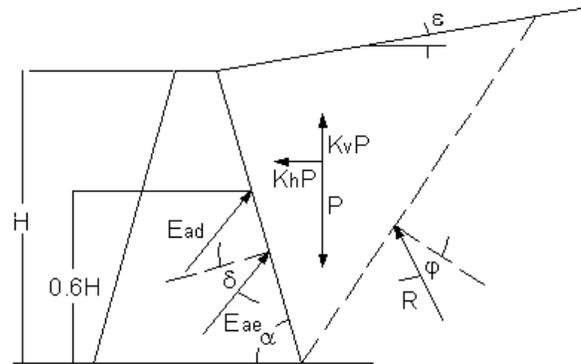


Figura 16. Fuerzas debidas al sismo³.

Estas aceleraciones, normalmente, son expresadas en relación con la aceleración de la gravedad y son función del riesgo sísmico de la zona. Por lo tanto, las fuerzas de inercia serán calculadas como fracción de la fuerza del peso de la cuña de suelo:

$$I_h = K_h P \dots (Ec.12)$$

y

$$I_v = K_v P \dots (Ec.13)$$

Donde K_h y K_v son los coeficientes de aceleración horizontal y vertical. Si hubiese cargas aplicadas sobre el terraplén, se deberían adicionar también las fuerzas de inercia para estas cargas.

Los valores de los coeficientes de aceleración son, usualmente, indicados por normas específicas para cada país en función del riesgo sísmico local. Para el caso de Costa Rica, los valores recomendados de K_h y K_v varían entre 0.15 y 0.25⁷.

El empuje activo calculado, en este caso, tiene dos componentes. El primero, indicado como E_{ae} en la figura 16, es el empuje estático que tiene su punto de aplicación sobre la estructura según lo indicado en los ítemes anteriores. La segunda

³ Ver Maccaferri, 2003, Gawac BR-2.0.

⁷ Ver Laporte, 2007, Propuesta para la escogencia del coeficiente dinámico para el análisis pseudoestático de estabilidad de taludes.

parte E_{ad} es el efecto del sismo y su punto de aplicación se ubica a $0,6 H$ de la base del muro³.

Efecto de la superficie freática

La presencia de una superficie freática en el interior del macizo sostenido provoca un aumento en el valor del empuje activo. Esto se debe a la aparición de una fuerza U generada por la presión del agua que actúa sobre la superficie de falla.

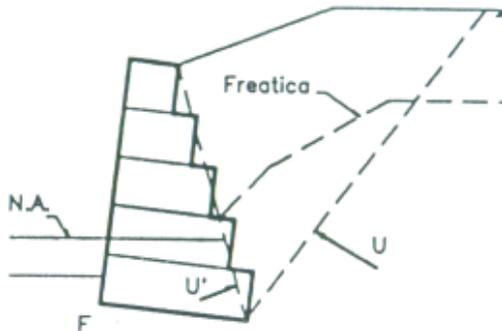


Figura 17. Presiones generadas por la superficie freática³.

Para la determinación de U se calcula la presión del agua a lo largo de la superficie de falla. Esta presión se toma como la diferencia de altura entre cada punto de las superficies freática y de falla. La fuerza U se determina entonces como la integral de esas presiones³.

La presencia del nivel freático también influye en el peso de la cuña de suelo. El suelo, por debajo de este nivel, se supone saturado y, por lo tanto, tiene un peso específico mayor.

Si el muro estuviese parcialmente sumergido, como en el ejemplo de la figura 17, se debería considerar también la fuerza U' causada por la presión de agua sobre la superficie de empuje. El efecto de esta fuerza es una disminución del empuje activo total³.

Determinación del empuje pasivo

Al moverse, bajo el efecto del terreno sostenido, la estructura puede encontrar cierta resistencia del suelo que está frente a él. En ese punto, se forma

un estado pasivo que sirve como obstáculo al deslizamiento de la estructura (figura 18). Esta fuerza resistente puede ser calculada por los mismos métodos descritos anteriormente, específicamente, por medio de las ecuaciones 6, 7, 8, y 10.



Figura 18. Efecto del empuje pasivo³.

Es importante notar que, no en todos los casos, se puede contar con esta fuerza resistente. Si se ejecutara una excavación o se produjera una erosión, esta fuerza podría ser disminuida o incluso podría llegar a anularse³. Algunos diseñadores, de manera conservadora, no contemplan el empuje pasivo en el análisis.

Selección preliminar del esquema del muro

Para iniciar el análisis, debe suponerse una cierta geometría del muro. Para ello, es importante tener idea del peso específico de los gaviones. Este varía según el tipo de bloques de roca que se utilicen para rellenar las cajas de gaviones, así como el grado de acomodo que se logre, lo cual depende de la habilidad del operador y de la forma de los bloques². Además, se debe conocer la altura total que deberá tener el muro y el espacio disponible para la base.

Es recomendable contemplar un ángulo de rotación del muro hacia el interior del terreno, con el fin de disminuir el empuje activo. El ángulo de rotación varía en un rango de 0° y 20° , siendo 6° el valor más utilizado.

³ Ver Maccaferri, 2003, Gawac BR-2.0.

³ Ver Maccaferri, 2003, Gawac BR-2.0.

² Ver Tapia, 2006, Diseño geotécnico.

Verificaciones del muro

Una vez establecida la geometría inicial del muro, se procede a realizar las verificaciones de la estabilidad contra los diversos tipos de falla. En el caso de los muros de gaviones, los tipos principales de falla que pueden presentarse son los mostrados en la figura 19.

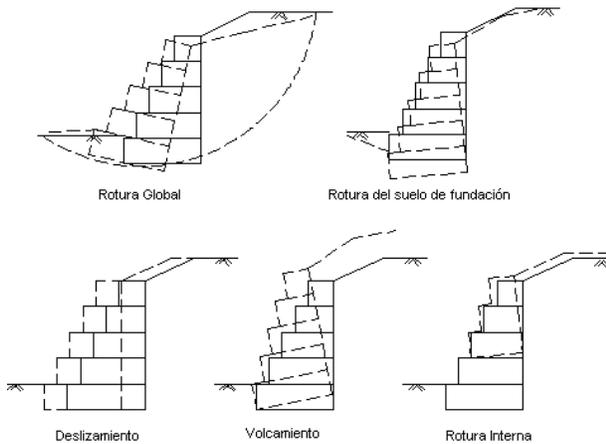


Figura 19. Tipos de falla de muros de gaviones³.

Si sobre el terraplén se pretende construir una estructura, como un pavimento, también es importante considerar los asentamientos que sufriría el muro de gaviones, para determinar hasta qué punto, estos afectarían la serviciabilidad de dicha estructura.

Seguridad contra el deslizamiento

El deslizamiento de la estructura ocurre cuando la resistencia al deslizamiento a lo largo de la base del muro de contención, sumada al empuje pasivo disponible en su frente, no son suficientes para contraponerse al empuje activo³ (fuerzas desestabilizadoras menores a las fuerzas estabilizadoras).

En este caso, se debe tener un adecuado factor de seguridad cuando se comparan las fuerzas resistentes con las fuerzas que tienden a producir el deslizamiento.

$$FS_{desl} = \frac{\sum F_R}{\sum F_d} \dots (Ec.14)$$

Las fuerzas resistentes corresponden a:

$$\sum F_R = fN + cB + P_p \cos \delta \dots (Ec.15)$$

Donde:

fN = Componente de fricción.

cB = Componente de cohesión.

$P_p \cos \delta$ = Componente horizontal de la resistencia pasiva.

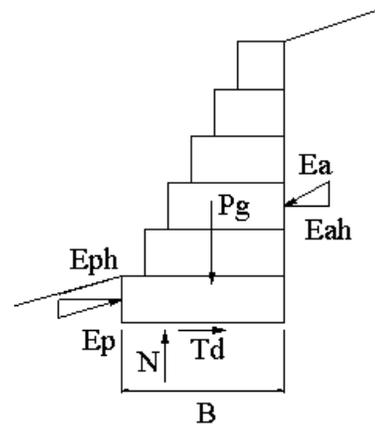


Figura 20. Verificación de estabilidad contra el deslizamiento³.

El valor de la fuerza normal está dada por:

$$N = W_m + W_t + P_a \sin \delta + P_o l \dots (Ec.16)$$

Donde:

W_m = Peso del muro.

W_t = Peso del terreno.

$P_a \sin \delta$ = Componente vertical de la presión activa.

P_o = Valor de la sobrecarga.

l = Ancho de la sobrecarga.

El peso específico de los gaviones puede ser estimado con la siguiente ecuación, donde n es la porosidad de los gaviones, que puede variar

³ Ver Maccaferri, 2003, Gawac BR-2.0.

³ Ver Maccaferri, 2003, Gawac BR-2.0.

entre 0.3 y 0.4¹, y γ_b es el peso específico de los bloques de relleno.

$$\gamma_g = (1 - n)\gamma_b \dots (Ec.17)$$

El coeficiente de fricción f entre el suelo y los gaviones puede ser tomado igual a $\tan(2\phi/3)$ ⁶. En caso que se emplee geotextil en la base del muro, el ángulo ϕ debe ser reducido según el criterio del diseñador. Si se utiliza una subbase de concreto por debajo de la fundación (primera fila de gaviones), podría usarse $f=0.64$ ². La fuerza que provoca el deslizamiento es:

$$\sum F_d = P_a \cos \delta \dots (Ec.18)$$

El valor del factor de seguridad, dado por la ecuación anterior, debe ser superior a 1.5⁶.

