



**Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil**

**CONSTRUCCIÓN DE DIQUES DE GAVIÓN RECUBIERTOS DE CONCRETO
PARA CONTROL DE INUNDACIONES –CASO RÍO PENSATIVO-**

JOSÉ FERNANDO MORALES MÉNDEZ

Asesorado por Ing. Rudy Fernando Morales Mancilla

Guatemala, marzo de 2005

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**CONSTRUCCIÓN DE DIQUES DE GAVIÓN RECUBIERTOS DE
CONCRETO PARA CONTROL DE INUNDACIONES –CASO RÍO
PENSATIVO-**

TRABAJO DE GRADUACIÓN
PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE
LA FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

JOSÉ FERNANDO MORALES MÉNDEZ

ASESORADO POR: ING. RUDY FERNANDO MORALES MANCILLA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, MARZO DE 2005

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
VOCAL I	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
VOCAL II	Lic. Amahán Sánchez Álvarez
VOCAL III	Ing. Julio David Galicia Celada
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIO	Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EXAMEN PRIVADO

Decano	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
Examinador	Ing. Rafael Enrique Morales Ochoa
Examinador	Ing. Giovanni Rudamán Miranda Castañon
Examinador	Ing. Calvin Enrique Estrada Barrera
Secretario	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**CONSTRUCCIÓN DE DIQUES DE GAVIÓN RECUBIERTOS DE CONCRETO
PARA CONTROL DE INUNDACIONES –CASO RÍO PENSATIVO-**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 30 de septiembre de 2004.

José Fernando Morales Méndez

AGRADECIMIENTO

A manera de agradecimiento; deseo mencionar a todas las personas cuyo cariño y apoyo, me permiten hoy, alcanzar tan anhelada meta.

A Dios, por su infinito amor y sabiduría.

A mis hijas Fernanda José y Luisa María, por su amor incondicional; y a mi esposa Mónica, por su compañía y aporte para alcanzar esta meta.

A mis padres Rudy Fernando y Luz Gabriela, por su apoyo y amor, mil gracias; sin ustedes no lo hubiera logrado.

A mi hermana María Gabriela y, con especial dedicatoria a mi hermano Luis Pedro (q.e.p.d).

A las familias Méndez Barahona y Morales Mancilla; con especial cariño a mis tías y tíos, Luzma, Beatriz, Mito, Checha e Irma, Patty y Rodolfo, y Waldo;

a mis abuelos, José Alfredo (q.e.p.d.) y Tere, Marti y José Guillermo. A todos mis primos y primas, gracias por su compañía.

A todos mis amigos y colegas, en especial a Carlos Moncada, Manuel Ávila, Sergio Argueta y los hermanos Rodas Aldana.

A la Facultad de Ingeniería, en especial a los Ingenieros de la escuela de Ingeniería Civil.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	III
LISTA DE SÍMBOLOS.....	V
GLOSARIO.....	VI
RESUMEN.....	VII
OBJETIVOS.....	VIII
INTRODUCCIÓN.....	IX
1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA DE INUNDACIONES DE LA CIUDAD DE ANTIGUA GUATEMALA.....	1
1.1 Breve historia de La Antigua Guatemala y de cómo la han afectado las inundaciones	1
1.2 Propensión al fenómeno	6
1.3 Solución aplicada.....	14
2 DIQUES DE GAVIÓN PARA LA PREVENCIÓN DE INUNDACIONES	19
2.1 Estructura	20
2.2 Materiales utilizados para la construcción de diques	21
2.2.1 Gaviones	22
2.2.1.1 Descripción	22
2.2.1.2 Tipo utilizado	25
2.2.1.3 Proceso constructivo	27
2.2.2 Piedra	31
2.2.3 Concreto	33
3 CÁLCULO DE LOS DIQUES	35
3.1 Cálculos hidrológicos	35

3.2 Cálculos estructurales	39
4 DETALLES Y DIBUJOS DEL DIQUE	43
4.1 Detalles de medidas y especificaciones	44
4.2 Dibujos con las dimensiones de los diques construidos.....	48
4.3 Fotografías de diques construidos	51
5 CÁLCULO DEL COSTO DE CONSTRUCCIÓN DEL DIQUE	57
6 EVALUACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA	59
CONCLUSIONES.....	XI
RECOMENDACIONES.....	XII
BIBLIOGRAFÍA.....	XIII
APÉNDICES.....	XIV

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1. Mapa de la cuenca del río Pensativo.....	9
2. Cauces del río Pensativo.....	10
3. Canasto utilizado como gavión en la antigüedad.	22
4. Canasta de malla utilizada como gavión actualmente.....	23
5. Técnica de armado de los gaviones rectangulares tipo caja	28
6. Armado de canasta en campo.....	30
7. Llenado de canastas con piedra.....	31
8. Cantera utilizada para piedra de relleno.....	32
9. Vista frontal.	48
10. Vista lateral.....	49
11. Descripción de las partes del dique.....	50
12. Excavación para cimentación y disipador de energía.	51
13. Construcción de cimiento y disipador de energía.....	52
14. Dique construido en funcionamiento.	52
15. Disipador de energía en funcionamiento.....	53
16. Sección de canal; al fondo se observa el dique.	53
17. Vista previa construcción del dique y el muro.	54
18. Vista luego de construcción del dique y el muro.	54
19. Vista previa construcción del dique.	55
20. Vista durante construcción del dique.....	55
21. Vista antes de cerrar el dique; ver el nivel del sedimento.....	56

22. Vista luego de cerrar el dique; el nivel del sedimento llega al vertedero.	56
23. Configuraciones utilizadas	XV
24. Tipos de muro	XV
25. Distribución del empuje.....	XXI
26. Diagrama de aplicación del empuje.....	XXI
27. Abanicos para cálculo de coeficiente K_a	XXIV
28. Abanico para valor γ_g	XXVII
29. Esquema para verificación de rotura global.....	XXXVI

TABLAS

I. Medidas de canastas disponibles.....	26
II. Cálculo de crecida río Pensativo.	36
III. Cálculo de sección de canal río Pensativo.	37
IV. Cálculo de vertedero y tirante de dique mínimo.....	38
V. Cálculo del empuje.	40
VI. Chequeo al desplazamiento.	41
VII. Chequeo de seguridad al vuelco.	41
VIII. Chequeo de tensiones transmitidas.....	42
IX. Chequeo en secciones intermedias.....	42
X. Medidas del dique.....	44
XI. Integración del costo de un dique.	58
XII. Propiedades de suelos y rocas.....	XVI
XIII. Peso específico de rocas distintas.....	XXVIII
XIV. Tensiones admisibles para terrenos de fundación.....	XXXII

LISTA DE SÍMBOLOS

Ka	Coeficiente de empuje activo
β	Ángulo formado por el plano de empuje y la horizontal
φ	Ángulo de fricción interna del suelo
ε	Ángulo del talud sobre el muro con la horizontal
δ	Ángulo de fricción entre el muro y el terreno
Ea	Empuje activo
γ_s	Peso específico del suelo
H	Altura de actuación del empuje.
h	Altura del muro
b	Base del muro despreciando los escalones externos
a	Ancho del muro en la cima
d	Altura del empuje (de la base al punto de acción)
H	Altura libre del muro (sin incluir cimentación)
η'	Seguridad al desplazamiento
W	Peso propio de la estructura.
Ev	Componente vertical del empuje activo
Eh	Componente horizontal del empuje activo
B	Ancho de la base del muro
α	Inclinación del muro
η''	Seguridad al vuelco
Mv	Momento volcador
Mr	Momento resistente
σ_1	Tensión transmitida mayor
σ_2	Tensión transmitida menor
N	Resultante de las fuerzas normales a la base del muro
B	Base del muro
e	Excentricidad
σ_{max}	Valor máximo
σ_{adm}	Valor admisible
x	Valor de brazo utilizado
τ_{max}	Tensión máxima
τ_{adm}	Tensión admisible

GLOSARIO

Gavión	Estructura compuesta de una canasta de malla rellena de piedra.
Río	Cuerpo de agua, que corre de un punto alto a uno mas bajo en una cuenca.
Cuenca	Área de terreno delimitada por montañas, dentro de la que se delimita el flujo de la escorrentía de agua superficial.
Dique	Estructura diseñada para contener el flujo libre del agua en un río.

RESUMEN

La construcción de diques de gavión, recubiertos de concreto en el río Pensativo, responde a la necesidad de hacer un manejo responsable del río; se hace especial énfasis en prevenir inundaciones, que pudieran afectar a la ciudad de Antigua Guatemala.

Un dique es una estructura fluvial transversal, es decir, que se construye perpendicular al flujo libre del agua, con el objeto de regular la pendiente y velocidad de la misma. En el proyecto del río Pensativo, éstos fueron construidos con gaviones y luego recubiertos de concreto. Se utilizaron gaviones, pues ya se tenía conocimiento del sistema constructivo, así como su economía y rapidez para ser montados. El recubrimiento de concreto se utilizó para evitar la erosión del dique y prolongar su vida útil.

Los diques, en sí, son parte de un sistema que se comenzó a implementar en el río en 1996, pues en este año se inundó la calle Chipilapa, localizada a orillas del río. Este hecho motivo la búsqueda de soluciones al problema presentado por el río Pensativo para la ciudad. Desde ese año, se han hecho trabajos que buscan regular el río, con el fin de evitar catástrofes que pudieran dañar el patrimonio de la ciudad.

Es por esto que, luego de acumular experiencia y tener oportunidad de evaluar el comportamiento del río, se implementó el sistema de diques en el año 1999; el sistema sigue funcionando a la fecha y no se han reportado inundaciones, para validar su implementación.

OBJETIVOS

General

Documentar una experiencia práctica de control de inundaciones, que fue aplicada en el río Pensativo y que puede replicarse en otros ríos de Guatemala.

Específicos

1. Mostrar la aplicación del sistema constructivo de diques de gavión, que están recubiertos con concreto para la reducción de inundaciones.
2. Desarrollar el procedimiento de construcción de diques de gavión, para que sea replicable a otras condiciones de riesgo de inundación similares.

INTRODUCCIÓN

La Antigua Guatemala es patrimonio histórico de la humanidad; protegerla es un reto. Dentro de las amenazas a las que esta ciudad está expuesta, están los desbordes y consecuentes inundaciones provocadas por el río Pensativo, es a este problema al que se ha buscado dar solución.

La opción seleccionada proviene de la experiencia de muchas personas y ha sido aplicada por su eficiencia. La “Construcción de diques de Gavión para el control de inundaciones” es la simplificación de la intervención de ingeniería, realizada en el río desde 1997, con resultados positivos por lo que no se han reportado daños por inundaciones a la presente fecha.

El río Pensativo, vecino de la Antigua Guatemala, da la oportunidad de tratar el manejo de ríos; por la importancia de la ciudad, se hace necesario resguardarla de las inundaciones producidas por éste. La necesidad de resolver este problema hizo que las autoridades del gobierno central, a través de la Dirección General de Caminos y la Unidad Ejecutora de Conservación Vial, destinaran recursos para resolverlo.

El sistema constructivo no requiere de maquinaria ni tecnificación de la mano de obra; su tiempo de ejecución es corto y aprovecha materiales que fácilmente se localizan en los mismos ríos en los que se trabaja.

Esta opción simplificada presenta una solución que puede ser replicada en otros ríos del país; por este motivo se pretende documentar la experiencia, para que pueda ser aplicada o adaptada para solucionar problemas de inundaciones.

1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA DE INUNDACIONES DE LA CIUDAD DE ANTIGUA GUATEMALA

1.1 Breve historia de La Antigua Guatemala y de cómo la han afectado las inundaciones

La Ciudad de Antigua Guatemala fue la tercera localización de la capital de la región, desde su conquista por los españoles. En ese entonces, lo que hoy es Guatemala formaba parte de la Capitanía General de Guatemala, junto con el resto de los países centroamericanos. Esta Capitanía era una provincia española en América, al igual que México y parte de Sudamérica. En este momento, se buscaba fundar su capital, lo cual era de suma importancia, pues sería el centro administrativo del territorio de la capitanía.

La Antigua Guatemala fue la tercera localización de la capital de la región, pues el primer lugar donde se fundó fue Iximché, que tuvo que ser abandonado por la insurrección de los nativos Cachiqueles y el segundo, Almolonga (hoy Ciudad Vieja), que también fue abandonado al ser víctima de un terremoto combinado con una inundación.

El 10 de Marzo de 1543 se funda Santiago de Guatemala, ciudad que tomaría el nombre de Antigua Guatemala hasta 1774, que es el año en que la capital se trasladó a la localización actual; esta ciudad ocuparía el puesto de Capitanía General por más de dos siglos.

Por su importancia, fue trazada como una ciudad colonial; el trazo seguido es conocido como “tablero de ajedrez”; es una cuadrícula que en el centro alberga el parque central y los edificios gubernativos; en ese entonces, a los pobladores se les asignaba el lugar para su hogar, según su importancia; mientras más cercano al centro de la ciudad fuera un terreno, más importante era su dueño.

A lo largo de los 230 años que funcionó como capital, estuvo a merced de varios estilos arquitectónicos; fue de suma importancia el estilo colonial y el barroco presentes en la mayoría de edificaciones. Sin embargo, lo curioso es el motivo por el cual se conservan estas características hasta hoy.

La ciudad debió de ser abandonada; el motivo fue de nuevo un desastre natural. La ciudad ya había resistido algunos sismos, sin embargo, en 1773 fue sacudida por los terremotos de Santa Marta, nombrados así pues en su día ocurrieron, y la ciudad fue parcialmente destruida. Por este motivo, las autoridades decidieron que era mejor trasladar la capital a una nueva localización; por eso, fue abandonada y se emprendió la marcha hacia el valle de la Ermita, donde actualmente se encuentra la ciudad de Guatemala.

La noticia de un traslado no fue bien recibida por todos los residentes y así se dividió la población; algunos decidieron permanecer en la ciudad en ruinas a pesar de la prohibición de hacerlo. Esta resistencia y permanencia parcial de pobladores no pasó inadvertida, pues en 1774 el Rey de España emitió una real cédula nombrando a la ciudad la “Antigua Guatemala” y ordenando su completo abandono. De nuevo, se ignoró la orden y las autoridades no velaron por que se cumpliera, pues estaban ocupados con la fundación de la nueva capital.

Es interesante también saber que la población, que permaneció siempre allí, tuvo la intención de restaurar los monumentos arquitectónicos de la ciudad, las fuentes, el palacio de los capitanes, la casa de la moneda, la catedral, un sin número de edificaciones religiosas y particulares, de gran belleza. La resistencia al traslado de estos pobladores rindió frutos en 1799, año en que se celebró el primer cabildo de La Antigua Guatemala y fue nombrado su primer alcalde.

Sin embargo, la ciudad estuvo a merced de la madre naturaleza, desde su abandono por las autoridades hasta mediados del siglo XIX; en este momento, se introdujo al país el cultivo del café y esto le dio a la ciudad el despertar económico que necesitaba.

La población había ido en aumento, pero la bonanza de las fincas de café situadas en los alrededores de la ciudad hizo que de nuevo fuera necesario contar con servicios en la misma y se tomó mayor interés en restaurar sus monumentos.

Con este despertar de la ciudad, se podría pensar que correría la misma suerte que las demás ciudades coloniales como el Distrito Federal en México o Lima en Perú, ciudades contemporáneas, pero actualmente totalmente transformadas. Felizmente el mismo abandono de la ciudad ha sido su salvación, pues para el momento en que de nuevo toma vida, ya se aprecia su importancia histórica.

Las autoridades evitaron realizar reparaciones; desatendieron la ciudad con la intención de que los pobladores, que se resistían a abandonarla, se incomodaran y se fueran. Este hecho permitió que la ciudad conservara su trazo colonial y sus edificaciones estuvieran en la cúspide del período barroco, y por consiguiente se dio la posibilidad de restaurarlas. Esto, tal y como ya se mencionó, es único en América Latina, pues las demás ciudades contemporáneas han sucumbido al crecimiento poblacional y la modernización.

La conservación de la ciudad siguió progresando y tomando auge, al punto que el 30 de marzo de 1944 fue declarada Monumento Nacional y se le asignaron fondos para conservarla y restaurarla. Además fue incluida en la lista del Patrimonio Mundial Cultural y Natural de la UNESCO (No. 65) en noviembre de 1979, y a la fecha mantiene su carácter único en el mundo.

Es indudable la importancia de la ciudad; su relación con el río Pensativo es histórica. En un principio, se buscó la cercanía de la ciudad a un cuerpo de agua para utilizarlo como abasto y cualquier otro fin que fue concebido por los planificadores.

El caso es que históricamente las inundaciones han afectado la ciudad desde su fundación en el año 1543, sin embargo, se encuentran datos de inundaciones de importancia hasta el año 1884, pues hasta ese año aparecen fuentes formales, que pueden consultarse acerca del fenómeno.

De los efectos de las mismas, se encuentran registros con datos de pérdida de bienes y la ruina de áreas de producción agrícola y de crianza de aves y ganado, así como de inundaciones en el casco urbano e incluso que las aguas llegaron hasta el portal de comercio, en el parque central.

Así se registran los años siguientes, como años en los que ha habido inundaciones de importancia: 1884, 1887, 1896, 1898, 1929, 1933, 1944, 1950, 1951, 1953, 1969, 1979, 1985, 1986; la última de importancia en 1996. A raíz de esta última, se realizaron trabajos y se comenzaron a invertir recursos para proteger la ciudad y sus habitantes de este fenómeno.

1.2 Propensión al fenómeno

Una inundación consiste en la presencia de cantidades masivas de agua en áreas no destinadas para el tránsito de la misma. Las inundaciones ponen en riesgo la vida de las personas, que viven en áreas inundables y sus bienes, además de dañar áreas de producción agrícola y de crianza de avícola y ganadera. Aunado a estos factores, en el caso de La Antigua Guatemala, pesa que los bienes inmuebles son patrimonio de la humanidad, los cuales deben ser protegidos y conservados.

Sabiendo esto, se buscan las causas por las cuales la ciudad es tan propensa a sufrir inundaciones. Es importante recordar que la ciudad fue fundada en las cercanías del río, para poder servirse del mismo. Sin embargo, poco se piensa en que la ciudad se fundó en los dominios del río.

Los ríos, por naturaleza, se encargan de parte del ciclo del agua sobre la tierra; siendo sus principales funciones conducir el flujo de agua de lluvia hacia el mar y encargarse del transporte de sedimentos provenientes de la erosión de la superficie del suelo de un área determinada; esta área se llama cuenca. La tierra no es un solo valle, sino un conjunto de valles con sus respectivos ríos; de esa manera es que un río tributa a otro, hasta que finalmente pueden llevar el agua al mar; por está razón se delimita el área que cada río drena como una subcuenca, que es parte de la cuenca total del río que desemboca en el mar.

Los ríos funcionan por gravedad; así nacen en la parte alta de la cuenca y conducen el agua hacia el mar u otro río más grande. Generalmente la parte alta de la cuenca es una zona con cerros o incluso montañas y la parte baja consiste en un valle. A este tipo de ríos se les llama ríos aluviales.

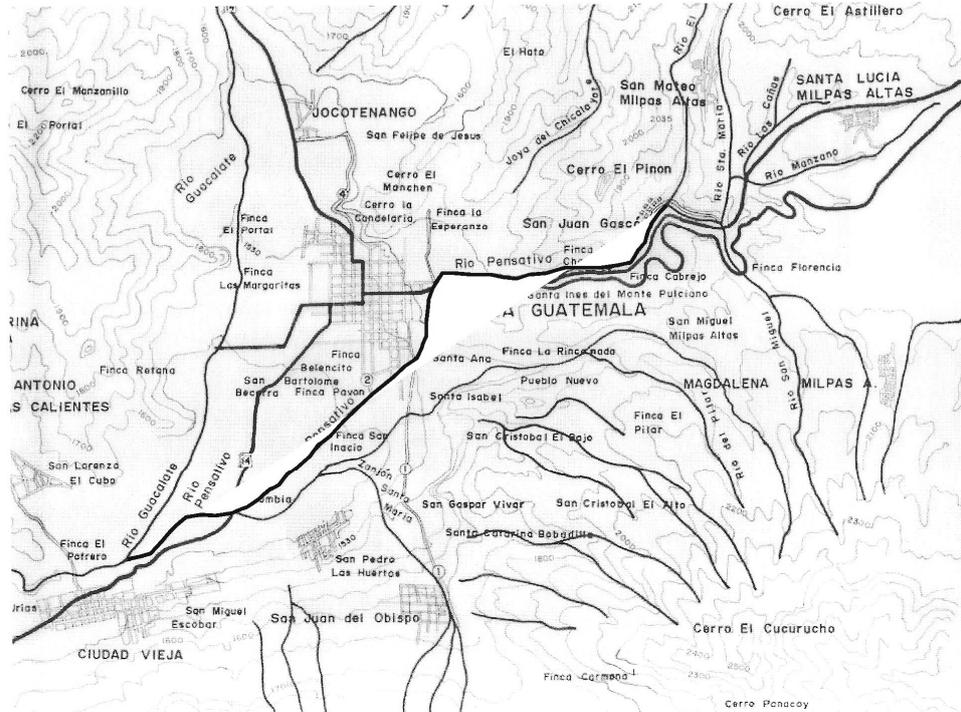
Un río aluvial sigue un comportamiento definido; transporta el agua desde la parte alta de la cuenca hasta el cuerpo receptor; en la parte alta, tiene una mayor pendiente que permite una mayor velocidad que en las partes media y baja; con mayor velocidad en la parte alta, se transporta material, que se deposita en la parte baja por la disminución de velocidad. El río mismo se equilibra naturalmente y, en cumplimiento de esto, se desplaza por el valle creando aluviones en partes bajas y planas, que son condiciones ideales para asentar una ciudad. En este proceso, el río se desplaza dentro del valle; es decir, que el río transporta material desde la parte alta y sedimenta material en la parte baja, llenando su propio cauce hasta que debe migrar hacia otro, quizá al lado del anterior. Este proceso, por supuesto, toma largo tiempo (1,000 años son pocos en la vida de un río).

El problema se da con la intervención humana, que consiste en la modificación en el uso del suelo sobre el que el agua drena hacia el río, como es el caso de cultivos sin medidas de protección, deforestación, incremento de áreas impermeables. Con esta intervención, se utilizan áreas que eran del río, por lo que debe confinarse para permitir el desarrollo de dichas áreas.

El Pensativo es un río aluvial, que forma parte de la cuenca del río Guacalate; a su vez la subcuenca del río pensativo es hidrográficamente formada por los ríos: Santa María, Manzano, San Miguel, Las Cañas, El Sauce, Joya del Chilacayote y Zanjón Santa María.

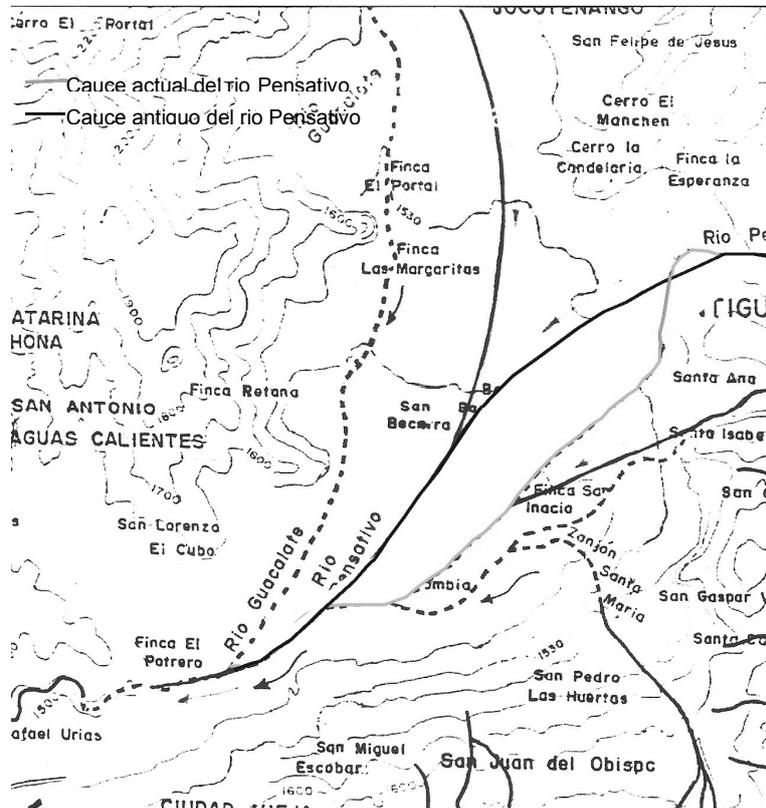
La subcuenca del Pensativo tiene una extensión de 77.39 Km² y cubre los municipios de: Ciudad Vieja, Santa María de Jesús, Antigua Guatemala, Santa Lucía Milpas Altas y Magdalena Milpas Altas. Se puede dividir la subcuenca en tres partes: Alta, Media y Baja. En la parte alta, se recolecta el agua de los montes que rodean el valle; en la parte media, se da la mayor sedimentación; en esta parte, se encuentra la ciudad; en la parte baja, se pasa por algunas fincas y se da la confluencia con el Guacalate. La altura en la parte más alta de la cuenca es de 2,480 metros sobre el nivel del mar y la más baja es de 1,547.50 msnm; el cauce tiene una longitud aproximada de 10 kms (Ver figura 1).

FIGURA 1. Mapa de la cuenca del río Pensativo.



La intervención humana del Pensativo se ha dado desde la fundación de la ciudad. Para poder ocupar el valle Panchoy, se desvió el río por un túnel que pasaba por debajo de la ciudad, hasta que en 1773 colapsara a causa de los terremotos de Santa Marta; al ser imposible reparar el túnel, los habitantes desviaron artificialmente el río a su cauce actual, bordeando la ciudad. Esto representa un problema, a lo que debe sumarse que el cauce escogido para el río tiene una altura de entre 2.00 y 2.50 metros sobre el nivel de las casas de la ciudad (véase figura 2).

FIGURA 2. Cauces del río Pensativo.