Seguridad contra el vuelco

Se debe hacer una sumatoria de momentos para verificar la estabilidad contra el vuelco. De manera similar al índice anterior, el FS_{volc} relaciona los momentos de giro a favor de la falla (o momentos volcantes) y los momentos que se oponen a ella (o momentos resistentes). Estos momentos son determinados en relación con el extremo inferior izquierdo (talón) de la base del muro, porque es el punto de rotación en el volcamiento.

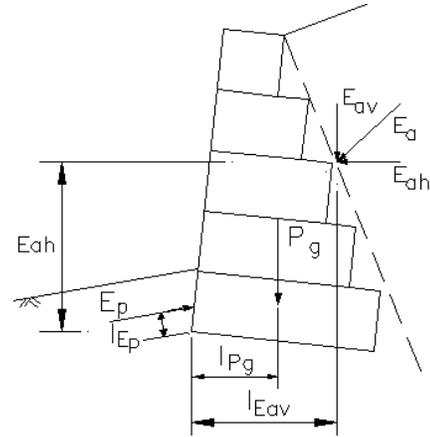


Figura 21. Verificación de la estabilidad contra el vuelco³.

Su expresión matemática es la siguiente:

$$FS_{volc} = \frac{\sum M_R}{\sum M_o} \dots (Ec.19)$$

El momento desestabilizador está dado por:

$$M_o = P_a I_a \dots (Ec.20)$$

Donde:

I_a = Brazo de palanca del empuje activo respecto al punto de rotación del muro.

Y el momento resistente está dado por:

$$M_R = W I_w + P_p I_p \dots (Ec.21)$$

Donde:

I_w = Brazo de palanca del peso propio del muro respecto a su punto de rotación.

I_p = Brazo de palanca del empuje pasivo respecto al punto de rotación del muro.

$$P_p = \frac{1}{2} K_p \gamma_2 D^2 + 2c_2 D \sqrt{K_p} \dots (Ec.22)$$

¹ Ver Prodac, 2004, Pirka Soft 1.0.

⁶ Ver Asociación Costarricense de Geotecnia, 2003, Código de Cimentaciones de Costa Rica.

² Ver Tapia, 2006, Diseño geotécnico.

³ Ver Maccaferri, 2003, Gawac BR-2.0.

D es la altura del suelo frente al muro, y γ_2 es el peso unitario del mismo. La ecuación 22 asume que el suelo que proporciona resistencia pasiva es homogéneo.

El valor del factor de seguridad contra el vuelco debe ser mayor a 1.5 si el relleno es granular, y a 2.0 si el relleno es cohesivo⁶.

Excentricidad

Otro parámetro para evaluar la estabilidad de la estructura es la excentricidad, la cual indica la posición de la fuerza resultante respecto al eje central de la base de cimentación. Su cálculo se realiza a través de la siguiente ecuación:

$$e = \frac{B}{2} - \frac{M_r - M_o}{\sum F_y} \dots (Ec.23)$$

Donde:

B = Base de la cimentación del muro.

M_r = Momento resistente.

M_o = Momento volcante.

$\sum F_y$ = Sumatoria de fuerzas verticales.

Es conveniente, por razones de estabilidad, que la resultante de fuerzas sobre la estructura caiga dentro del tercio central de la base; es decir, se debe cumplir la siguiente relación:

$$|e| < B/6 \dots (Ec.24)$$

Debido a la flexibilidad de las estructuras de gaviones, sin embargo, se admite algún desvío de la fuerza total respecto al tercio central de la base.

Esfuerzos sobre el terreno

Debe revisarse la capacidad soportante de la cimentación del muro.

La capacidad de carga admisible (σ_a), es la máxima presión que se puede permitir en un

⁶ Ver Asociación Costarricense de Geotecnia, 2003, Código de Cimentaciones de Costa Rica.

suelo de fundación, usualmente, para limitar el asentamiento.

Las presiones que ejerce la estructura sobre su base (σ), no deben ser superiores a la capacidad de carga admisible del suelo de fundación (σ_a). Estas presiones se calculan a través de la siguiente ecuación:

$$\sigma = \frac{N}{B} \left(1 \pm 6 \frac{e}{B}\right) \dots (Ec.25)$$

Donde:

N = Fuerza resultante normal a la base del muro.

e = excentricidad.

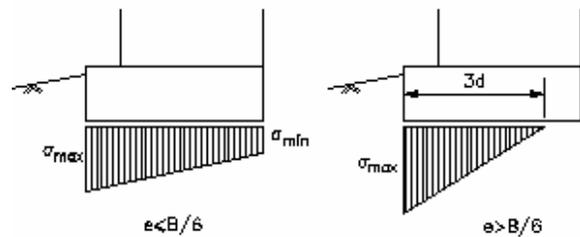


Figura 22. Distribución de presiones en la base del muro³.

Según esta expresión, la distribución de presiones es trapezoidal: la presión en el talón del muro es calculada por la ecuación con el signo positivo; mientras la presión en la punta del muro es calculada con el signo negativo. La relación anterior para el cálculo de σ , es válida para los casos donde la excentricidad cae en el tercio central de la base ($e < B/6$). Cuando ocurra lo contrario ($e > B/6$), se aplica la siguiente relación:

$$\sigma = \frac{2N}{3d} \dots (Ec.26)$$

Donde:

d = Posición de la fuerza resultante en la base del muro, medida desde el punto de giro: el talón del muro.

En este caso, la distribución de presiones es triangular, la presión en un extremo es

³ Ver Maccaferri, 2003, Gawac BR-2.0.

calculada por la ecuación anterior, mientras la presión en el otro extremo es nula. Esto implica que las presiones provenientes de la estructura no se distribuyen en todo el ancho del muro, sino solo en una longitud menor b , equivalente a:

$$b = \frac{3}{2}(B - 2e)...(Ec.27)$$

Lo anterior se puede observar en la figura 22, cuando la distribución de presiones es triangular: no toda la base del muro es utilizada para transmitir las cargas hacia la cimentación. En este caso, σ_{max} es mayor al σ_{max} de la distribución trapezoidal, por lo que el terreno se verá sometido a un esfuerzo mayor. Justamente, el efecto de $\sigma_{min} > 0$ en la distribución trapezoidal es que reduce la magnitud de σ_{max} . Debido a esto, se debe evitar una distribución de presiones triangular (cuando $e > B/6$).

Estabilidad global

Además de los tipos de falla citados anteriormente, todavía puede ocurrir la falla del terreno a lo largo de una superficie que no toca la estructura de contención. Este tipo de deslizamiento es similar al que ocurre en taludes, por lo tanto, los métodos utilizados en el análisis de estabilidad de taludes aplican también en este caso³.

En términos generales, el análisis de la falla global o del conjunto muro suelo es, especialmente necesario, cuando el talud del terreno es importante y puede acarrear problemas de estabilidad. En terrenos planos no es del todo necesario realizar esta prueba, pues, generalmente, no se espera una falla de ese tipo¹.

Para realizar el análisis de la estabilidad global, los fabricantes de gaviones, Prodac y Maccaferri, utilizan el método de Bishop, que adopta superficies de rotura cilíndricas. De esta manera, se verifican los posibles arcos de rotura que atraviesan el terraplén y la fundación, contorneando el muro de contención.

La parte del terreno delimitada por cada uno de estos arcos está dividida en dovelas y se

calcula el coeficiente de seguridad a lo largo de esa superficie.

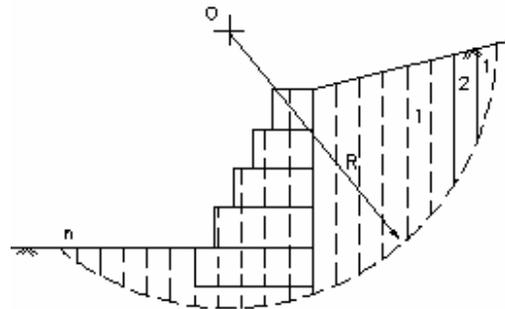


Figura 23. Método de las dovelas³.

Primeramente, se asume una superficie de falla cilíndrica arbitraria. Las fuerzas que actúan sobre cada una de las franjas se muestran en la figura 24.

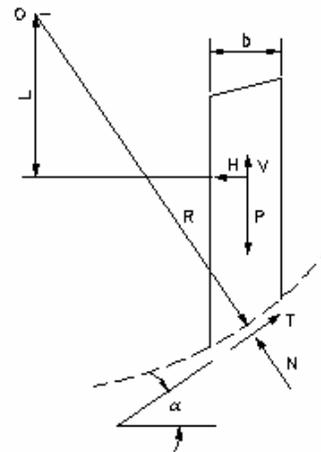


Figura 24. Geometría y fuerzas que actúan en las dovelas³.

De este modo, el factor de seguridad contra la falla global viene dado por la siguiente ecuación:

³ Ver Maccaferri, 2003, Gawac BR-2.0.

¹ Ver Prodac, 2004, Pirka Soft 1.0.

³ Ver Maccaferri, 2003, Gawac BR-2.0.

$$F_s = \frac{\sum \left(\frac{cb + P \tan \phi}{\cos \alpha + \frac{\text{sen} \alpha \tan \phi}{F_s}} \right)}{\sum (P \text{sen} \alpha)} \dots (\text{Ec.28})$$

Como el factor de seguridad aparece en ambos lados de la ecuación, su determinación es iterativa. Se deben buscar varias superficies de rotura hasta encontrar la más crítica (menor valor de F_s). Como para la identificación de una superficie de falla son necesarios tres parámetros (posición horizontal y vertical del centro O además de la magnitud del radio de giro), esta búsqueda es bastante laboriosa por lo que se hace necesario el uso de programas de computación para determinar el factor de seguridad crítico del sistema.

Incluyendo las consideraciones de sismo, se requiere un factor de seguridad contra la falla global superior a 1.2².