Otro factor que se debe considerar es que la ciudad ha crecido y ha terminado por absorber el río. Esto ha significado la construcción de puentes sobre el cauce; no es que sea malo tener puentes (17 puentes sólo en el área de la ciudad). Todos son de dimensiones reducidas, que ocasiona remansos y sedimentación adicional en el cauce, lo cual constriñe el cauce y si le sumamos la presencia de la población (basura en el cauce) existen posibilidades de una obstrucción total del cauce y, por consiguiente, el desbordamiento del río. También se ha limitado la posibilidad de aumentar el tamaño del cauce y darle un mejor tratamiento al río.

No se debe olvidar la sedimentación, que como ya se explicó, es el depósito de material en la parte media del cauce del Pensativo, pues en esta hay menor pendiente y, por lo tanto, una disminución en la velocidad del flujo, lo cual permite la sedimentación de las partículas arrastradas por el río. Esto va de la mano con el tipo de formación geológica del valle de Panchoy. Realmente puede seguirse la línea de la morfología del río, sin embargo, ésta en sí misma es un estudio extenso, por lo que sólo se expondrán los elementos de mayor relevancia.

- Primero: el patrón de drenaje, seguido por el Pensativo es Dendrítico, es decir, que lo recoge con brazos muy pequeños en las partes altas y lo conduce en su cauce principal. Esto es importante, pues gran parte del agua es recolectada antes de entrar a la ciudad; aun así, otros afluentes tienen su confluencia con el Pensativo en la parte baja.

- Segundo: la geología de la superficie, pues en el cauce del Pensativo se encuentra mucha presencia de arena y de suelo poco cohesivo; esto es de suma importancia, pues el suelo poco cohesivo es fácilmente erosionado y transportado aguas abajo.
- Tercero: el tipo de roca del lecho; en este caso, sí existe pero está muy dispersa, lo que permite una mayor erosión del lecho y arrastre de material.
- Cuarto: el uso de la tierra, pues se tiene que el Pensativo recibe una fuerte cantidad de material por la modificación en el uso de la tierra. Los cultivos en San Mateo y Santa Lucía Milpas Altas y el aporte de los taludes de las carreteras, son las fuentes de material más grandes.
- Quinto: la vegetación de la cuenca; la presencia de vegetación evita la erosión, y de nuevo el uso y la transformación en la vocación del suelo contribuyen a la sedimentación.

Estos cinco factores se utilizarán para evaluar las fuentes de sedimento, que luego el río debe de transportar.

El Pensativo no transporta actualmente gran cantidad de agua durante la época de verano, y por la misma formación geológica del valle la infiltración, se encarga del agua, de igual manera, a la altura de la finca la Chácara, en la entrada de la ciudad, se embalsa el agua y esta es utilizada para los cultivos. Únicamente aguas abajo, luego del puente Arroyave, se encuentra algún flujo en el cauce. Sin embargo, durante la época lluviosa, se conduce toda la escorrentía y el río se transforma en una fuerza incontrolable que busca drenar el valle. Esto afecta, pues una vez se satura el suelo y la infiltración es imposible; el río pasa de no llevar agua hasta llevar 50 m³, y esto sólo en la tercera o cuarta lluvia fuerte en la región.

Por esto se da un río muy caudaloso en invierno, que ha sido absorbido por una ciudad y le ha dejado poco espacio para moverse, con la gran cantidad de sedimento que le sube el nivel y con la gran cantidad de puentes pequeños, en los que puede hallarse con un tapón y por si fuera poco, está hasta 2.5 metros sobre el nivel de la ciudad. Eso deja un río propenso a desbordamientos, que pueden ser desastrosos para la comunidad de la Antigua Guatemala.

1.3 Solución aplicada

Ahora se debe responder cómo se dio solución al problema que se enfrenta.

El río ha sido previamente intervenido y ha hecho que en el verano conduzca muy poco o ningún caudal que puede dar la oportunidad de trabajar en el cauce y diseñar soluciones adecuadas.

Para empezar, se sabe la importancia de la ciudad de La Antigua Guatemala; esta importancia es por que a medida que la ciudad ha crecido y se ha enriquecido, la tierra dentro de la misma se vuelve muy valiosa. De esta cuenta, el terreno que sirve al río, que está dentro de la ciudad, toma valor comercial y se restringe lo más posible al cuerpo de agua, para poder explotar la tierra como un bien raíz.

Lo difícil de esto es que actualmente las soluciones hidráulicas requieren de espacio, ante todo el diseño de cauces en dos fases: una pequeña en el centro, que permite al caudal normal circular y una más extensa en los laterales que permite a las crecidas conducirse sin problema. Como se puede inferir esto, en el caso del Pensativo, es imposible, por lo cual se han adoptado las soluciones que antes se describen.

De estudios hidrológicos de la cuenca del Pensativo, se determinaron los valores para una crecida máxima con un período de recurrencia de 25 años. Este valor de diseño es de 60 m^3 , pero por el mismo motivo de insuficiencia de espacio en ciertos lugares, sólo es posible encauzar 20 m^3 .

Además de esto, hay que enfrentar el problema económico, que por vivir en un país en vías de desarrollo y destinar recursos de las carteras de comunicaciones, para tratar un río año con año, no siempre es una prioridad.

Así se tiene que es un río propenso a desbordarse, con limitaciones, de poco presupuesto, de espacio para diseñar un canal adecuado y con una ciudad patrimonio de la humanidad con 18,000 habitantes, a los cuales se debe proteger de una inundación.

Tomando en cuenta las anteriores consideraciones, se diseñaron secciones óptimas para cada parte del canal, y se busco hacer el canal lo más ancho posible. En la parte antes y después de la ciudad, se trata de fincas en las que hay alguna holgura para trabajar a lo ancho, sin embargo, el ensanchamiento del canal dentro de la ciudad es casi imposible.

En el Pensativo, se trabaja desde 1997, que como ya se indicó el río se desbordó en 1996 inundando la calle Chipilapa y dejó hasta 1 metro de lodo a su paso. A raíz de esto, el Gobierno Central, a través de la Dirección General de Caminos, comenzó a realizar trabajos para mitigar los efectos y minimizar la posibilidad de inundaciones y luego, a través de la Unidad Ejecutora de Conservación Vial. En un principio, los recursos fueron destinados al dragado del cauce, que consiste en remover el material del fondo y depositarlo en otro lugar. En esta primera experiencia, el material fue depositado en los laterales del cauce en forma de borda.

Una borda es la estructura lateral, que se encarga de confinar al río dentro de su cauce; el problema con esta práctica es que una vez colocado el material en la borda era fácilmente erosionado durante una crecida, y de nuevo pasaba a formar parte del material de sedimento que origina el problema.

Así comenzó la evolución del proyecto y el material dragado del fondo del río comenzó a ser transportado a botaderos municipales autorizados, en los que el material se depositaba lejos del cauce, lo que hacía imposible que regresara a formar parte del sedimento. Adicionalmente al depositar el material en los botaderos de basura de la Municipalidad de La Antigua Guatemala y Pastores, se obtuvo un valor agregado para proveer material de relleno.

Otra línea de acción fue modificar la pendiente de la parte media del cauce, tratando de aumentarla hasta el 2%; esto fue con el fin de aumentar la velocidad al flujo y tratar de evitar la sedimentación en esta parte. Esto se hizo construyendo guarda niveles y protegiendo los pies de los puentes.

Además, se comenzó a definir el ancho del cauce haciendo las bordas con gaviones; esto le provee de una mayor estabilidad a los laterales del río, pero confina al flujo de agua a una sección definida.

Esta última parte cobra relevancia, pues a nivel nacional no se conoce una experiencia en la que se utilicen gaviones tan extensamente como aquí. La importancia de este sistema constructivo provee de una solución de bajo impacto ambiental, que se integra rápida y eficientemente con el medio circundante. Además de esto, la experiencia obtenida servirá para que más adelante se puedan construir los diques.

Al aplicar estas soluciones, se hizo evidente cuán oneroso resultaba mantener un río, en especial, dragar el río, en diferentes partes, muchas veces al año. Esto se solucionó con la construcción de un desarenador en la entrada de la ciudad, justo antes del puente Matazano. Esta estructura tiene la capacidad de almacenar 1,000 m³ de material de sedimento, práctica que define el almacenamiento de material en un mismo lugar, que hace más efectiva la utilización de recursos.

A pesar de dichos esfuerzos, no se logró controlar por completo al Pensativo. En el río, se invierten cerca de 4 Millones de Quetzales anualmente y, por lo menos la mitad es invertida en el dragado del lecho. Es importante recordar que el sistema necesita mantenimiento y para realizarlo se necesitan recursos.

Así, pues, se presenta un exceso de material de sedimento aguas abajo y no se tiene la suficiente capacidad para limpiarlo. En este momento, se pensó en construcción de diques, con el propósito de retener la mayor cantidad de material posible y estabilizar el cauce. Un dique es una obra fluvial transversal, que permite el control de pendientes y el flujo de material de sedimento.

En este caso, se aprovechó la experiencia en construcción de gaviones, pues se construyen rápidamente. Además se pensó en que durante el verano, el río conduce muy poca agua, lo que permitiría trabajar dentro del cauce.

El siguiente paso en la solución fue destinar la inversión, pues debe seguirse dando mantenimiento al cauce con dragado, continuar la obra longitudinal y construir los diques.

Así es que era necesario hacer un balance que permitiera seguir con todo el trabajo. Éste consistió en construir primero los diques aguas arriba de la ciudad y retener la mayor cantidad de material posible allí.

Por supuesto, esto afectaría el balance de material del río, pero sería absorbido con la construcción de diques dentro del cauce en la ciudad, y daría la oportunidad de dar la pendiente adecuada al río y de espacios, en los que se permitiera darle mantenimiento periódico al cauce. Con esta proyección, se decidió comenzar los trabajos y destinar los recursos anuales aportados por COVIAL.

2 DIQUES DE GAVIÓN PARA LA PREVENCIÓN DE INUNDACIONES

Una obra fluvial es toda aquella estructura construida dentro del cauce de un río, con la finalidad de encauzar, corregir o controlar el curso natural del agua.

Es importante pensar en el río como un organismo vivo y que las intervenciones que se hagan en él no tengan impacto ambiental negativo y se integren rápidamente con el medio. Esta función se cumple con el sistema constructivo de gaviones.

Las obras fluviales pueden ser longitudinales y transversales. Las longitudinales son aquellas aplicadas en los laterales de los ríos, con el fin de delimitar el cauce, proteger las orillas contra erosiones y desbordamientos, recuperar terrenos ribereños y otras aplicaciones. Las transversales son aquellas que son construidas dentro del lecho del río y se oponen al flujo del agua, con el fin de modificar la pendiente del río, controlar el transporte de sólidos, almacenar agua, mitigar efectos de crecidas y otras aplicaciones.

En conclusión, un dique es una obra transversal que en este caso se encargaría de retener material de sedimento y permitirían modificar la pendiente del río, adecuándola al diseño hidráulico.

2.1 Estructura

Los diques, estructuralmente, son una presa pequeña de “vertedero”; esto de acuerdo con su diseño hidráulico y estructuralmente, se diseñan como un muro de gravedad, con el cuidado de tomar en cuenta la hidráulica.

Una presa para los fines se define como un muro construido transversalmente, a través de un río o una corriente de agua para regular su caudal o elevar su nivel. El propósito establecido y las condiciones del lugar de construcción determinarán el tipo de presa que debe de utilizarse.

En este caso, se seleccionó una presa de “vertedero”, que está diseñada para regular el caudal del río y descargar sobre su cresta; debe ser construida de material no erosionable y debe de tomarse en cuenta la caída de agua, que se formará para construir un dissipador de energía.

Este tipo de presa permite el flujo del agua, pero retiene los sólidos transportados por el río al controlar su pendiente y velocidad. En este caso, aguas arriba de la ciudad, se disminuyó la pendiente para permitir una mayor sedimentación, y a nivel de la ciudad se aumentó para evitarla.

La estructura consiste en un muro que debe tener el peso para trabajar por gravedad y resistir la erosión, sin ser completamente impermeable, pues debe permitirse la infiltración de agua en el lecho del cauce.

La estructura es sencilla y se simplifica aún más por la utilización de gaviones que tienen medidas fijas. La misma se compone del muro del dique y el dissipador de energía; ambos son construidos de gavión recubierto de concreto. El muro es rectangular de seis metros de ancho, dos metros de altura libre más un metro de cimentación; el dissipador de energía es un rectángulo de un metro de altura y seis de ancho construido al mismo nivel de la cimentación. El muro es continuo de seis metros de ancho en la cimentación y en dos metros de altura sobre esta; luego se deja un metro libre para formar el vertedero y se colocan dos gaviones a cada lado, que descansan un metro sobre el muro y un metro sobre la borda del río, con el propósito de encauzar el flujo de agua hacia el vertedero y evitar así un posible desbordamiento por los lados.

2.2 Materiales utilizados para la construcción de diques

Los materiales deben ser seleccionados de acuerdo con el fin que deben tener. En este caso, se establece que servirán para una obra transversal que debe ser rápidamente construida, resistente a la erosión, así como trabajar por peso. Esta obra consiste de un muro masivo y un dissipador de energía de medidas mínimas definidas. Ya se indicó que se utilizarían gaviones, pues son de medidas fijas que permiten expandir el diseño, además de construirse rápidamente y con menor costo; adicionalmente ya se cuenta con experiencia en su utilización; la desventaja es que son estructuras permeables que sucumbirían rápidamente a la erosión, para lo que habrá que revestirlos con una capa de concreto. En el apartado dedicado a los materiales, se proporciona mayor información en cuanto ellos, pues son la pieza principal de la estructura. A continuación, se hace una descripción amplia de los materiales utilizados.

2.2.1 Gaviones

2.2.1.1 Descripción

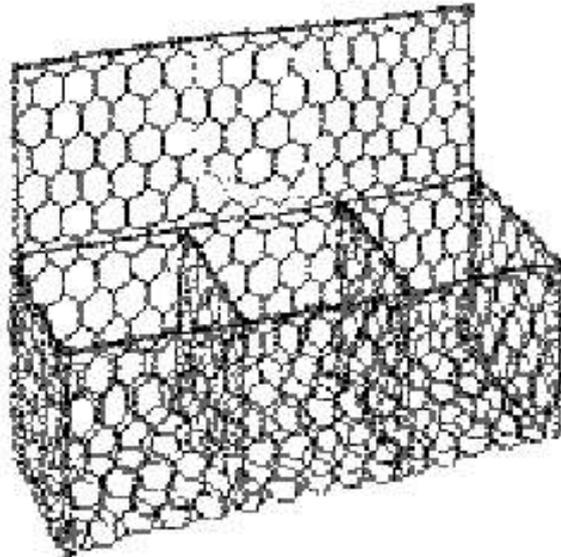
La historia de los gaviones comienza en Italia durante el siglo XVI, cuando se utilizaban canastas de mimbre rellenas de tierra, para reforzar emplazamientos militares o reforzar orillas de ríos. Estos canastos eran llamados por sus inventores italianos “gabbioni” o “jaulas grandes”.

A medida que la ingeniería evolucionó, se mejoraron las ideas que por su practicidad ofrecen soluciones eficientes; de esta manera, se ha continuado con la utilización de este tipo de estructuras, mejorándolas y adaptándolas a nuestra era, como es el caso de los gaviones que hoy se utilizan.

FIGURA 3. Canasto utilizado como gavión en la antigüedad.



FIGURA 4. Canasta de malla utilizada como gavión actualmente.



El canasto de mimbre ha evolucionado en uno confeccionado con malla hexagonal a doble torsión, con diversidad de formas y medidas distintas, que se han desarrollado y adaptado para funcionar en las distintas aplicaciones de ingeniería, que se ha dispuesto para ellos. La tierra utilizada en un principio ha sido reemplazada por roca, lo que provee una estructura fuerte y duradera.

Un gavión no es un simple recipiente lleno de roca que pesa mucho, sino una estructura de medidas definidas que funciona integralmente dentro del conjunto, que forma una tela de bloques pesados entretejidos en una estructura flexible con gran resistencia a la tensión y compresión, pues se vuelven fuerzas alternantes ante esta estructura.

En general, se puede describir un gavión así: es una estructura confinada por malla hexagonal rellena de roca y emplazada en un conjunto con un fin definido.

Las características más destacadas de las obras en gaviones son en resumen las siguientes:

- Gran flexibilidad, que permite que la estructura se adapte a las deformaciones del terreno, que permiten mantener su estabilidad y eficiencia.
- Elevada resistencia, debido al gran peso de la obra, la fricción entre las piedras, su resistencia a la compresión y la elevada tensión de tracción, que es soportada por la malla (con baja deformación).
- Permeabilidad adecuada, que permite el drenaje de las aguas de infiltración, eliminando el empuje hidrostático.
- La puesta en obra es extremadamente sencilla y económica, y no requiere equipos ni mano de obra especiales. Puede ser usado para el relleno canto rodado o piedra partida.
- El llenado puede ser realizado manualmente o con el auxilio de equipo normal de obra.
- Se integra armónicamente con el paisaje; permite el desarrollo de vegetación, sin que esto traiga inconvenientes, y se asegura por el avance de la naturaleza la estructura construida.

2.2.1.2 Tipo utilizado

Aunque los gaviones actualmente se fabrican en una gran diversidad de formas, según su uso, interesan los de forma rectangular. En este caso se utilizaron gaviones de tipo caja rectangular, de dos metros de ancho, uno de alto y uno de ancho, que forma dos compartimentos de un metro cúbico cada uno. Los gaviones están confeccionados con malla hexagonal a doble torsión; la malla es de tipo 8x10x12 y el alambre galvanizado es de 2.7 mm de diámetro; al sumar el recubrimiento plástico, se alcanza un diámetro de 3.8 mm.

Como se indicó en el inciso anterior, los gaviones se entretajan entre sí, para formar una estructura. En este caso, la estructura es el cuerpo del dique, que tiene el propósito de mantener el nivel del lecho del río y lo estabiliza, para evitar así el transporte de material aguas abajo.

Se debe recordar que las obras hidráulicas transversales están construidas en contra del flujo del cuerpo de agua; con esto en mente, es más fácil comprender cuál fue la necesidad de hacer el trabajo rápidamente durante la época de estiaje.

Por este motivo, se necesitaban gaviones que pudieran ser rápidamente construidos en el cauce. Con el concepto de entretejer una estructura, que tuviera suficiente entereza, se escogieron las canastas de dos metros cúbicos. Éstas proporcionan suficiente volumen y su tamaño las hace entrar perfectamente dentro de las secciones mínimas del cauce diseñado.

TABLA I. Medidas de canastas disponibles.

Largo (m)	Ancho (m)	Altura (m)	Volumen (m ³)	Diafragma (n)
1,50	1,00	0,50	0,75	—
2,00	1,00	0,50	1,00	1
3,00	1,00	0,50	1,50	2
4,00	1,00	0,50	2,00	3
1,50	1,00	1,00	1,50	—
2,00	1,00	1,00	2,00	1
3,00	1,00	1,00	3,00	2
4,00	1,00	1,00	4,00	3

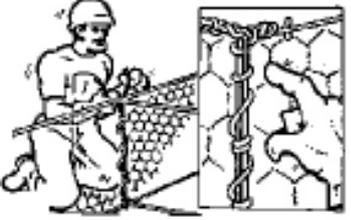
Será más fácil comprender el tipo de estructura y el uso, una vez se revise, en el apartado siguiente, el proceso constructivo de un muro de gavión.

2.2.1.3 Proceso constructivo

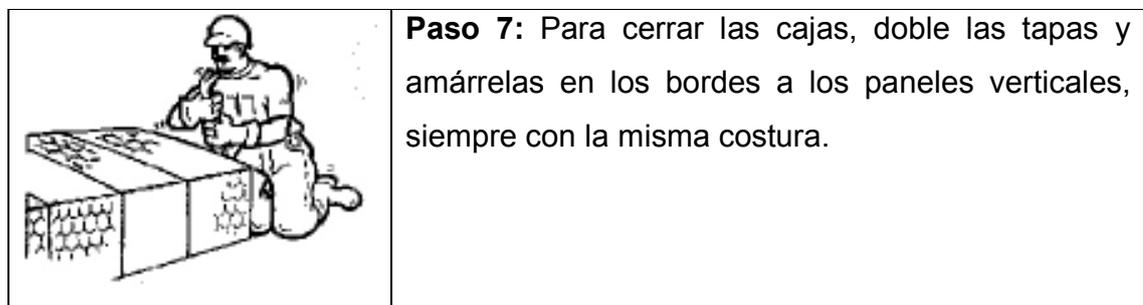
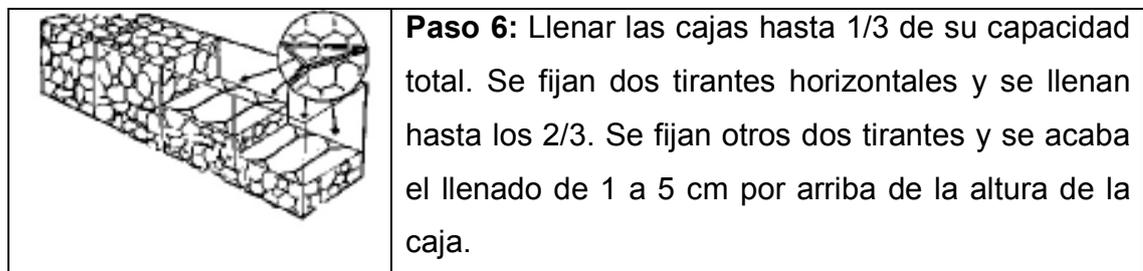
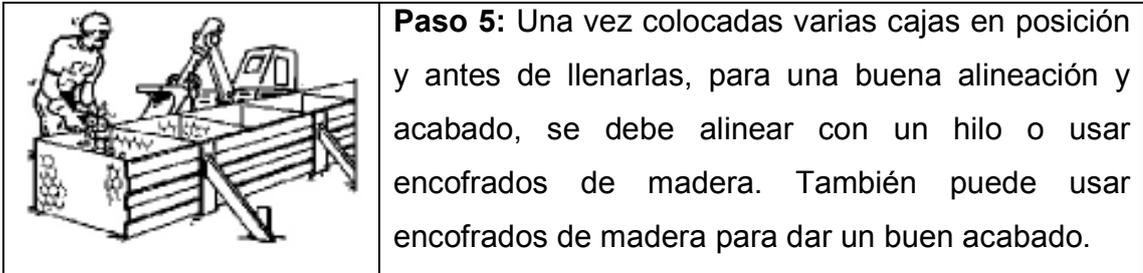
El proceso constructivo del gavión consiste en transportar hasta el lugar de colocación la canasta doblada; en este momento parece un rectángulo plano de malla; se procede a armar el cajón, haciendo las costuras en los bordes y en el diafragma con alambre alternando entre vueltas simples y dobles, para luego colocarlo en el lugar donde será relleno; en este momento ya se dispuso el lugar que ocupará el gavión en la estructura, el cual debe de alinearse, según sea necesario y amarrarse a los inferiores y laterales que pudieran existir. Se comienza a relleno en tercios de altura, a manera de colocar un tensor a cada tercio en cada dirección. El relleno debe permitir la máxima deformabilidad de la estructura, así como dejar el mínimo porcentaje de vacíos, asegurando al máximo el buen peso de los elementos; para esto, es necesario acomodar manualmente la piedra; es común, en nuestro medio, que todo el trabajo sea manual, pero puede ser relleno con maquinaria, si fuera necesario. Se deben colocar durante el relleno, en el interior de los gaviones, tensores horizontales, a $1/3$ y a $2/3$ de la altura del mismo, para conseguir que las paredes opuestas resulten solidarias entre sí. Los tirantes permiten un mejor alineamiento de las paredes en vista y evitan la deformación de los gaviones durante el relleno. Este tensor es una tira de alambre galvanizado, del mismo tipo del utilizado en las costuras, que permite mantener la estructura rectangular del gavión, sin importar la forma de las rocas de relleno utilizadas. Luego de ser relleno, se le hace la costura final y, según su ubicación, se le coloca encima otra canasta para ser rellena o se deja libre.

A continuación, se presenta un esquema de cómo debe ser construido un gavión caja rectangular:

FIGURA 5 Técnica de armado de los gaviones rectangulares tipo caja

	<p>Paso 1: Abrir el fardo y desdoblar el gavión sobre una superficie plana y rígida. Pise la red hasta eliminar las irregularidades.</p>
	<p>Paso 2: Doblar los paneles para formar la caja, juntando los cantos superiores y entrecruzando los alambres que salen de los paneles.</p>
	<p>Paso 3: Cortar un pedazo de alambre de 1.5 m de largo. Se fija en la parte inferior de las aristas, amarrando los paneles en contacto, alternando vueltas simples y dobles a cada malla. Se repite la operación con los diafragmas.</p>
	<p>Paso 4: Amarrar varias cajas en grupos, siempre con el mismo tipo de costura. Se llevan los grupos de cajas hasta el lugar determinado en el diseño y se amarran a las cajas ya colocadas, cosiendo en todas las aristas en contacto.</p>

Continúa figura 5



Las fotografías que se presentan a continuación muestran fases del proceso de construcción realizadas en el proyecto del río Pensativo (ver figuras 6 y 7).

FIGURA 6. Armado de canasta en campo.



FIGURA 7. Llenado de canastas con piedra.



2.2.2 Piedra

Es el material de relleno utilizado para rellenar el gavión; de preferencia debe ser canto rodado, es decir, con aristas redondeadas; también se ha utilizado piedra de cantera, siempre y cuando permita acomodarla, sin que las aristas dañen la malla del gavión. En ninguno de los casos, la piedra debe tener menos de 15 ni más de 35 cm de diámetro; de esta manera se mantiene la uniformidad dentro del gavión y se evita la salida de material del mismo; sin embargo, es permitido utilizar hasta un 5% de roca de mayor tamaño.

Debe tomarse en cuenta la importancia que tiene utilizar piedra de buen peso específico; la importancia radica en la forma de trabajar del gavión, pues éste es una estructura que trabaja por su peso. Si se selecciona piedra densa y de buen peso, y se respetan las dimensiones fijadas para la misma, se facilitará su colocación dentro del gavión. Por esta razón, debe evitarse utilizar roca volcánica, pues es porosa, de bajo peso y quebradiza.