Estabilidad interna

La posibilidad de la rotura interna del muro de gaviones también debe ser verificada. Este podría sufrir esfuerzos internos excesivos provocados por las cargas de empuje y las sobrecargas aplicadas. En el caso específico de los gaviones, se debe garantizar la seguridad contra el deslizamiento de las camadas superiores sobre las inferiores³.

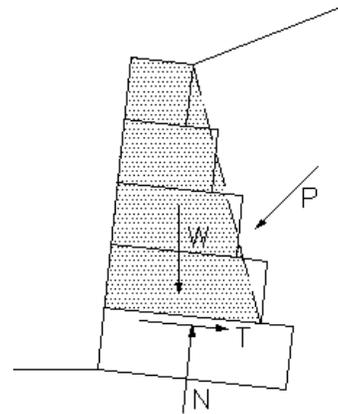


Figura 25. Análisis de la estabilidad interna de muros de gaviones³.

Para realizar este análisis, se debe determinar el empuje activo que actúa en la parte del muro encima de la sección analizada. Seguidamente, se calculan las tensiones de corte y normales máximas que actúan en la sección. La tensión de corte será:

$$\tau = \frac{T}{B} \dots (\text{Ec.29})$$

Donde:

T = Fuerza de corte que actúa sobre la sección analizada.

B = Ancho de la sección analizada.

y la tensión normal máxima:

$$\sigma_{\max} = \frac{N}{2d} \dots (\text{Ec.30})$$

Donde:

N = Fuerza normal que actúa sobre la sección analizada.

d = Posición de la fuerza normal en la sección analizada.

Los valores admisibles para las tensiones de corte y normales son:

² Ver Tapia, 2006, Diseño geotécnico.

³ Ver Maccaferri, 2003, Gawac BR-2.0.

³ Ver Maccaferri, 2003, Gawac BR-2.0.

$$\tau_{adm} (\text{Ton} / \text{m}^2) = N \tan \phi + c_g. (\text{Ec.31})$$

$$\rho_{adm} (\text{Ton} / \text{m}^2) = 50\gamma_g - 30. (\text{Ec.32})$$

Donde:

$$\phi = 2.5\gamma_g - 10^\circ \dots (\text{Ec.33})$$

$$c_g (\text{Ton} / \text{m}^2) = 0.3P_u - 0.5 \dots (\text{Ec.34})$$

En estas expresiones, γ_g es el peso específico de los gaviones y P_u es el peso de la malla, dados en kg/m^3 .

Suelo reforzado

Una estructura de suelo reforzado consiste en la introducción de elementos resistentes a la tracción, convenientemente orientados, que aumentan la resistencia del suelo y disminuyen las deformaciones del macizo. En este método, conocido como refuerzo de suelos, el comportamiento global del macizo es mejorado por medio de la transferencia de los esfuerzos a los elementos resistentes (refuerzos)⁷.

Los suelos, en general, poseen elevada resistencia a esfuerzos de compresión, pero baja resistencia a esfuerzos de tracción. Cuando una masa de suelo es cargada verticalmente, la misma sufre deformaciones verticales de compresión y deformaciones laterales de elongación (tracción). Si la masa de suelo estuviera reforzada, los movimientos laterales serían limitados por la rigidez del refuerzo⁷. La figura 26 muestra el principio básico de un suelo reforzado.

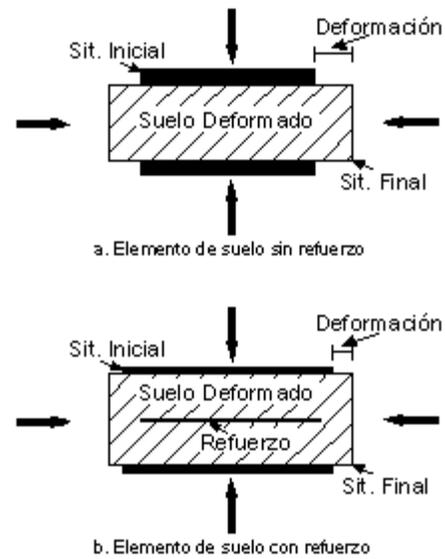


Figura 26. Deformaciones en elementos de suelo con y sin refuerzo⁷.

Sistema Terramesh

Para contenciones de mayor altura (> 6 m), en general, es preferible la solución Terramesh a la solución típica de gaviones⁸.

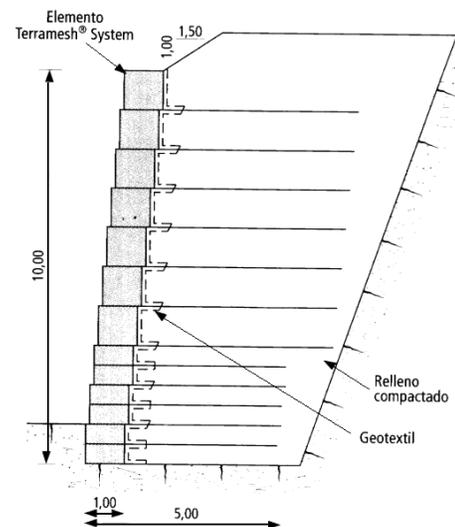


Figura 27. Sección transversal típica de una estructura de Terramesh⁸.

⁷ Ver Maccaferri, 2005, Estructuras en suelo reforzado con el sistema Terramesh.

⁷ Ver Maccaferri, 2005, Estructuras en suelo reforzado con el sistema Terramesh.

⁸ Ver Maccaferri, 2001, Obras de contención.

El sistema Terramesh está constituido por elementos de malla hexagonal a doble torsión amarrados firmemente entre sí. Su presentación es similar al de un gavión caja de 1 metro de ancho, y además posee un panel de refuerzo (cola) que interacciona mecánicamente con el suelo. Esta cola crea en el suelo un tipo de “cohesión ficticia”, que reduce el empuje sobre el paramento frontal. En la práctica, la malla arma el terreno similarmente como las varillas de acero arman el concreto.

El paramento frontal y el panel de refuerzo están formados por el mismo paño de red, sin interrupciones ni amarres. Dicha continuidad es necesaria para garantizar, en todo momento, la misma resistencia a la tracción, lo que no ocurriría con una unión. Son producidas en piezas separadas, solamente, las partes no sometidas a esfuerzos de tracción, como los laterales, el diafragma y el panel posterior⁹.

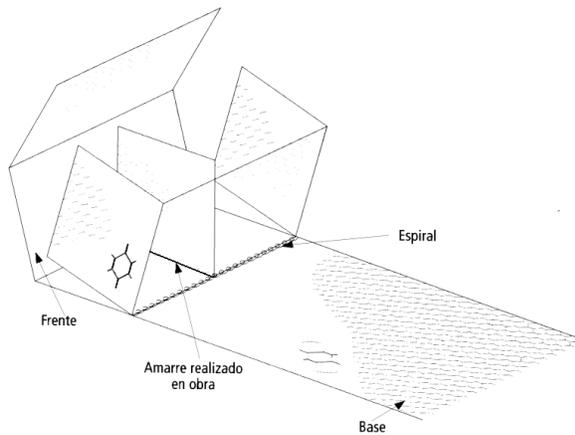


Figura 28. Elemento Terramesh System⁹.

Por seguridad, los alambres deben ser protegidos con un recubrimiento de PVC. El PVC, por evitar el contacto directo entre los alambres y el suelo, elimina la posibilidad de corrosión de estos.

Por ser un elemento continuo, con aberturas de dimensiones significativas, la malla trabaja como anclaje debido a la resistencia al movimiento ofrecida por el terreno, activada por fricción, corte y trabazón.

La fricción se manifiesta entre el suelo y los alambres y está relacionada con el ángulo de

fricción interno del material de relleno, que se aconseja que no sea inferior a los 28°, el grado de compactación y la presión efectiva⁷.

El corte surge debido al formato tridimensional de la malla, la cual confina, en su interior, una porción de relleno. Este fenómeno puede ser observado en los casos en que la malla al deslizarse tiende a mover el suelo, activando, de esta manera, su resistencia al corte⁷.

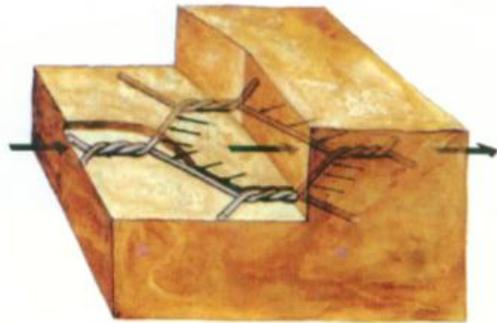


Figura 29. Efecto de corte producido por la interacción suelo-malla⁹.

Por último, se tiene la trabazón, la cual juega un papel importante cuando una gran parte del relleno está graduado en un rango entre 10 y 15 veces el diámetro del alambre. En estos casos, se presenta un notable aumento en la capacidad de anclaje, dado que las partículas mayores traban la malla⁷.

El sistema Terramesh mantiene las características técnicas y funcionales de las estructuras de gravedad de gaviones, y es aún más ventajoso en las regiones donde los bloques de roca son escasos o en los proyectos donde su transporte es difícil. Otra gran ventaja de esta solución, es permitir la utilización del suelo existente para la formación del relleno, sin necesidad de utilizar suelos de mejor calidad.

La principal desventaja de este sistema, para su utilización en Costa Rica, es que hasta hace relativamente poco tiempo ha sido promovido por su fabricante, la empresa Maccaferri. Como sistema novedoso que es, requiere de un cierto tiempo para que su aplicación sea implementada con mayor constancia, y su desempeño sea mejor evaluado.

⁷ Ver Maccaferri, 2005, Estructuras en suelo reforzado con el sistema Terramesh.

⁹ Ver Maccaferri, 2005, Estructuras en tierra reforzada.