En este caso, se utilizó piedra de cantera; la ventaja presentada por ésta es que al ser en su mayoría plana permitía acomodarla en capas y dejar un gavión uniforme que se deforma menos y tiene mejor aspecto, que uno relleno con canto rodado.

FIGURA 8. Cantera utilizada para piedra de relleno.



2.2.3 Concreto

El concreto es una mezcla de cemento Pórtland, agregado fino, agregado grueso, aire y agua; es en sí mismo una maravilla moderna que es temporalmente plástico y permite su colocación en cualquier tipo de molde y luego, por reacción química, se convierte en una masa sólida.

Para comprender por qué se utilizó concreto, se debe tener en cuenta que el gavión es una estructura permeable; esta característica, en una obra hidráulica transversal, puede provocar erosión y destruir la estructura. Un mayor grado de permeabilidad en la estructura puede ser beneficioso en otro tipo de obras, pues elimina la necesidad de un sistema de desagüe. En las obras hidráulicas longitudinales, también se eliminan así las presiones contrarias ejercidas en las orillas de los ríos, por la variación de la profundidad del agua, que se debe a las crecidas y los estiajes. La solución a este problema fue revestir los gaviones con concreto.

Las partes de la estructura, que se encuentran expuestas, son revestidas con concreto para evitar la erosión; y las partes de la cimentación, que no fueron revestidas, tienen menos contacto y permiten la infiltración de agua en el lecho, y así eliminar las presiones innecesarias, que se darían con un muro completamente rígido e impermeable.

Se utilizó concreto fundido *in situ*, una capa de 10 cm de espesor a todo el rededor de los gaviones expuestos; se dejó sin recubrimiento únicamente la cimentación y los laterales, que están en contacto directo con el suelo y las bordas del río.

La proporción del concreto utilizado fue 1:2:2, respectivamente, de cemento, arena y pedrín, que proporciona una resistencia nominal de 217 Kg/cm². Esta resistencia fue suficiente para soportar el desgaste por el paso del agua. El pedrín utilizado fue de 3/8", para facilitar su colocación y adhesión al gavión.

3 CÁLCULO DE LOS DIQUES

Para el cálculo de los diques, se utilizaron los criterios de presas pequeñas de vertederos en la parte hidráulica, en la parte estructural el manual GAWAC proporcionado por Maccaferri, el distribuidor de gaviones, y también se tomaron en cuenta los cálculos hidráulicos de caudales y secciones mínimas de los estudios realizados en el río Pensativo, en el año 1999, por parte de la empresa TES, que fue responsable del diseño y supervisión del proyecto.

3.1 Cálculos hidrológicos

Este inciso describe dos tipos de datos y no se realizan los cálculos propiamente; solamente se ilustra el procedimiento de obtención de datos a lo largo del proyecto. La parte hidrológica se refiere al estudio y datos recolectados sobre el comportamiento del río y los volúmenes de agua, que se espera que conduzca. La parte hidráulica se refiere al comportamiento de la estructura, al someterse al paso del volumen de agua descrito en la parte anterior. Es importante definir ambos conceptos, pues a partir de ellos se diseña el muro en la sección mínima para conducir el caudal.

El cuadro siguiente presenta los datos del cálculo para una crecida en el río; esta información únicamente se presenta como referencia, pues es propiedad de su autor.

TABLA II. Cálculo de crecida río Pensativo.

CALCULO DE CRECIDA RIO PENSATIVO			
Aplicación del método racional $Q=ciA/360$			
Q:	m ³ /seg		
c:	Coeficiente de escorrentía		
I:	intensidad de lluvia en mm/hora		
A:	Área de la cuenca en hectáreas		
Intensidad de lluvia I: $a/(t+b)$			
Para la zona pacífico			
Para 50 años	a:	7477.5	b: 40.9
Para 20 años	a:	6889.1	b: 39.5
t=tiempo de concentración: $((.886*L^3)/H)^.385$			
L:	7.79	Km	
H superior:	920	msnm	
H inferior:	0	msnm	
Delta H:	920	m	
t:	0.739	horas	44.32 minutos
Pendiente Promedio Por JF Morales 11.81%			
I ₅₀ :	87.75	mm/hora	I ₂₀ : 82.19 mm/hora
Coeficiente de escorrentía	c	a(area %)	cx
Techos	0.70	7	4.90
Pavimentos de piedra y ladrillo	0.75	3	2.25
Bosque y tierra cultivada	0.01	90	0.9
	Suma	100	8.05
		C:(suma de cxa)	0.08
Área estimada	Punto más bajo: en coordenadas UTM		
	743.6	Este	1608.2 Norte
Del informe de TES	29.12	Km ²	
	2,912.00	hectáreas	
Caudal 50 años	57.14	m³/seg	
Caudal 20 años	53.52	m³/seg	

Fuente: Ing. César Augusto Reyes Hoja electrónica para cálculo de crecida

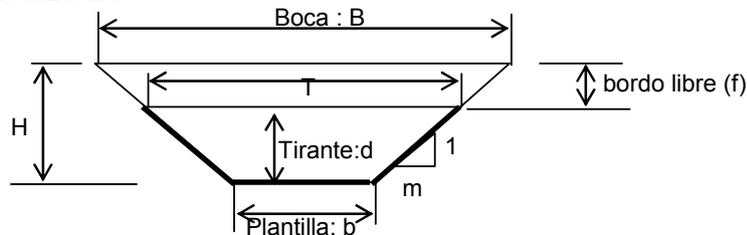
El cálculo de la geometría y velocidad mínima del canal se presenta únicamente como referencia, pues es propiedad de su autor.

TABLA III. Cálculo de sección de canal río Pensativo.

CÁLCULO DE LA SECCION DE UN CANAL

Programó CARM, 6/2/99

GEOMETRÍA



Area (A): $bd+md^2$ Perímetro (P): $b+2d(m^2+1)^{1/2}$
 Radio hidráulico: $R=A/P$ Ancho superior (T): $b+2md$
 Si el canal es rectangular $m=0$

Datos de entrada	
b:	6 m
m:	1
d:	1.23 m
H:	5.00 m

d: Se supone y luego se corrige

T: 8.46 m
 A: 8.89 m²
 P: 9.48 m
 R: 0.94 m
 f: 3.77 m
 B: 16.00

HIDRÁULICA $Q=A*V$ m³/seg
 $V=(R^{2/3}S^{1/2})/n$

Datos de entrada	
(Pendiente) S:	20.00 por mil
(Rugosidad) n:	0.02 tierra lisa

igual a: 2%

V: 6.78 m/seg
 Q: 60.26 m³/seg

Fuente: Ing. César Augusto Reyes Hoja electrónica para cálculo de sección

A continuación, se presenta el cálculo de una presa pequeña bajo las condiciones antes mostradas; es importante tomar en cuenta que el trabajo ha sido dimensionado para condiciones de funcionamiento que rara vez ocurren; su periodo de recurrencia se estima en cincuenta años y el sistema tiene la capacidad de absorberlo cuando se presente.

TABLA IV. Cálculo de vertedero y tirante de dique mínimo.

CÁLCULO DEL VERTEDERO Y TIRANTES DE UN DIQUE

INGRESO DE DATOS

Caudal de diseño	Q	60	m ³ /s
Ancho de cauce	L	6	mts
Inclinación del cauce %	i	2%	
Longitud definida del vertedero	Lg	4	mts
Coefficiente de rugosidad	C	30	
Coefficiente de caudal	M	0.4	
Diferencia entre el nivel aguas arriba del dique y el punto de caída del agua	h	3	mts

RESULTADOS

		Unidad	Formula utilizada		
Caudal específico	q	15	m ³ /s/m	q = Q / Lg	
Diferencia de alturas	Z ₀ -f _g	4.16	mts	Z ₀ -f _g = Q / [M*Lg*(2g) ^{1/2}] ^{3/5}	Antes del dique
Tirante	Z ₃ -f ₃	2.41	mts	Z ₃ -f ₃ = (Q/c*L*I) ^{3/5} -h	Despues del dique
Velocidad del flujo uniforme	V	4.15	m/s	V = Q / L*(Z ₃ -f ₃)	
Velocidad crítica	V _c	4.86	m/s	V _c = [g * (Z ₃ -f ₃)] ^{1/2}	
Flujo es:		Supercritico			

Debe tenerse especial cuidado en que el flujo es supercrítico, pues la velocidad calculada en el canal es de 6.78 m/s y el límite crítico es de 4.86 m/s.

3.2 Cálculos estructurales

Los diques son calculados como un muro de gravedad; se le llama así pues funciona por su peso. Su fin primordial es sostener el suelo en diversos tipos de obras, construcción de gradas, canales, contención de taludes, etc. Sabiendo esto se comprende mejor que el muro de contención de gravedad es una estructura maciza y rígida, que con su propio peso impide la caída del material sostenido. El elemento importante es el empuje ejercido por la tierra, que 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 o a sobrecargas aplicadas. En este caso, se determina el valor del empuje ejercido por el material retenido detrás del dique.

El cálculo se presenta, al igual que en el inciso anterior, en una tabla que contiene los datos de entrada y los datos de salida, así como las fórmulas utilizadas para obtener cada resultado.

TABLA V. Cálculo del empuje.

a. Cálculo del empuje

			Unidad	Formula Utilizada
Coefficiente de empuje activo	Ka	0.210196		$K_a = \frac{\text{Sen}^2(\beta + \varphi)}{\text{Sen}^2\beta \text{Sen}(\beta - \delta) \left[1 + \frac{\sqrt{\frac{\text{Sen}(\varphi + \delta)\text{Sen}(\varphi - \varepsilon)}{\text{Sen}(\beta - \delta)\text{Sen}(\beta + \varepsilon)}}}{\text{Sen}(\beta - \delta)\text{Sen}(\beta + \varepsilon)} \right]^2}$
β ángulo formado por el plano de empuje y la horizontal	β	90	Grados	
φ ángulo de fricción interna del suelo	φ	40	Grados	
ε ángulo del talud sobre el muro con la horizontal	ε	0	Grados	
δ ángulo de fricción entre el muro y el terreno	δ	40	Grados	

Empuje activo	Ea	2.1168	T/m	$Ea = \frac{1}{2} \gamma_s H^2 K_a - 2cH\sqrt{K_a}$
γ_s = peso específico del suelo	γ_s	2.24	T/m ³	
c = cohesión (Despreciada en este caso, pues la arena es suelo no cohesivo)	c	0		
H = [h + (b-a) Tan α] Cos α , altura de actuación del empuje, siendo:	H	3	m	
h = altura del muro	h	3	m	
b = base del muro sin tomar en cuenta los escalones externos	b	1	m	
a = ancho del muro en la cima	a	1	m	

Altura del empuje (de la base al punto de acción)	d	0.66	m	H/3
H = Altura libre del muro (sin incluir cimentación)	H	2	m	

Nota: no se toman en cuenta sobrecargas por las características del lugar.

Nota: no se toma en cuenta la cimentación para el empuje actuante, pues se equilibra con material a ambos lados.

b. Chequeos de seguridad

TABLA VI. Chequeo al desplazamiento.

b.1 Seguridad al desplazamiento

Seguridad al desplazamiento (debe ser ≥ 1.5)	η'	13.4115		$\eta' = \frac{[(W + E_v) \text{Cos} \alpha + E_h \text{Sen} \alpha] \text{Tan} \phi + (W + E_v) \text{Sen} \alpha + cB}{E_h \text{Cos} \alpha} \geq 1.5$
W = Peso propio de la estructura. Depende de la sección del muro y el peso específico del relleno	W	1.7	T/m ³	
Componente Vertical del empuje activo	E _v	2.1168	T	E _v = E _a Sen(90°+δ-β); componente vertical del empuje activo.
Componente Horizontal del empuje activo	E _h	1.6215	T	E _h = E _a Cos(90°+δ-β); componente horizontal del empuje activo.
Cohesion	C	0		c = Cohesión (es conveniente despreciarla).
Ancho de la base del muro	B	1	m	B = Ancho de la base del muro.
Inclinacion del muro	α	0	Grados	α = Inclinación del muro.

TABLA VII. Chequeo de seguridad al vuelco.

b.2 Seguridad al vuelco

Seguridad al vuelco (Debe ser ≥ 1.5)	η''	11.12		$\eta'' = M_r / M_v$
Momento volcador	M _v	1.07	T*m	M _v = E _h d
Momento resistente	M _r	11.9	T*m	M _r = WS'+E _v s
	s	0		$s = B \text{Cos} \alpha \frac{H}{3} \left(\frac{H + 3h_s}{H + 2h_s} \right) \frac{1}{\text{Tan} \beta}$
	S'			S' = X _g Cos α + Y _g Sen α
	X _g	0.33	m	Sistema de coordenadas cartesianas con origen en F
	Y _g	1.5	m	

TABLA VIII. Chequeo de tensiones transmitidas.

b.3 Seguridad de tensiones transmitidas al suelo

Tension transmitida (no debe sobrepasar la capacidad del suelo)	σ_1	38.6865	T/m ²	$\frac{N}{B} \left(1 \pm \frac{6e}{B} \right)$
	σ_2	13.14707	T/m ²	
N = Resultante de las fuerzas normales a la base del muro	N	25.9168	T	
B = Base del muro	B	1	m	
e = Excentricidad	e	0.08212	m	$e = \frac{B}{2} - \left(\frac{M_r - M_v}{N} \right)$
Tension admisible en el suelo		44.08	T/m ²	

Nota: En este caso se utiliza esta formula para tension pues se cumple el criterio de $e < B/6$

TABLA IX. Chequeo en secciones intermedias.

b.4 Seguridad en secciones intermedias

Valor máximo	σ_{max}	31.00985	T/m ²	$\sigma_{max} = \frac{N}{0.8x}$
Valor admisible	σ_{adm}	500	T/m ²	$\sigma_{adm} = 50 \gamma_g - 30$
	x		m	$x = \frac{\left(\frac{B}{2} - e \right)}{0.4}$
Tension máxima	τ_{max}	3.96	T/m ²	$\tau_{max} = W / A$ (Area de contacto del muro con el suelo)
Tension admisible	τ_{adm}	14.165	T/m ²	$\tau_{adm} = \frac{N}{B} \text{Tan}\phi^* + c_g$

En conclusión, todos los cálculos hechos sobre el dique mínimo cumplieron con los chequeos de seguridad. Para información más amplia sobre diseño de muros de gavión, se incluye un apéndice con el método de diseño explicado paso por paso.

4 DETALLES Y DIBUJOS DEL DIQUE

En este capítulo, se detallan las características de los diques y las especificaciones para su construcción en cada parte. Para facilitar el tema, se dividió en dos incisos; el primero contiene las tablas de las especificaciones y detalles de las medidas; en la segunda, se hace el esquema del dique con las medidas indicadas.

4.1 Detalles de medidas y especificaciones

TABLA X. Medidas del dique.

Elemento	Alto	Largo	Ancho	Recubrimiento	Observaciones	
Muro	Cimentación	1	6	1	Sin Recubrimiento	Tiene 1 metro de profundidad dentro del lecho y sobre ella se amarra el cuerpo del muro
	Cuerpo	2	6	1	En ambas caras frente y atrás, en parte superior	Debe anclarse a las bordas laterales al menos 30 cms, para evitar el paso de agua.
	Vertedero	1	4	1	En ambas caras frente y atrás, en parte superior	Los triángulos del vertedero deben ser de concreto. Debe tenerse cuidado en poner el gavión completo y apoyar 1m en la borda y 1m en el muro.
Disipador	Cuerpo	1	6	1	En la parte superior y en cara frontal	Tiene 1 metro de profundidad dentro del lecho y debe anclarse a las bordas laterales al menos 30 cms, para evitar el paso de agua.
Medidas en metros						

Debe tomarse en cuenta que las medidas presentadas, en la tabla anterior, corresponden al dique más pequeño diseñado. Como parte de una solución, generalmente, se construye una serie de diques; por lo que al diseñar el que se encuentra en el área más restringida y dimensionarlo para soportar la crecida máxima, es seguro construir en los demás puntos un dique de mayores dimensiones, sin que se afecte el desempeño.

El gavión debe ser fabricado en red de alambre con revestimiento en los tipos y dimensiones abajo indicados. Cualquiera sea el tipo de gaviones, con PVC, sin PVC, con malla hexagonal doble torsión o electrosoldados, deben ser fabricados con todos sus componentes conectados mecánicamente, en la fase de producción en fábrica, y no se debe entregar en rollos para su armado en obra, según lo especifican las normas ASTM A 975 y ASTM A 974.

Cada gavión puede ser dividido por diafragmas en celdas, cuyo largo no deberá ser superior a una vez y media el ancho del gavión. Los gaviones deben estar certificados por el Bureau Veritas Quality Internacional, con la correspondiente aprobación bajo norma ISO 9002, según lo requerido en las especificaciones de obras especiales de COVIAL. Todo el alambre usado en la fabricación de los gaviones y para las operaciones de amarre y atirantamiento, durante la colocación en obra, debe ser de acero dulce recocido y de acuerdo con las especificaciones BS (British Standard) 1052/1980 Mild Steel Wire, es decir, que el alambre deberá tener carga de ruptura media de 38 a 50 kg/mm².

Deben realizarse ensayos del alambre, antes de la fabricación de la red, sobre una muestra de 30 cm de largo. El estiramiento no deberá ser inferior al 12%. El alambre del gavión, de amarre y atirantamiento, debe ser galvanizado de acuerdo con las especificaciones BS (British Standard) 443/1982 Zinc Coating Qn Steel Wire, es decir que el peso mínimo del revestimiento de zinc debe ser: Ø2.2 mm 240 gr./m²; Ø2.4 mm 260 gr./m²; 2.7 mm 260 gr./m², Ø3,0 mm 275 gr./m², Ø3.4 mm 275 gr./m². La adherencia del revestimiento de zinc al alambre deberá ser tal, que después de haber envuelto el alambre 6 veces alrededor de un mandril, que tenga diámetro igual a 4 veces el del alambre, el revestimiento de zinc no tendrá que escamarse o rajarse, de manera que pueda ser quitado rascando con las uñas.

La red debe ser de malla hexagonal a doble torsión; las torsiones serán obtenidas entrecruzando dos hilos por tres medios giros. Las dimensiones de la malla deberán estar de acuerdo con las especificaciones de fabricación y serán del tipo 6 x 8. El diámetro del alambre usado en la fabricación de la malla, para gaviones sin PVC, debe ser de 2.4 mm y de 3 mm para los bordes laterales.

El diámetro del alambre usado en la fabricación de la malla, para gaviones con PVC, debe ser de 2.2 mm y de 2.7 mm para los bordes laterales, más el espesor del revestimiento de PVC.

Todos los bordes libres del gavión, inclusive el lado superior de los diafragmas, deben ser reforzados mecánicamente, de tal manera que no se deshile la red y adquiera mayor resistencia. El alambre utilizado, en los bordes reforzados mecánicamente en gaviones sin PVC, debe tener un diámetro mayor que el usado en la fabricación de la malla, es decir, de 3 mm.

El alambre utilizado en los bordes reforzados mecánicamente en gaviones con PVC debe tener un diámetro mayor, que el usado en la fabricación de la malla, o sea de 2.7 mm.

Junto con los gaviones, debe haber una cantidad suficiente de alambre de amarre y atirantamiento, para la construcción de la obra. La cantidad estimada de alambre es de 8% para los gaviones de 1.0 m de altura, y de 6% para los de 0,5 m, en relación con el peso de los gaviones suministrados. El diámetro del alambre de amarre para gaviones sin PVC debe ser de 2.2 mm. El diámetro del alambre de amarre para gaviones con PVC debe ser de 2 mm.

Se admite una tolerancia en el diámetro del alambre galvanizado de $\pm 2,5\%$. Se admite una tolerancia en el largo del gavión de $\pm 3\%$ y en el ancho y alto de $\pm 5\%$. Los pesos están sujetos a una tolerancia de $\pm 5\%$ (que corresponde a una tolerancia menor que la de $\pm 2,5\%$, admitida para el diámetro del alambre)

4.2 Dibujos con las dimensiones de los diques construidos

FIGURA 9. Vista frontal.

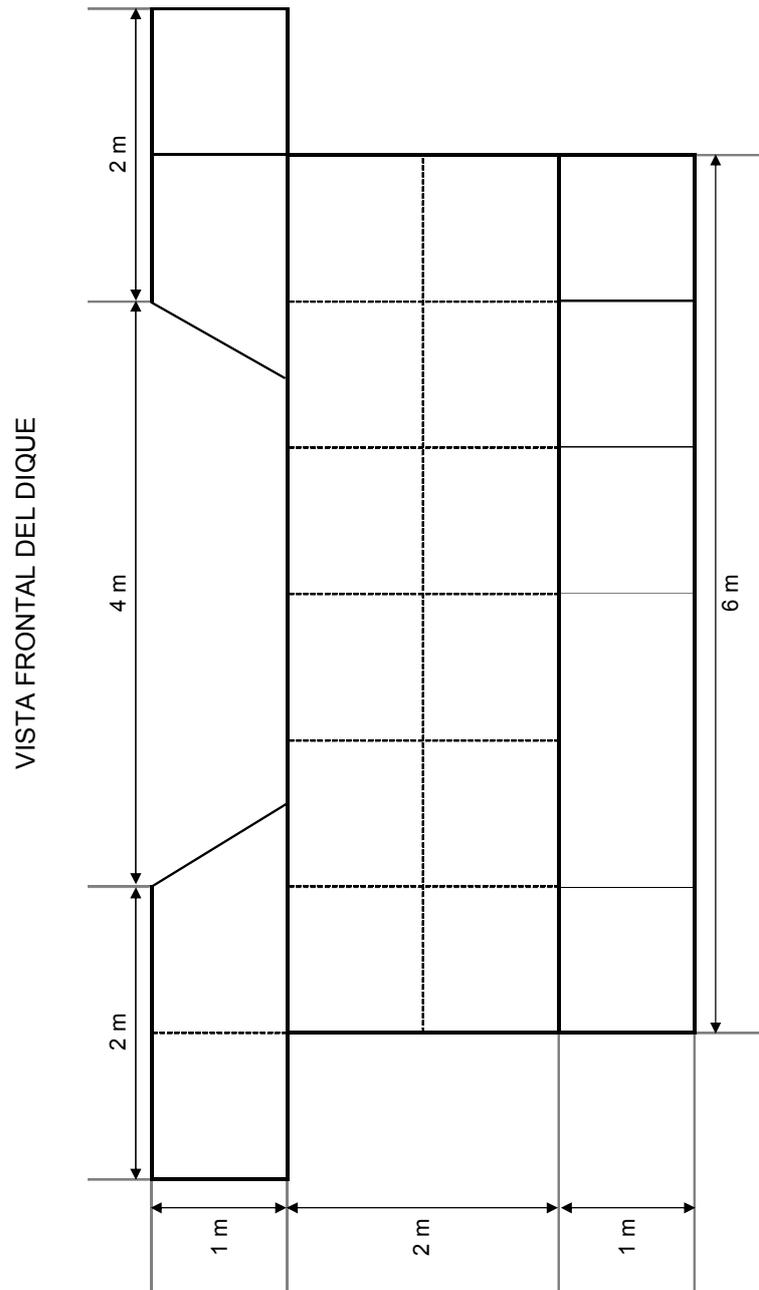


FIGURA 10. Vista lateral.