⁹ Ver Maccaferri, 2005, Estructuras en tierra reforzada.

En los casos de estructuras de más de 8 metros de altura o en presencia de grandes sobrecargas, es aconsejable evaluar la posibilidad de agregar a los paneles de refuerzo, geogrillas de alta resistencia a la tracción. De esta manera, se consigue optimizar la estructura en términos de resistencia estructural y reducción de costos⁹.



Figura 30. Uso de geogrilla en refuerzo de suelos⁸.

En el diseño de las estructuras de suelo reforzado con el sistema Terramesh, se deben realizar las mismas verificaciones comentadas anteriormente para los muros de gaviones, a saber: verificación contra el deslizamiento de la base, verificación contra el volcamiento, esfuerzos sobre el terreno, verificación de la estabilidad global y de la estabilidad interna.

Otras aplicaciones de la malla hexagonal

Obras longitudinales

Son estructuras para la defensa y conservación de márgenes contra la acción erosiva de las aguas. Se dividen en dos tipos:

Obras leves, en las cuales los colchones actúan como revestimiento.

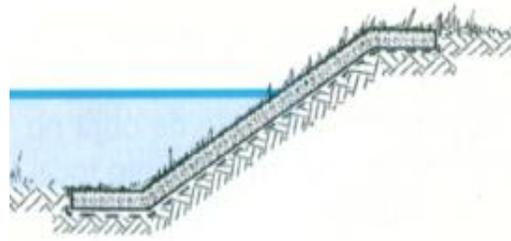


Figura 31. Obras longitudinales leves⁵.

Obras macizas, en las cuales los gaviones actúan, también, como estructura de contención.

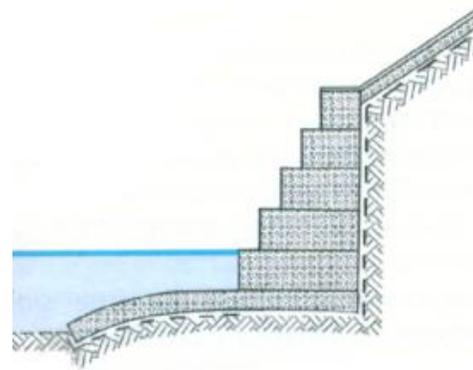


Figura 32. Obras longitudinales macizas⁵.

Obras transversales

Los gaviones son ampliamente utilizados en la sistematización y corrección de los cauces fluviales, en la regularización del transporte de sólidos y en la creación de reservorios artificiales, con la construcción de diques, presas, etc⁵.

⁹ Ver Maccaferri, 2005, Estructuras en tierra reforzada.

⁸ Ver Maccaferri, 2001, Obras de contención.

⁵ Ver Maccaferri, 2005, Gaviones y otras soluciones en malla hexagonal a doble torsión.



Figura 33. Obras transversales⁵.

Canalizaciones

Los gaviones y colchones, también, son empleados en canales, actuando en la contención y protección de los márgenes así como en el revestimiento total o parcial del fondo⁵.



Figura 34. Canalización a base de colchones⁵.

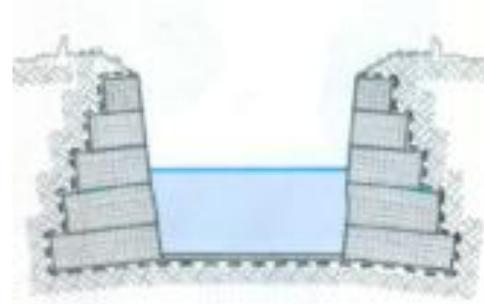


Figura 35. Canalización a base de colchones y gaviones⁵.

Con el objetivo de obtener un revestimiento de rugosidad reducida para mejorar el flujo y facilitar la limpieza de los canales, se puede revestir con mortero la superficie externa de los colchones y gaviones.

Obras deflectoras

También conocidas como espigones. Son estructuras para la protección y recuperación de márgenes de ríos y playas que desvían o disipan la energía de las aguas, provocando la sedimentación de los materiales en suspensión o simplemente redireccionando el flujo para garantizar la estabilidad de la margen sujeta a la erosión⁵.



Figura 36. Obras deflectoras⁵.

⁵ Ver Maccaferri, 2005, Gaviones y otras soluciones en malla hexagonal a doble torsión.

⁵ Ver Maccaferri, 2005, Gaviones y otras soluciones en malla hexagonal a doble torsión.

Apoyo de puentes

El enorme éxito en las obras realizadas ha difundido el empleo de los gaviones como apoyo de puentes⁵.



Figura 37. Apoyo de puentes⁵.

Uso de geotextil no tejido

En la construcción de muros de gaviones, muros de Terramesh, así como todas las demás obras mencionadas anteriormente, es recomendable utilizar un material conocido como geotextil, el cual se coloca a lo largo de toda el área de contacto suelo-muro. Este geotextil está disponible en diversos tipos caracterizados por sus propiedades físicas, mecánicas e hidráulicas, y desarrolla las funciones de separación, filtración y drenaje.

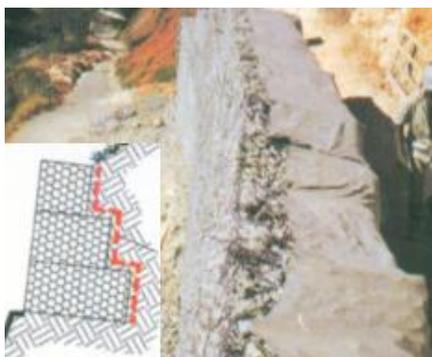


Figura 38. Uso de geotextil en gaviones¹⁰.

⁵ Ver Maccaferri, 2005, Gaviones y otras soluciones en malla hexagonal a doble torsión.

¹⁰ Ver Maccaferri, 2006, Filtración, separación y protección.

Filtración y drenaje

Gracias a su alta permeabilidad, los geotextiles no tejidos permiten el paso de fluidos a través de su estructura reteniendo las partículas de suelo, sustituyendo así, con ventajas técnicas, económicas y constructivas, los tradicionales filtros naturales de transición granulométrica.

Esta propiedad adquiere mayor importancia en las aplicaciones en muros de contención, pues se garantiza la filtración y el drenaje del muro en todo momento, aliviando las presiones hidrostáticas, para las cuales estos no fueron diseñados.

Para lo anterior, las principales características técnicas del geotextil que deben ser verificadas para garantizar un buen desempeño de la función de filtración son: permeabilidad normal, resistencia al punzonamiento y, eventualmente, resistencia a la tracción (solamente durante la instalación)¹⁰.

Separación

Los geotextiles no tejidos son utilizados como elementos de separación entre suelos de características diferentes evitando que estos se mezclen. Esta característica es muy importante en los casos de muros de gaviones, ya que se evita que los finos del relleno se introduzcan en los gaviones, obstruyéndolos, con la consecuente pérdida de capacidad de drenaje y generando presiones hidrostáticas futuras. Además, se impide la socavación de los materiales del relleno.

Para esta función, las principales propiedades del geotextil que deben ser consideradas son: densidad nominal y espesor, resistencia al punzonamiento y, eventualmente, resistencia a la tracción (solamente durante la instalación)¹⁰.

Escogencia del geotextil

Los métodos de diseño que se emplean con mayor frecuencia para escoger un geotextil para aplicaciones geotécnicas son: el empírico (diseño

¹⁰ Ver Maccaferri, 2006, Filtración, separación y protección.

por experiencia), y por especificación (obtenido de los fabricantes).

En Costa Rica, los fabricantes de geotextiles, como Amanco y Maccaferri, poseen información, en forma de cuadros, en los cuales se puede determinar la escogencia de un geotextil para las diferentes aplicaciones. A continuación, se presenta un resumen de las funciones de los geotextiles que distribuye Amanco.

Cuadro 7. Funciones por aplicación de los geotextiles Pavco¹¹				
Aplicación	Separación	Filtración	Refuerzo	Geotextil sugerido
Gaviones	Si	Si	No	NT 1400, NT 1600.
Terraplenes	Si	No	Si	NT 3000, NT 4000, NT 5000.
Túneles	No	Si	No	NT 2000, NT 3000, NT 4000.
Repavimentación	No	No	Si	NT 1600 TF
Puentes	Si	Si	No	NT 2000, NT 3000.

Entre las principales desventajas de los geotextiles, se puede mencionar la susceptibilidad al vandalismo, y la degradación que sufren por la acción de la luz ultravioleta, por lo que se recomienda cubrirlos, una vez que han sido instalados.

Análisis de estabilidad de taludes

En muchas ocasiones, los ingenieros tienen que efectuar cálculos para verificar la seguridad de taludes naturales, taludes de excavaciones o de terraplenes compactados. Este proceso, llamado análisis de estabilidad de taludes, implica determinar y comparar el esfuerzo cortante desarrollado a lo largo de la superficie más probable de falla con la resistencia cortante del suelo¹².

Para realizar este análisis, se debe obtener el valor de la altura crítica H_{cr} , que es la máxima altura que puede soportar un talud con un

ángulo de inclinación β respecto a la horizontal, formado por un suelo homogéneo de cohesión c , ángulo de fricción ϕ , y peso específico γ determinados, por medio de la siguiente ecuación:

$$H_{cr} = \frac{c}{\gamma m} \dots (Ec.35)$$

Donde:

m = número de estabilidad.

El valor del número de estabilidad para varios valores de β y ϕ , se puede obtener de figuras que aparecen en los libros de mecánica de suelos.

¹¹ Ver Pavco, 2007, Geotextiles, funciones y aplicaciones.

¹² Ver Das, 2001, Fundamentos de ingeniería geotécnica.

Metodología

El proyecto de construcción del muro de gaviones del Proyecto La Estefanía, ubicado en El Carmen de Guadalupe, cantón de Goicoechea, se inició en el mes de marzo del 2008. Debido a que el proyecto se llevó a cabo, en su mayoría, durante la época seca, no se presentaron mayores contratiempos climáticos que obligaran al retraso o la suspensión temporal de las obras, con el consecuente beneficio constructivo.

La práctica profesional inició con un estudio bibliográfico sobre el tema de los muros de gaviones, durante los meses de diciembre de 2007 y enero de 2008. Paralelamente, el estudiante se involucró, activamente, en la construcción de dos muros de este tipo, como parte de su trabajo en la Empresa Gaviones Bekaert. Esta participación le proporcionó experiencia valiosa para asumir la función de dirigir el proyecto de construcción del muro de gaviones objeto de la práctica.

En enero del 2008, el Sr. Wilberth Jiménez, presidente de la Empresa Payco SA, le solicitó a Gaviones Bekaert una visita al Proyecto La Estefanía, con el objeto de preparar una cotización de un muro de gaviones con una longitud de 80 m y una altura de 5 m. Una vez efectuada la visita, se procedió a realizar el diseño preliminar del muro, que arrojó un volumen de 960 m³, y a continuación se generó el presupuesto detallado, con un cierre de \$83/m³ de gavión instalado.

La cotización, junto con el plano de la obra, fue enviada a la empresa, la cual la aprobó y encargó de iniciar los trabajos en el mes de marzo del mismo año. Seguidamente, se realizó la programación de la obra haciendo uso del programa Microsoft Project 2003, cuya duración se contempló en 10 semanas.

Una vez listos los acuerdos para iniciar la construcción, se realizó la demarcación topográfica del terreno por parte del Ing. Topógrafo Cristian Ugalde González. Dicha demarcación es un requisito imprescindible previo a la excavación, ya que sin ella no se sabría con

certeza la ubicación y por ende la magnitud de los cortes por realizar.

La demarcación topográfica se realizó colocando estacas a lo largo de la calle a una distancia de 10 metros medidos perpendicularmente desde la línea de centro, así como también a lo largo de la línea sobre la cual la maquinaria debía realizar el corte.

Al día siguiente de la demarcación, ingresó la excavadora, una pala hidráulica de 22 toneladas marca Link-Belt, alquilada a la empresa H & M. La misma dejó listo el terreno en 3 días, mientras la cuadrilla inició el mejoramiento de la base del muro con una capa de 20 cm de lastre compactado y se instalaron las primeras filas de gaviones. La compactación de la base se llevó a cabo con un compactador diesel, mejor conocido como sapo brincón, también propiedad de H & M.

La preparación de una capa de lastre para mejorar la capacidad de soporte de la fundación es una solución técnica, ampliamente utilizada en los proyectos de muros de gaviones, principalmente, en aquellos en los cuales no haya sido posible asentar el muro en estratos inferiores de mayor resistencia. El efecto es similar al que produce la base granular de un pavimento sobre la subrasante: se da una distribución de esfuerzos, esto permite que la segunda reciba una menor proporción de carga. Otra ventaja de la capa de lastre es que permite nivelar la base y darle la inclinación de diseño de 6° hacia el interior del muro.

Las actividades siguientes a la compactación del lastre fueron el armado de los gaviones, el llenado, y la compactación del relleno. Dichas actividades son dependientes una de la otra y fueron ejecutadas sucesivamente, camada por camada y a lo largo de todo el muro: se armaba y llenaba la camada, se compactaba el relleno, y se continuaba con el siguiente nivel. Con esto se pretendió ir levantando todas las secciones del muro al mismo tiempo, para no dejar el corte desprotegido y, de esta manera, prevenir que se derrumbara.

Es importante indicar que estos ciclos se realizaron desde la parte más lejana de la calle hacia el inicio de la misma, ya que, de lo contrario, la calle se hubiera visto bloqueada con el material.

Proceso Constructivo

A continuación se detallan todas las etapas del proceso constructivo de los muros de gaviones, con énfasis en la inspección y desarrollo del muro específico del Proyecto La Estefanía.

Demarcación topográfica

El trabajo de topografía consistió, básicamente, en marcar la línea a nivel de calle bajo la cual se profundizó con la excavación. En la figura 39, se aprecian las estacas que demarcaron dicha línea de excavación.



Figura 39. Estacas indicando la línea de excavación.

Las estacas fueron colocadas a cada diez metros, por lo tanto, se utilizaron un total de ocho para completar los ochenta metros de longitud del muro.

Excavación

El movimiento de tierra fue realizado con una excavadora, que trabajó en el proyecto desde el día 04 de marzo hasta el día 06 de marzo, para un total de 21.5 horas efectivas, con un costo de ¢645.000. En la figura 40 se muestra la maquinaria durante el proceso de excavación.



Figura 40. Proceso de excavación.

El piso fue preparado en cuatro terrazas o niveles diferentes, de manera que el muro fue construido en seis tramos y cuatro secciones transversales distintas, según lo indicado en el cuadro 8.

Cuadro 8. Tramos del muro de gaviones				
Tramo N.	Longitud (m)	Altura (m)	Ancho de la base (m)	Volumen (m ³)
1	7.5	3.0	2.0	33.75
2	10.0	5.0	3.5	120.0
3	12.0	6.0	3.5	162.0
4	5.0	6.5	4.0	75.0
5	35.0	6.0	3.5	472.5
6	10.5	5.0	3.5	126.0
Total	80.0	---	---	989.25

El cuadro anterior muestra que el volumen estimado final del muro de gaviones es de 989.25 m³, mayor que el volumen original. Este nuevo volumen, simplemente, debe ser multiplicado por el costo unitario de \$83/m³ para obtener el monto total del proyecto. En la siguiente figura, se observa el terreno preparado en terrazas.



Figura 41. Distintos niveles de fundación del muro.

Es de vital importancia colocar las secciones del muro sobre superficies horizontales, para evitar que la inclinación del terreno origine esfuerzos no deseados en el muro en el sentido longitudinal.

Finalmente, es importante anotar que el corte fue protegido con plástico negro, para evitar que la acción del agua ocasionara derrumbes no deseados. Además, durante el llenado de los gaviones, los trabajadores debieron utilizar casco de seguridad. Estas fueron las únicas medidas de seguridad tomadas, debido a que representaron la solución más económica para Gaviones Bekaert.

Mejoramiento de la base

La colocación de lastre compactado en la base del muro corresponde a la actividad previa al levantamiento de los gaviones. Inició el día 06 de marzo y finalizó el día 14 de marzo.

El material utilizado fue el mismo que se emplea como base para los pavimentos, extraído del tajo de la empresa Meco en Santa Ana. Fue acarreado por H & M en vagones de 12 m³, las cuales descargaron el material directamente sobre el terreno, evitando el acarreo en carretillo. Seguidamente, los trabajadores lo esparcían homogéneamente sobre la base, lo humedecían y luego lo compactaban en 2 capas de 10 cm. El equipo utilizado fue un compactador diesel, mejor conocido como sapo brincón.



Figura 42. Mejoramiento de la base con lastre.

La compactación adecuada fue verificada durante la inspección, cuidando que se empleara la cantidad de agua necesaria para producir una densidad cercana a la máxima posible para el material utilizado, con el equipo disponible. Además de esto, se realizaron pruebas empíricas para verificar la compactación, a lo largo de la base del muro, como fue el probar la resistencia a la penetración, en el lastre compactado, de una pala y de una varilla de acero.

Armado de gaviones

Las mallas de gavión deben ser extendidas y armadas en el sitio de la obra. El tipo de malla utilizada en el proyecto La Estefanía es del calibre de 2.4 mm, sin recubrimiento plástico (debido a que el muro no estará en contacto directo con el agua). A continuación se muestra la forma desplegada de una malla de 2x1x1m.



Figura 43. Malla extendida de 2x1x1m.

El paso siguiente consiste en armar y amarrar los gaviones entre sí, cuidando de igualar las paredes, costados y tapas. Los amarres se realizan con alambre de 2.2 mm de diámetro, que viene junto con el gavión.



Figura 44. Armado de gaviones.

El amarre correcto es tal como se indica en la figura 45: se hace una doble vuelta al

alambre y se atiranta; por último se remata la costura con varios giros de la tenaza.



Figura 45. Amarre correcto del gavión.

Luego del armado se deben colocar los tirantes o tensores (principalmente, en la cara del gavión que queda visible), los mismos se deben amarrar a las paredes laterales o del fondo. La función de estos tirantes es evitar la deformación del gavión durante el llenado. La forma correcta de colocar los alambres tensores es la mostrada en la figura 46; se deben amarrar las dos celdas adyacentes para optimizar el efecto del tensor.



Figura 46. Colocación de tensores.

La distribución de los tensores en las cajas de gavión debe ser de al menos 6 und/m², en filas de 2 tensores colocados a 30, 60 y 90 cm de altura.

El penúltimo paso, previo al llenado, es la colocación de la formaleta en la cara externa del muro. Se busca, con esto, generar una superficie

plana, sin ondulaciones ni abolladuras que le den un mal aspecto al muro una vez construido.

El formaleteo se puede hacer con madera, perfiles RT o varillas de construcción. En el caso específico del Proyecto La Estefanía, se decidió utilizar varillas #6, debido a la mayor flexibilidad que poseen, lo cual facilitó la construcción del muro en las partes curvas.



Figura 47. Formaleteo con varilla en la cara externa del muro.

Por último, se coloca geotextil sobre toda el área de contacto suelo-muro, con el fin de servir como separación entre los dos materiales, así como permitir la filtración del agua del terreno hacia el muro, evitando que se mezclen partículas finas dentro del gavión, lo que generaría la obstrucción del mismo.