VISTA LATERAL DEL DIQUE

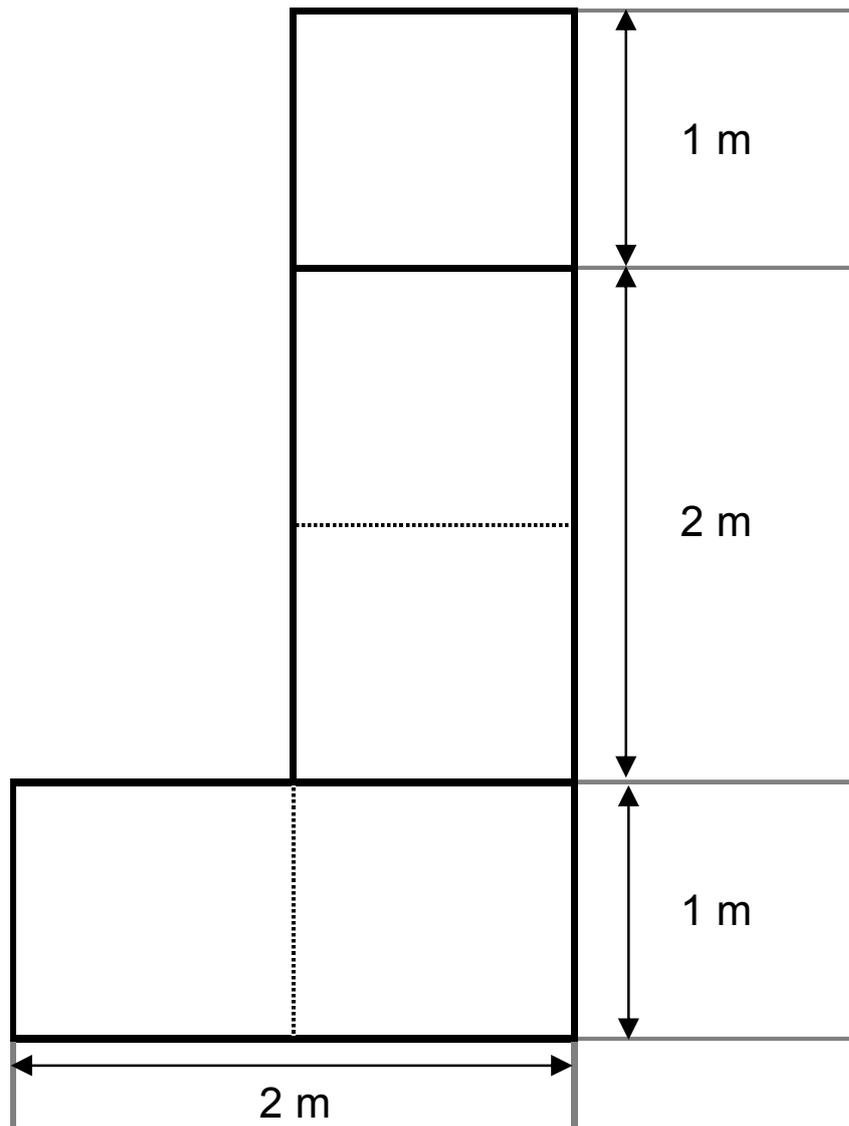
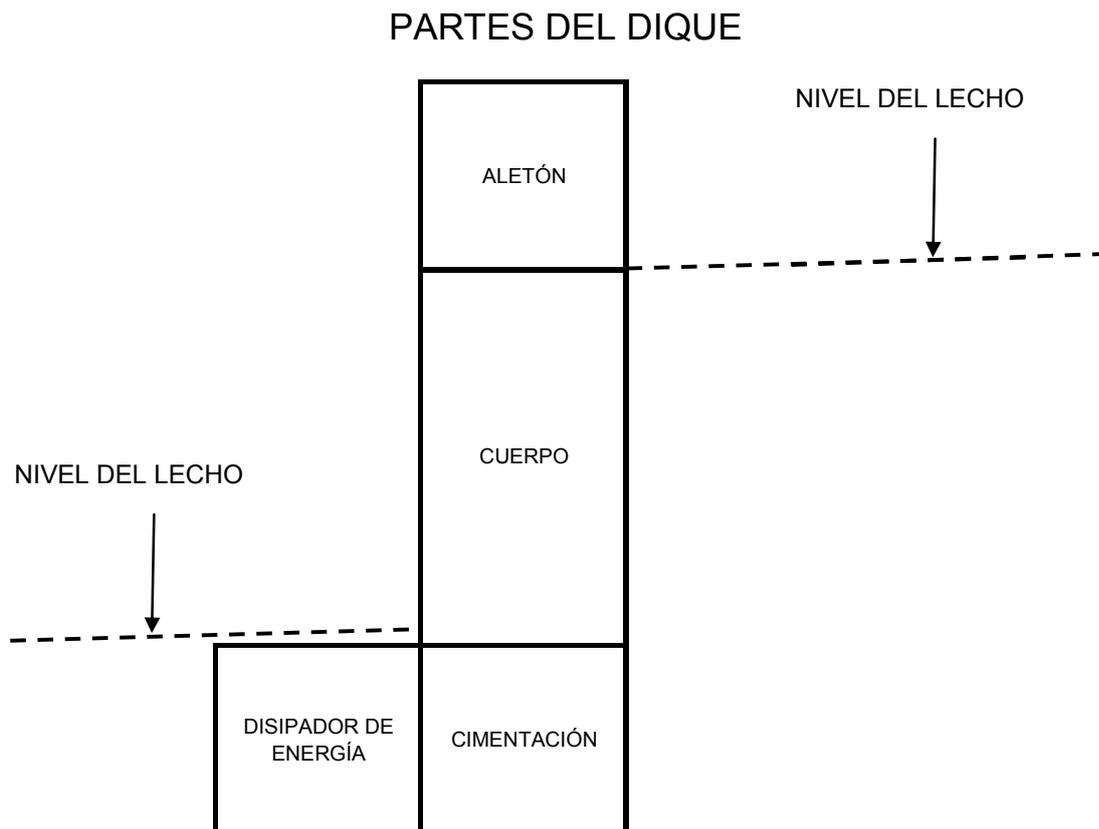


FIGURA 11. Descripción de las partes del dique.



4.3 Fotografías de diques construidos

Todas las fotografías provienen del archivo de la empresa TES, encargada de diseñar y supervisar el proyecto. Cada una tiene su descripción y, en algunos casos, se presenta el antes y después de una situación particular.

FIGURA 12. Excavación para cimentación y dissipador de energía.



FIGURA 13. Construcción de cimiento y dissipador de energía.



FIGURA 14. Dique construido en funcionamiento.



FIGURA 15. Disipador de energía en funcionamiento.



FIGURA 16. Sección de canal; al fondo se observa el dique.



FIGURA 17. Vista previa construcción del dique y el muro.



FIGURA 18. Vista luego de construcción del dique y el muro.



FIGURA 19. Vista previa construcción del dique.



FIGURA 20. Vista durante construcción del dique.



FIGURA 21. Vista antes de cerrar el dique; ver el nivel del sedimento.



FIGURA 22. Vista luego de cerrar el dique; el nivel del sedimento llega al vertedero.



5 CÁLCULO DEL COSTO DE CONSTRUCCIÓN DEL DIQUE

Para facilitar el cálculo del costo del dique, se utilizó una hoja electrónica de Excel, en el cual se distinguen tres partes: la primera comprende el costo de los materiales utilizados; la segunda, la mano de obra empleada y la tercera, los costos indirectos en los que se incurre.

En la primera columna, se describe el número asignado a cada renglón; en la segunda, se indica el concepto del renglón; en la tercera, la cantidad utilizada; en este caso, todo el material fue calculado con base en el dique típico diseñado; en la cuarta, la unidad de cada renglón; en la quinta, el precio unitario de cada renglón; y en la sexta, se hace la multiplicación entre precio unitario y cantidad, que da como resultado en la cantidad total por cada renglón. La información se presenta en la tabla XI.

TABLA XI. Integración del costo de un dique.

INTEGRACIÓN COSTO UNITARIO PARA DIQUE DE GAVIÓN DE 28 m³

No.	CONCEPTO	CANTIDAD	UNIDAD	UNITARIO EN "Q"	PARCIAL
1	MATERIALES				16,257.62
1.1	Piedra bola	28.00	m ³	220.00	6,160.00
1.2	Gavión caja de 2 m ³ con diafragma	11	unidad	750.00	8,250.00
1.3	Alambre de amarre	16.5	libras	8.00	132.00
1.4	Arena	1.05	m ³	60.00	62.70
1.5	Piedrín	1.05	m ³	150.00	156.75
1.6	Cemento	19.00	saco	38.00	722.00
1.7					-
1.8					-
1.9					-
1.10					-
1.11	Desperdicio	5%	global	15,483.45	774.17
2	MANO DE OBRA				5,652.55
2.1	Armado y colocación de la canasta	28.00	m ³	70.00	1,960.00
2.2	Repello y alisado de concreto	38.00	m ²	35.00	1,330.00
2.3					-
2.4	Ayudantes	43%	global	3,290.00	1,414.70
2.5	Prestaciones	67%	global	1,414.70	947.85
3	HERRAMIENTAS	1%	global	16,257.62	162.58
4	EQUIPOS	5%	global	16,257.62	812.88
5	TRANSPORTE	7%	global	16,257.62	1,138.03
6	ADMINISTRACIÓN	8%	global	24,023.66	1,921.89
7	DIRECCIÓN	8%	global	24,023.66	1,921.89
8	UTILIDAD	8%	global	27,867.45	2,229.40
9	ISR	4%	global	2,229.40	89.18
10	G. LEGALES	2%	global	30,186.02	603.72
11	FIANZAS	1%	global	30,186.02	301.86
TOTAL					31,091.60

6 EVALUACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA

De una evaluación, se espera una calificación; en el caso de este sistema, la parte más importante es su fin principal: evitar inundaciones en la ciudad de Antigua Guatemala. De ser este el único parámetro de calificación, se ha aprobado, pues desde que se iniciaron los trabajos no ha ocurrido ningún percance de este tipo.

Adicionalmente se puede evaluar el sistema dentro del programa del fondo vial COVIAL, pues se ha tenido presencia continua en el proyecto del río Pensativo y se han destinado recursos a actividades distintas al mantenimiento del sistema; los motivos para esto se exponen en el párrafo siguiente. El sistema ha funcionado adecuadamente y con muy poco mantenimiento, lo que permite que se realicen otras actividades e incluso que disminuya la inversión de recursos en el proyecto del río Pensativo.

La empresa TES se dedicó durante cuatro años a supervisar, diseñar y dirigir los trabajos de intervención en el río; esto fue hasta el año dos mil uno. A partir del año dos mil dos, se encargó esta actividad a otras empresas; en este momento ya se habían construido diques hasta el puente Arroyave, a pocos kilómetros de llegar a la confluencia con el río Guacalate; el plan consistía en seguir implementando el sistema aguas arriba hacia el origen del río.

Con el cambio de dirección, se abandono el concepto y los recursos fueron destinados a otras actividades dentro del río, pero sin mayor impacto. Se construyeron gaviones en lugares donde los muros ya existen y parecieran obras longitudinales innecesarias. Con esto se llegó al punto en que durante el año dos mil tres no se realizaron trabajos.

Este elemento se vuelve importante, ya que prueba que se alcanzó un nivel de estabilidad tal, que incluso se pensó en que ya no era necesario destinar recursos a estas actividades. Pero como se expuso antes, este sistema necesita mantenimiento, pues es una solución, que en condiciones particulares requiere una atención especial.

En visita realizada al río en el mes de noviembre de dos mil cuatro, se comprobó que efectivamente el sistema ha cumplido su cometido; se controló la velocidad del río y se facilitaron las labores de mantenimiento que deben realizarse. No se encontró asolvamiento excesivo detrás de los diques, pero sí se observó que, por falta de mantenimiento, se ha modificado el nivel de la caída del agua. Incluso con carga de suelo y agua mayor a la anticipada, los muros inspeccionados no presentan daños y su integridad se mantiene, y de esa manera funcionan como parte del sistema.

Han pasado tres años desde que con el concepto de sistema se realizaron trabajos, y no se han presentado problemas, con lo cual se ha cumplido con el fin que se perseguía al concebirlo.

CONCLUSIONES

1. El documento presentado recopila gran parte de la experiencia de campo adquirida en el desarrollo del proyecto del río Pensativo, y provee una referencia útil para la posible replicación del proyecto en otras partes del país.
2. El caudal manejado en el pensativo no ha presentado problemas en tres años, en los que se le ha dado muy poco mantenimiento, lo cual confirma que la solución fue exitosa.
3. El sistema es aplicable a diversas condiciones de distintos ríos; sin embargo, hasta ahora se han tratado únicamente ríos de caudal pequeño.
4. La practicidad y eficiencia de la construcción de diques con gaviones, y luego revestirlos de concreto, provee una útil herramienta, que puede desarrollarse en cualquier parte, con mano de obra sin mayor calificación y con la mayoría de elementos necesarios disponibles en muchas localidades del país.
5. La economía del sistema permite su replicación para problemas de inundaciones en otros ríos del país.

RECOMENDACIONES

1. Debe de evaluarse la implementación de sistemas de estabilización de cauces con diques de gavión revestidos de concreto en otros ríos del país, en los que se encuentren características similares.
2. Hay que extender la cara interior del dique hacia la borda, para eliminar la posibilidad de erosión en los laterales de los diques.
3. Debe construirse durante la época de estiaje, para evitar daños durante el proceso. De lo contrario, es muy difícil lograr implementar el sistema.
4. En ninguno de los casos, la piedra debe tener menos de 15 ni más de 35 cm; se puede aceptar un máximo de 5% de piedra de mayor tamaño. En ningún caso, debe aceptarse piedra de menor tamaño.
5. El concreto debe ser hecho con agregado grueso de diámetro no mayor a 3/8 de pulgada, para asegurarse de que se convierta en una capa del espesor indicado.
6. Verificar el valor soporte del suelo y la infiltración en el lecho del río, para evitar fallas por hundimiento y erosión en la parte inferior de la estructura.

BIBLIOGRAFÍA

1. Agencia española para la cooperación internacional. **Subproyecto: Saneamiento ambiental y servicios básicos, del plan maestro de revitalización integral del centro histórico de la ciudad de Antigua Guatemala.** Guatemala, s.e. 1996.
2. American Stándar for Testing and Materials (Por sus siglas en inglés). **Especificaciones ASTM A 975 y ASTM A 974.** Estados Unidos, s.e. 1994.
3. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza/Secretaría General del Consejo de Planificación Económica. **Análisis hidrológico preliminar de las crecidas río Pensativo.** Guatemala, s.e. 1988.
4. Hopf, Josef y Anton Gwercher. **Río Pensativo, proyecto semidetallado para la corrección del río en la región de Antigua Guatemala.** Guatemala, s.e. 1977.
5. Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología. **Informe hidrológico preliminar del río Pensativo.** Informe técnico 2-88. Guatemala, s.e. 1988.
6. Rosal del Cid, Carlos Rolando. **Evaluación de las tierras y de su uso en la subcuenca del río Pensativo en Guatemala y directrices para su manejo.** Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Turrialba, Costa Rica, s.e. 1998.
7. TES (Técnicas, Equipos y Servicios). **Proyecto de manejo del río Pensativo.** Guatemala, s.e. 1998.
8. Unidad Ejecutora de Conservación Vial. **Informes mensuales de supervisión de los años 1997 a 2001 de los trabajos del río Pensativo.** Guatemala, s.e. 1997-2001.