En este punto, es importante recalcar que los muros de gaviones no son diseñados para soportar presiones hidrostáticas, por lo cual el uso de geotextil se vuelve indispensable.



Figura 48. Geotextil en la espalda del muro.

El geotextil utilizado en el proyecto es el tipo MacTex MT 130 de Maccaferri, especial para aplicaciones de muros de gaviones.

Llenado de gaviones

El siguiente paso en el proceso de construcción de un muro de gaviones es el llenado. Este requirió de un cuidado muy especial en la inspección, ya que se debe vigilar que se deje el menor volumen de vacíos posible de manera que se logre el peso máximo del muro de gaviones, que como se sabe, funciona por gravedad.

Lo anterior se logra combinando las rocas de todos los tamaños, acomodando las más pequeñas en los espacios vacíos que quedan entre las más grandes. En general se debe evitar colocar rocas cuya dimensión menor mida menos de 10 cm en las caras externas del gavión, para evitar que se salgan por las aberturas de la malla, con el consecuente aumento en la porosidad del muro.

El tipo de roca utilizada en el proyecto fue extraída del Tajo La Esmeralda, Guápiles, y es del tipo conocido como piedra bola. La mayor parte del material fue transportado por la empresa Concretos Orosi en vagones de 13 m³. A la fecha de corte, se habían instalado 380 m³ de gavión, que corresponde a un 38.4% del volumen total de 989.25 m³.



Figura 49. Llenado de gaviones.

Una vez que se completaba una caja de gavión, se procedía a cerrar la misma. Se debió vigilar que los cierres se hicieran cuando la caja estuviera completamente llena, de manera que, ni se dejaran espacios vacíos por falta de material,

ni se llenara en demasía impidiendo igualar, correctamente, la tapa a las aristas del gavión.

Por último, es de vital importancia amarrar las mallas de la camada siguiente a las mallas debidamente cerradas de la camada inferior; ya que, si se dejaran sueltas se generaría un plano de falla y el muro no funcionaría como una unidad estructural (revisión de la estabilidad interna). Dichos amarres fueron realizados de la misma manera descrita en el armado de gaviones, a lo largo de todas las aristas del gavión superior.



Figura 50. Amarre de las camadas superiores del gavión.

La apariencia final que se desea tener en un muro de gaviones es como se observa en la figura 51. No se presentan deformaciones en la fachada del muro, gracias al correcto uso de los tensores y las varillas. A su vez, el acomodo de las rocas es tal que los espacios vacíos son mínimos, mejorando la estética de la estructura. A la postre se aprecia la concordancia entre las unidades de gaviones, tanto superiores como adyacentes: existe una cuadrícula perfecta formada por las aristas de los gaviones.



Figura 51. Apariencia final deseada de los gaviones.

Relleno

Corresponde al último ciclo de la construcción del muro de gaviones. Una vez que se llenaba una camada de gavión, se procedía a colocar y compactar el relleno en el espacio libre que quedaba entre el muro y la excavación, así sucesivamente hasta alcanzar el nivel de la calle. El equipo utilizado para la compactación del relleno fue el mismo que se utilizó para la base.

Como material de relleno se utilizó el mismo material de la excavación, el cual fue apilado arriba a ambos lados del corte, desde donde los trabajadores, simplemente, lo regaban y esparcían previo a la compactación. Dicho material fue compactado en capas de 15 cm.

Se debe indicar que durante todo el proceso de compactación se empleó agua para lograr la mayor densidad posible con el compactador utilizado. Las pruebas efectuadas para verificar la compactación del relleno, fueron las mismas que se realizaron para la base granular.

Finalmente, en la figura 52, se muestra el estado del proyecto a la fecha de corte (semana 5).



Figura 52. Muro de gaviones a la fecha de corte.

Resultados

En este apartado se describen los resultados obtenidos durante cada una de las etapas del proyecto.

Diseño

El diseño del muro fue realizado con el programa GawacWin de la empresa Maccaferri. El tipo de gavión contemplado fue el de diámetro del alambre de 2.4 mm.

Debido a que en ese momento no se contaba con un estudio de suelos del sitio, se tuvo que realizar una clasificación visual, y se determinó que el suelo existente era homogéneo, fino, y plástico, por lo que se supone que se trata de una arcilla de alta expansibilidad (CH), o de un limo de alta expansibilidad (MH). Además, la excavación evidenció la ausencia de nivel freático, por lo que no fue considerado en el diseño. A continuación se presenta un cuadro con los parámetros utilizados (en términos de esfuerzos totales):

Cuadro 9. Parámetros del suelo utilizados en el diseño			
Peso Específico γ (Ton/m ³)	Angulo de fricción ϕ	Cohesión c (kN/m ²)	Presión admisible σ_a (kN/m ²)
1.7	25°	50	200

Debido a que el muro se dividió en secciones de diferente altura, fue necesario realizar un diseño para cada una de ellas. Los resultados de estos diseños, así como el plano donde se ilustra la dimensión y ubicación de las secciones, se muestran en la sección 1 de los apéndices. En dicho plano se indica que el volumen final de todo el muro es de 989.25 metros cúbicos.

El valor del coeficiente de aceleración sísmica horizontal y vertical de 0.25 fue obtenido

del documento titulado “Propuesta para la escogencia del coeficiente dinámico para el análisis pseudoestático de estabilidad de taludes” de María Laporte Pirie. Por su parte, se consideró una sobrecarga de 10.0 kN/m² sobre el terraplén, para simular el efecto de las cargas producidas por los vehículos que circularán por la calle cuando se esté construyendo la urbanización. Este valor de sobrecarga de 10.0 kN/m², debe ser considerado en el diseño, cuando el muro de contención forme parte de estructuras viales menores o caminos rurales¹.

En este punto, es conveniente mostrar las presiones máximas actuantes sobre la fundación, para cada una de las secciones, con su respectivo factor de seguridad, de acuerdo a los diseños realizados.

Cuadro 10. Esfuerzos aplicados sobre el terreno de fundación			
Sección N.	Presión máxima σ_{max} (kN/m ²)	Presión admisible σ_a (kN/m ²)	Factor de Seguridad
1	7.92	200	25.25
2	34.03	200	5.88
3	48.29	200	4.14
4	38.85	200	5.15

Finalmente, se verificó la estabilidad de la excavación realizada, considerando los parámetros utilizados en el diseño (Cuadro 9), mediante la ecuación 35. Para esto, se estimó un ángulo de inclinación del talud de 80°, resultando en un número de estabilidad de 0.135 (Taylor, 1937). La altura crítica obtenida, de esta manera, fue de 21.8 metros, más de tres veces mayor a la altura máxima del corte, de 6.5 metros.

¹ Ver Prodac, 2004, Pirka Soft 1.0.

Presupuesto y control de costos

El presupuesto detallado de la obra y las tablas del control de costos aparecen en la sección 2 de apéndices. El siguiente cuadro corresponde al resumen del presupuesto.

Cuadro 11. Resumen del presupuesto		
Volumen (m ³)	Costo Unitario (\$)	Costo Total (\$)
960.0	83.0	79.680.0

Además, a continuación se presenta, gráficamente, la distribución porcentual de los diferentes rubros contemplados en el presupuesto.

Con respecto al control de costos, este se llevó a cabo utilizando la técnica de Valor Ganado (Earned Value), utilizada para medir integralmente el proyecto, tanto en tiempo, como en costo. En esta técnica se debe desarrollar un plan de medición del desempeño del proyecto llamado Valor Planeado. El Valor Ganado es el porcentaje del presupuesto equivalente al trabajo debidamente terminado y al compararlo con el Costo Actual incurrido para lograr el avance de los trabajos se identifica si el proyecto se encuentra dentro o fuera del presupuesto¹³.

En las figuras 55 y 56 se muestra la distribución porcentual de los costos de los diferentes rubros incurridos en el proyecto hasta la semana 5.

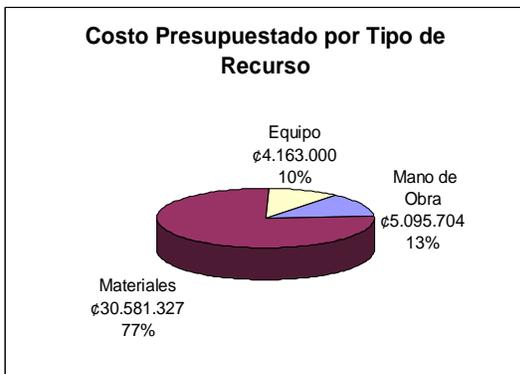


Figura 53. Costo presupuestado por recursos.



Figura 55. Costos reales por recursos.

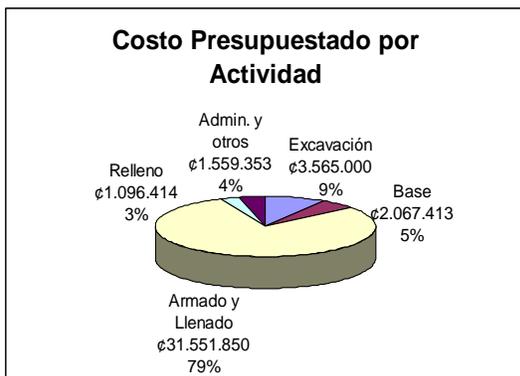


Figura 54. Costo presupuestado por actividad.



Figura 56. Costos reales por actividad.

¹³ Ver Chamoun, 2002, Administración profesional de proyectos.

En las tablas de control de costos, se indica que a la fecha de corte se gastó mucho menos de lo presupuestado por las actividades realizadas, esto se refleja en el Índice de Desempeño del Costo (IDC): se obtuvo ¢1.50 por cada ¢1.00 gastado en el proyecto.

Cuadro 12. Resumen del control de costos	
Indicador	Valor
Valor Planeado (VP)	¢22.681.402
Valor Ganado (VG)	¢18.730.717
Costo Actual (CA)	¢12.491.991
Presupuesto Actual al Término (PAT)	¢40.807.552
Variación del Costo (VC=VG-CA)	¢6.238.727
Índice del Desempeño del Costo (IDC=VG/CA)	1.5
Variación del Tiempo (VT=VG-VP)	-¢3.950.684
Índice del Desempeño del Tiempo (IDT=VG/VP)	0.826
Pronóstico del Costo al Término (PCT=PAT/IDC)	¢27.215.592
Pronóstico de la Fecha de Terminación (PFT=duración/IDT)	12.11

Buena parte de esta diferencia entre los costos realizados y lo presupuestado se debe al tiempo que la excavadora demoró en realizar el corte: se presupuestaron 90 hrs. (¢2.700.000) y, en realidad, se requirieron 21.5 hrs. (¢645.000) para completar la excavación. Además de esto, el desperdicio contemplado en el presupuesto fue del 20% para los bloques de roca, cuando en realidad este desperdicio fue mínimo.

Finalmente, la figura 57 corresponde al gráfico resumen del control de costos, donde se puede observar que el proyecto terminará costando mucho menos de lo presupuestado, pero en un tiempo mayor a lo planeado.

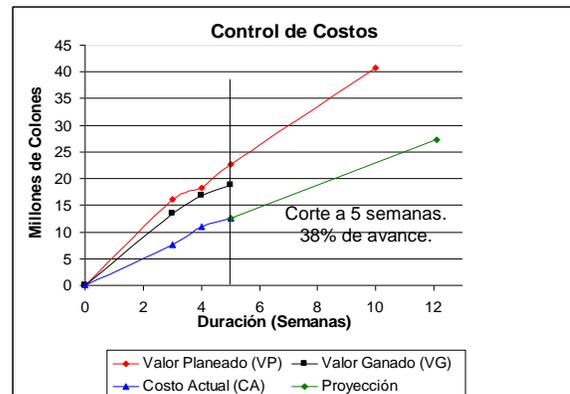


Figura 57. Técnica del Valor Ganado.

Programación y control de avance

La programación de la obra fue realizada con el programa Microsoft Project 2003. Tanto el diagrama de Gantt como el diagrama de seguimiento a la fecha de corte se presentan en la sección 3 de apéndices.

El proyecto fue desglosado en 5 actividades, a saber:

1. Excavación,
2. Preparación de la base,
3. Armado de gaviones,
4. Llenado de gaviones,
5. Compactación de relleno.

El inicio de cada actividad depende de que la anterior haya iniciado, pero todas, excepto la excavación, se prolongan hasta el final del proyecto.

El tiempo estimado de ejecución del proyecto fue de 10 semanas, iniciando el día 03 de marzo y finalizando el día 09 de mayo. En el diagrama de seguimiento se observa que al día 04 de abril (fecha de corte, semana 5) el proyecto fue ejecutado en un 40%, por lo tanto, se encontraba atrasado en el calendario. Este atraso no repercutió en el presupuesto, ya que no se acordó ninguna cláusula que especificara multas por demora en las obras.

El diagrama de seguimiento se muestra a continuación:

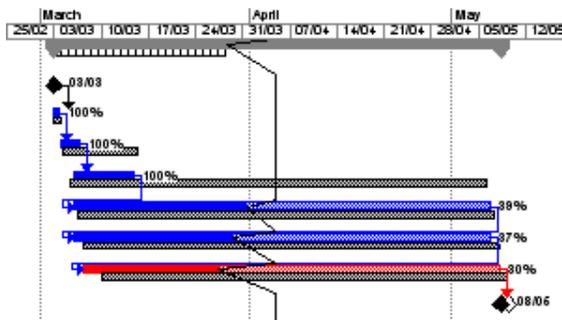


Figura 58. Diagrama de seguimiento a la fecha de corte.

La razón principal de este atraso fue la actividad de llenado de gaviones. Dicho atraso

afectó, directamente, a la actividad del relleno, ya que es necesario llenar y cerrar debidamente las mallas de gavión para poder rellenar con material en la espalda del muro.

Para el control de avance también se utilizó el método del Valor Ganado. Similarmente a lo realizado en el control de costos, el Valor Ganado se compara con el Valor Planeado para identificar si el proyecto se encuentra adelantado o atrasado respecto al programa. Por lo tanto, la situación del atraso del proyecto también se refleja en el cuadro 12, específicamente en el Índice del Desempeño del Tiempo (IDT), que muestra que a la fecha de corte se había avanzado tan solo el 82.6% de lo planificado.

Por último, se debe anotar que, luego de la fecha de corte, la empresa Gaviones Bekaert continuó ejecutando el proyecto.

Análisis de Resultados

Diseño

El muro de gaviones fue construido con base en diseños previamente probados y que aseguraban su estabilidad ante las condiciones de un suelo de baja resistencia, pero claro está que, dada la falta en ese momento de un estudio de suelos del sitio, las secciones no se pudieron optimizar y no se pudo reducir la cantidad de recursos a los estrictamente necesarios. Lo anterior implicó un mayor desembolso económico, ya que la cantidad de metros cúbicos totales fue mayor.

Analizando los factores de seguridad obtenidos para las diferentes secciones, es notable que las secciones de mayor altura son las que presentan los factores más bajos. Esto es totalmente razonable puesto que a mayor altura son mayores los empujes que el muro tendrá que soportar.

A su vez, se observa que la rotura global, en el largo plazo, sería la eventual causante de la falla ($FS_{min}=1.48$), pero la superficie de falla en todos los casos es tan profunda (aproximadamente 20 metros) que se descarta totalmente esta posibilidad.

Respecto a las presiones actuantes sobre la fundación, la presión máxima esperada es de 48.29 kN/m^2 . Según lo mostrado en el cuadro 10, el factor de seguridad correspondiente es de 4.14. Esto, sumado al hecho de que la base del muro fue mejorada con lastre compactado, permite concluir que no se prevén asentamientos de tal magnitud que pudieran generar desplazamientos o deformaciones de importancia en el muro, ni en el pavimento a construir sobre el mismo.

El análisis de la estabilidad interna muestra que en el caso más crítico (primera camada de gavión), la tensión de corte es del orden de siete veces menor a la tensión de corte admisible; y la tensión normal es del orden de ocho veces menor a la tensión normal admisible. Por lo tanto se verifica la estabilidad interna del muro de gaviones.

Por otra parte, se garantiza que las fuerzas que provocan el deslizamiento de la base son considerablemente menores a las fuerzas resistentes ($FS_{desl} > 9$ en todos los casos), por lo que no se espera una falla de este tipo.

Finalmente se tiene el factor de seguridad contra el volcamiento. Este factor adquiere mayor importancia conforme aumenta la altura del muro, debido a que la fuerza activa es proporcional al cuadrado de la altura y la misma se ubica en una elevación mayor respecto al punto de giro, aumentando así el brazo de palanca y por ende la magnitud de los momentos volcantes. En el caso específico de los diseños realizados para el muro del Proyecto La Estefanía, se obtuvieron factores de seguridad contra el volcamiento entre 3.58 y 8.45.

Presupuesto y Control de Costos

En la figura 53, se aprecia que más de las tres cuartas partes del costo total de un proyecto de muro de gaviones se emplea solo en los materiales. Esto mismo se corrobora en la figura 54.

Asimismo, de todos los materiales necesarios, son la roca y la malla los que generan la mayor inversión, ya que los demás materiales requeridos, como los alambres, el geotextil y las varillas, tienen un costo bastante menor.

Por su parte, casi todos los materiales se consumen en la actividad de armado y llenado. Esto se puede observar en la figuras 56 y 58, donde se muestra que casi el 80% del costo total del proyecto se destina en dicha actividad. Las actividades restantes (excavación, preparación de la base, relleno, administración) juntas alcanzan poco más 20% del costo total. Lo anterior se puede explicar con el hecho de que en el armado y llenado de gaviones se requiere de toda la malla y de toda la roca, además del mayor porcentaje del rubro de mano de obra.

Por otra parte, el monto total a recibir por concepto de colocación de los gaviones es de 82.107,75 dólares (equivalente a 40.807.552 colones), que es el resultado de multiplicar el costo unitario del presupuesto que se indica en el cuadro 11, por el total de metros cúbicos a instalar, igual a 989.25, con un costo por administración del proyecto, para el caso específico de esta obra, de un 2%.

En lo concerniente al control de costos, se puede afirmar que el balance entre el costo presupuestado y el costo real fue positivo. El Índice del Desempeño del Costo (IDC) muestra que por cada colón invertido en el proyecto a la fecha de corte se obtuvo 1.50 colones, que corresponde a una utilidad neta del 50%.

Esto se debe principalmente a que:

- a) El costo de la excavación se redujo en un 75%, debiéndose pagar 895.000 colones por las 21.5 horas de trabajo y los dos transportes de la excavadora, contra los 3.565.000 colones presupuestados,

equivalentes a 90 horas y cuatro transportes.

- b) Para la preparación de la base se cotizaron 2.067.413 colones, y en realidad se invirtieron 889.800 colones, esto resulta en una reducción de más del 50%. Esta diferencia se debe a que para esta actividad se contemplaron nueve vagones de lastre y, por decisiones administrativas, se ocuparon solamente cuatro, además, no se empleó cemento como estabilizador de la base, lo cual fue presupuestado.
- c) En la actividad del armado y llenado de gaviones también se obtuvo cierta utilidad. En el presupuesto se estimó un desperdicio de un 20% para la piedra bola, desperdicio que fue prácticamente nulo según lo visto en los metros cúbicos puestos en el proyecto (385.2) contra los metros cúbicos de gavión efectivamente llenos (380.0), que significa un 98.65% de eficiencia. Por su parte, la malla se presupuestó según el precio de venta del oferente, el cual contempló una utilidad de aproximadamente un 25% sobre el precio de costo.
- d) En la actividad del relleno, costo de administración y otros gastos, la diferencia también fue positiva para la empresa, pero comparada con la ganancia generada en las actividades anteriores, es prácticamente despreciable.

Respecto al control de costos, en la figura 57, se observa que la curva del Valor Ganado está por encima de la curva del Costo Actual, esto significa que el proyecto se encuentra dentro de lo presupuestado y, por lo tanto, generó utilidad. Dicha ganancia es el monto total ahorrado en el proyecto a la fecha de corte y es igual a la Variación del Costo (VC), equivalente a 6.238.727 colones. Este valor, junto con el IDC, permite concluir que el proyecto resultó bastante rentable.

Por último, en la figura 57, se indica la proyección del monto total que se estima terminará costando el proyecto. Este monto es el

Pronóstico del Costo al Término (PCT), cuyo valor es de 27.215.592 colones, contra 40.807.552 colones que fueron recibidos. De lo anterior, se deduce que la utilidad estimada del proyecto fue del 50%.

Programación y Control de Avance

Contrario a lo explicado en el título anterior, donde se tiene un balance en costos bastante positivo, el Proyecto no estaba cumpliendo con el programa.

La actividad que gobierna el avance y, por lo tanto la causante del atraso, es la del llenado de gaviones. Según el programa, para completar el proyecto a tiempo se requería instalar 16 metros cúbicos de gavión por día de trabajo, lo cual no se dio, a pesar de ser un rendimiento relativamente bajo.

Por el contrario, las primeras dos actividades (excavación y preparación de la base) fueron completadas en el plazo establecido.

La empresa constructora no había podido establecer una buena relación con los proveedores de piedra bola, a la fecha de corte habían sido tres diferentes. La razón: no se cumplía con los plazos de pago, se vencía el crédito dado a la empresa y los proveedores se negaban a seguir llevando material al proyecto. Este problema repercutió directamente en el avance, ya que, mientras se realizaba el pago a los proveedores, transcurrían dos o tres días en los que la cuadrilla prácticamente no tenía nada que hacer en el proyecto. Dicho en otras palabras, sucedieron imprevistos no considerados inicialmente en el proyecto, enmarcados en una relación comercial que incidió en la fase constructiva.

Además, la empresa llevaba las mallas de gavión al proyecto a cuentagotas, por lo cual se agravaba el problema, ya que las mallas se agotaban rápidamente, e incluso, hubo días en que la poca piedra bola que había no se pudo colocar por ausencia de gaviones.

El diagrama de seguimiento es convincente en este aspecto: a la fecha de corte el proyecto había sido ejecutado en apenas un 40%, y de acuerdo a la programación debería tener un 50% de avance. El indicador IDT también advierte esta situación, mostrando que se había avanzado tan solo el 82.6% de lo planificado.

En este punto es importante indicar que la cuadrilla no tuvo responsabilidad alguna en el

atraso de las obras, por el contrario, se ha probado que el rendimiento que darían 8 trabajadores en condiciones óptimas (sin escasez de materia prima) es de hasta 50 metros cúbicos por día.

Al ver esta situación, la medida tomada fue reducir el número de trabajadores (3 o 4 máximo), de manera que se mantuviera la productividad según el stock y/o disponibilidad de materiales que se tuviera en el proyecto.

Prosiguiendo con el control de avance, en la figura 57, se observa que a la fecha de corte la curva del Valor Ganado se ubicó por debajo de la curva del Valor Planeado, lo cual significa que el Proyecto se encontraba atrasado. Este atraso es la diferencia en el eje de las abscisas entre estos dos valores, que según la figura 57 es de una semana.

Finalmente, en la misma figura 57, se muestra la proyección de la duración total estimada del proyecto. Este valor es el Pronóstico de la Fecha de Terminación (PFT), que en este caso es de 12.11 semanas, período mayor a las 10 semanas programadas. Por lo tanto, se concluye que la obra sería finalizada 15 días naturales más tarde de lo planeado.

Conclusiones

Con base en lo observado y analizado en el desarrollo de la presente práctica, se concluye que:

1. Es importante contar con un estudio de suelos previo al diseño de los muros de gaviones, para optimizar la cantidad de recursos y por ende el costo de las estructuras.
2. Los bloques de roca (piedra) y las mallas de gavión representan alrededor del 75% del costo total de un proyecto de muro de gaviones.
3. Las características propias de los gaviones, como la flexibilidad, permeabilidad, facilidad constructiva y economía, los colocan como una de las soluciones de estabilidad más utilizadas en Costa Rica.
4. En el proyecto de muro de gaviones del Proyecto La Estefanía, el desperdicio de materiales fue menor al esperado, influyendo positivamente en el costo total de la obra.
5. La utilidad neta esperada del proyecto del muro de gaviones de la urbanización La Estefanía es del 50%, con un costo final de ₡27.215.592.
6. Se espera que la obra se concluya con un retraso de 15 días naturales respecto al cronograma original.
7. En la preparación de una oferta para un proyecto de gaviones, es factible considerar desperdicios hasta del orden del 5% para los bloques de roca y la malla, sin que esto afecte la utilidad.
8. El empleo de productos de malla hexagonal a doble torsión es una alternativa importante en las obras de ingeniería civil, dado su rendimiento y variedad de usos.
9. La falla de los muros de gaviones puede ocurrir por cualquiera de los siguientes factores: deslizamiento de la base, volcamiento, rotura del suelo de fundación, inestabilidad global e inestabilidad interna.
10. En muros de gaviones, los asentamientos diferenciales excesivos podrían afectar la serviciabilidad de las estructuras colocadas sobre el terraplén, pero este no es el caso del muro de gaviones del Proyecto La Estefanía.
11. La colocación de una capa lastre compactado en la base del muro disminuye los esfuerzos aplicados sobre el suelo de fundación.
12. La aplicación de geotextil en los muros de gaviones es esencial para garantizar la filtración, el drenaje y la separación, evitando la generación de presiones hidrostáticas.
13. La técnica del Valor Ganado se puede aplicar a cualquier proyecto de construcción y es útil para medir el desempeño del proyecto en cuanto al costo y al tiempo.

Apéndices

A continuación se presentan los apéndices preparados a lo largo del proyecto, desglosados de la siguiente manera:

En el apéndice 1 aparecen los diseños de cada una de las secciones del muro de gaviones, así como el plano constructivo.

El apéndice 2 se refiere al presupuesto de la obra y al control de costos.

En el apéndice 3 se muestra la programación del proyecto en Microsoft Project, además de los diagramas de seguimiento de la obra.

Referencias

- Asociación Costarricense de Geotecnia. 2003. **CÓDIGO DE CIMENTACIONES DE COSTA RICA.** Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica, No 35:37 p.
- Chamoun, Y. 2002. **ADMINISTRACIÓN PROFESIONAL DE PROYECTOS.** México: Editorial McGraw-Hill, No 196:201 p.
- Das, B. 2001. **FUNDAMENTOS DE INGENIERÍA GEOTÉCNICA.** México: Editorial Thomson Learning, No 339 p.
- Laporte, M. 2007. PROPUESTA PARA LA ESCOGENCIA DEL COEFICIENTE DINÁMICO PARA EL ANÁLISIS PSEUDOESTÁTICO DE ESTABILIDAD DE TALUDES. Costa Rica. No 9 p.
- Maccaferri. 1999. LA NATURALEZA RENACE DONDE NOSOTROS PASAMOS. **MACGUIDE.** Brasil. No 3:4 p.
- Maccaferri. 2001. OBRAS DE CONTENCIÓN. **NECESIDADES Y SOLUCIONES.** Brasil. No 8:15 p.
- Maccaferri. 2003. GAWAC BR-2.0. **MANUAL DE REFERENCIA Y USO.** Brasil. No 4:58 p.
- Maccaferri. 2005. GAVIONES Y OTRAS SOLUCIONES EN MALLA HEXAGONAL A DOBLE TORSIÓN. **ESPECIFICACIONES TÉCNICAS.** Brasil. No 3:5 p.
- Maccaferri. 2005. GAVIONES Y OTRAS SOLUCIONES EN MALLA HEXAGONAL A DOBLE TORSIÓN. **NECESIDADES Y SOLUCIONES.** Brasil. No 2:17 p.
- Maccaferri. 2005. ESTRUCTURAS EN SUELO REFORZADO CON EL SISTEMA TERRAMESH. **ENCARTE TÉCNICO.** Brasil. No 3:12 p.
- Maccaferri. 2005. ESTRUCTURAS EN TIERRA REFORZADA. **NECESIDADES Y SOLUCIONES.** Brasil. No 2:9 p.
- Maccaferri. 2006. FILTRACIÓN, SEPARACIÓN Y PROTECCIÓN. **NECESIDADES Y SOLUCIONES.** Brasil. No 2:3 p.
- Pavco. 2007. GEOTEXILES, FUNCIONES Y APLICACIONES. Costa Rica. No 15 p.
- Prodac. 2004. PIRKA SOFT VERSIÓN 1.0. **MANUAL DE USUARIO Y REFERENCIA TÉCNICA.** Perú. No 1:18 p.
- Prodac. 2007. SOLUCIONES PARA EL CONTROL DE LA EROSIÓN. **CATÁLOGO DE GAVIONES 2007.** Perú. No 3:14 p.
- Prodac. 2007. MANUAL DE INSTALACIÓN. **CATÁLOGO DE GAVIONES 2007.** Perú.
- Tapia, M. 2006. DISEÑO GEOTÉCNICO. **INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA.** Costa Rica. No 174:184 p.