APÉNDICES

APÉNDICE A

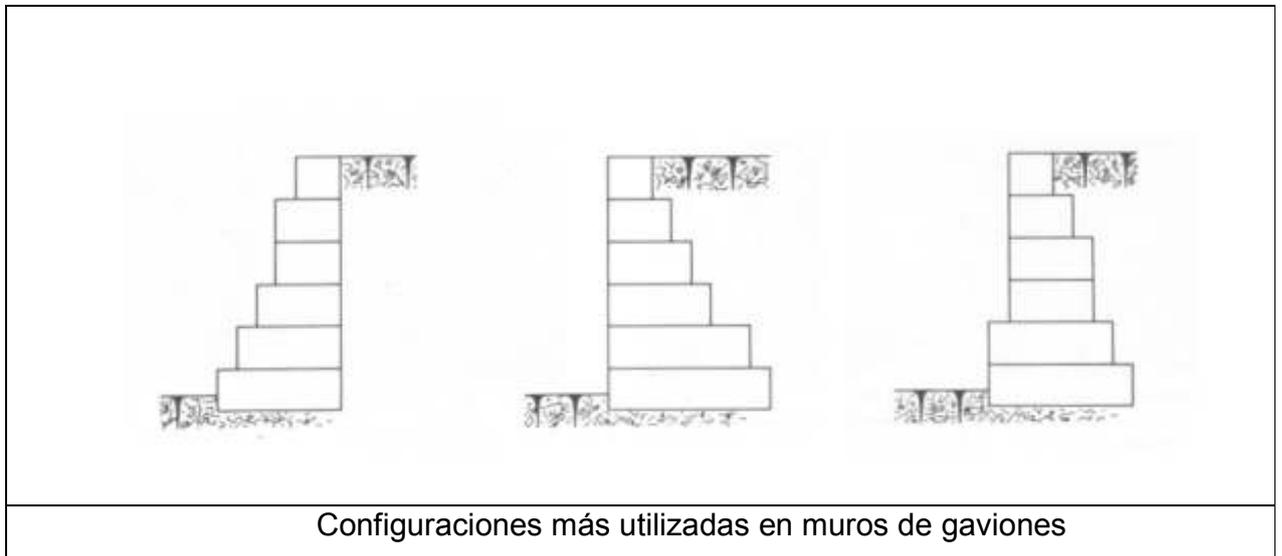
Criterios de cálculo

Para determinar el valor del empuje, se utiliza la teoría de Coulomb, para lo cual se tiene:

- La superficie de rotura es plana.
- La fuerza de rozamiento interno se distribuye en forma uniforme a lo largo de la superficie de rotura.
- La cuña de terreno entre la superficie de rotura y el muro se considera indeformable.
- Se desarrolla un esfuerzo de rozamiento entre el muro y el suelo en contacto, lo cual hace que la recta de acción del empuje activo se incline en un ángulo δ respecto de la normal al paramento interno del muro.
- La rotura se analiza como bidimensional tomando una franja unitaria del muro, considerando la estructura como continua e infinita. Para no sobredimensionar la estructura, dado que el gavión es permeable, se puede omitir el empuje hidrostático.
- La estructura es armada por la malla que tiene una gran resistencia a la tracción y mantener la flexibilidad de la obra.

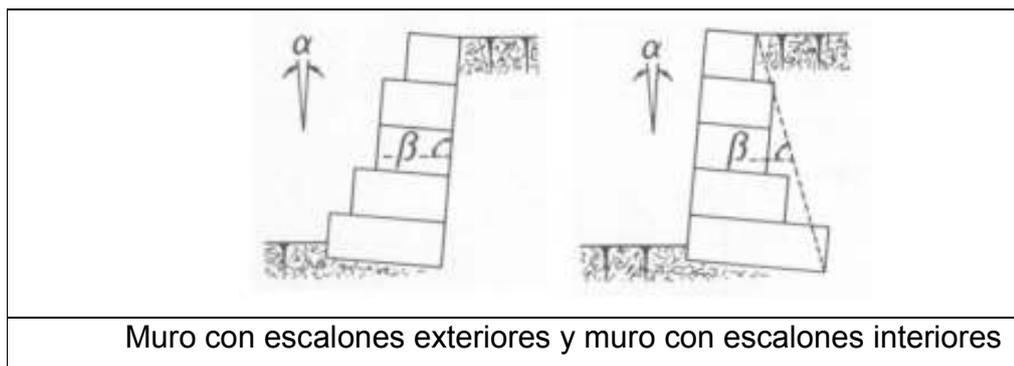
Las configuraciones más utilizadas son las ilustradas en las siguientes figuras. El muro con escalones externos a igualdad de volumen posee una mayor estabilidad. Es conveniente inclinar el muro contra el terreno, en un ángulo α generalmente de 6° y puede alcanzar los 10° ; de esta forma, disminuye el valor del coeficiente de empuje activo.

FIGURA 23. Configuraciones utilizadas



Cálculo del empuje

FIGURA 24. Tipos de muro



Se adopta en el cálculo el estado límite activo del terreno. El método de Coulomb se basa en el estudio del equilibrio de una cuña de suelo indeformable, sobre la que actúa el peso propio, la fuerza de rozamiento y eventualmente la cohesión. Esta cuña activa se produce cuando hay un desplazamiento de la estructura de contención, lo cual sucede sólo si la misma es deformable, como en el caso de los gaviones. En el caso de muros muy rígidos, se desarrollan empujes mayores que los correspondientes al empuje activo.

En el caso de muro con paramento vertical interno, la superficie de empuje es el propio paramento interno del muro. En el caso de muro con escalones internos, se considera la superficie que une los extremos internos superior e inferior del muro.

Queda así determinado el ángulo β formado por el plano de empuje y la horizontal. A los efectos de conocer el valor del empuje, es necesario el valor de la fricción interna del suelo φ y la cohesión c ; en la tabla siguiente los valores indicados son orientativos de φ .

TABLA XII. Propiedades de suelos y rocas

PROPIEDADES DE SUELOS Y ROCAS				
TIPO	MATERIAL	PESO ESPECÍFICO t/m ³	ANGULO DE FRICCIÓN	
			MATERIAL	GRADOS

NO COHESIVO	Fina	Gruesa y	1,44	Compacta,	40-45	
		seca	1,60	bien graduada,	35-40	
		Fina y seca	1,84	uniforme	35-40	
		Húmeda	1,92	uniforme,	30-35	
	Continúa tabla XII		Muy húmeda		gruesa; arena	
	Grava				fina o suelta	
					Arena suelta	
					bien graduada	
					Arena fina	
					seca	
Roca suelta		Común	1,76	Común mixta	35-40	
		mixta	2,24	Grava	40	
		Fluvial	1,84	Compacte asa	40-45	
		Suelta	1,92	Suelta asa	35-40	
		Asa				
		Granito	1,60-2,00	Piedra partida	35-45	
		Basalto	1,76.2,24	o en	35-45	
		Calcárea	1,28-1,92	fragmentos	30-35	
		Yeso	1,00-1,28	Yeso		
		Folhelho	1,60-2,00	fragmentado		
				Folhelho		
				fragmentado		

COHESIVO	Arcilla	Seca	1,76	Bloques de	30
		Húmeda	1,84	arcilla seca	40
		Saturada	1,92	Bloques de	10-20
		Marga asá	1,60	arcilla húmeda	5.7
		Marga	1,76	Arcilla	20-27
		Con grava	2,00	compacta	14-22
	Cobertura	Suelo	1,36	Suelo de	30-35
		superficial	1,44	cobertura	
		Suelo seco	1,60		
		Suelo húmedo	1,68		
Macizo rocoso	Continúa tabla XII				
	Suelo saturado				
	Granito	2,61	Granito	30-50	
	Quarzita	2,61	Quarzita	30-45	
	Arenisca	1,95	Arenisca	30-45	
	Caliza	3,17	Caliza	~	
	Pórfido	2,58	Pórfido	30-40	
	Folhelho	2,40	Folhelho		
Yeso	1,76	Yeso	27-45		
			30-40		

Debe considerarse que tanto la fricción como la cohesión se alteran, cuando se modifica la humedad del terreno. Dado que ambos parámetros influyen sensiblemente en la determinación del empuje

activo, debe cuidarse mucho cuál es el valor adoptado. Suele ser conveniente despreciar la cohesión, ya que ésta se modifica con el tiempo y tiene gran influencia sobre el valor final del empuje.

Para terraplenes compactados, puede adoptarse un valor de $\varphi=30^\circ$. Tras el muro, se admite una distribución uniformemente variada de presiones, con lo cual el empuje toma una configuración triangular.

El empuje activo es calculado en función del peso del ter y de la altura del muro; su valor es reducido debido al coeficiente de empuje activo K_a .

Como se dijo, el valor del coeficiente de empuje activo depende del ángulo β ya mencionado; de ε que es el ángulo del talud sobre el muro con la horizontal; de φ ángulo de fricción interna del terreno; de δ ángulo de fricción entre muro y terreno.

En los muros en gaviones, se puede asumir $\delta=\varphi$. Si tras el muro hay un geotextil $\delta=0.9\varphi$.

Estos valores favorables se deben a la alta rugosidad de la estructura en gaviones, que aumenta sensiblemente la fricción. δ determina también el ángulo entre la dirección del empuje y la normal a su plano de aplicación.

El valor del coeficiente de empuje activo K_a es determinado por la expresión:

$$K_a = \frac{\text{Sen}^2(\beta + \varphi)}{\text{Sen}^2\beta \text{Sen}(\beta - \delta) \left[1 + \sqrt{\frac{\text{Sen}(\varphi + \delta)\text{Sen}(\varphi - \varepsilon)}{\text{Sen}(\beta - \delta)\text{Sen}(\beta + \varepsilon)}} \right]^2}$$

Para facilitar el cálculo, el coeficiente K_a se encuentra tabulado en los abanicos siguientes, en los cuales se consideran cuatro valores de β normalmente usados en la práctica, y diferentes valores de φ y ε . Para valores intermedios de β , es posible interpolar.

El empuje activo está determinado por la expresión:

$$E_a = \frac{1}{2} \gamma_s H^2 K_a - 2cH\sqrt{K_a} \quad \text{en t/m}$$

En la cual:

γ_s = peso específico del suelo

c = cohesión

$H = [h + (b-a) \text{Tan } \alpha] \text{Cos } \alpha$, altura de actuación del empuje,

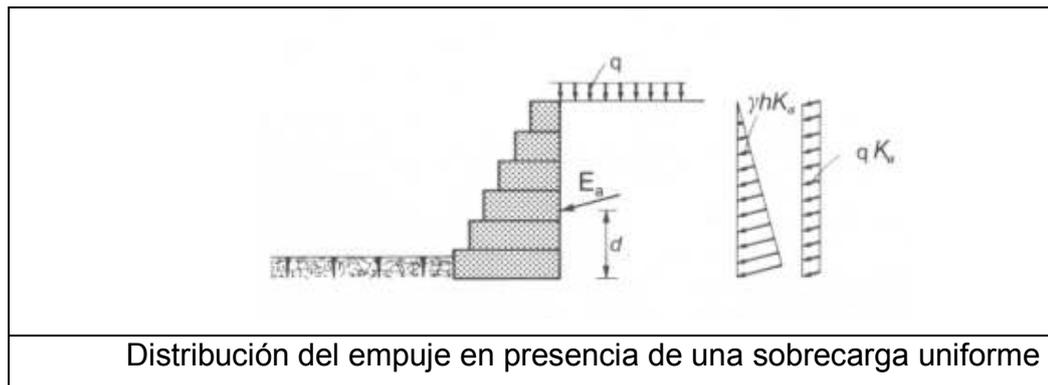
siendo:

h = altura del muro

b = base del muro despreciando los escalones externos

a = ancho del muro en la cima

FIGURA 25. Distribución del empuje



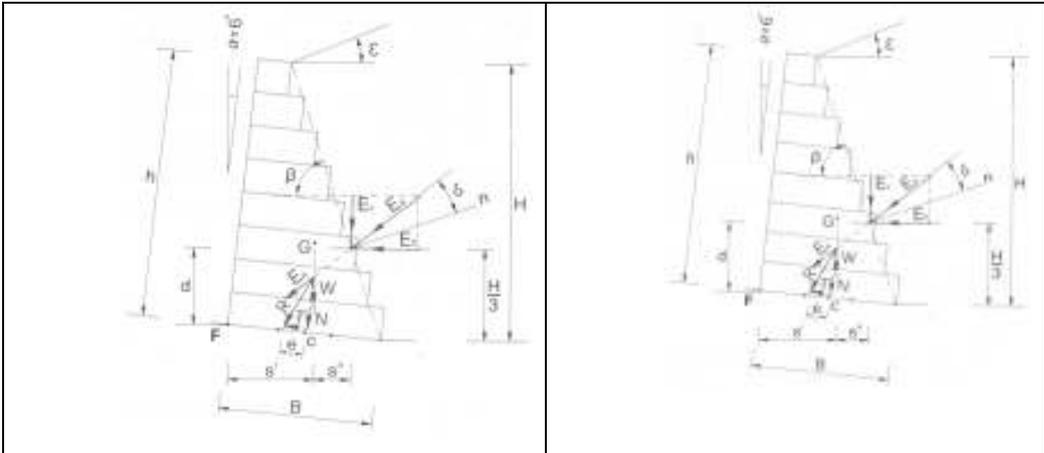
Debe recordarse la consideración hecha sobre la cohesión. En el caso de sobrecarga sobre el terraplén, siendo q el valor de la misma, ésta es asimilada a un relleno de altura h, de las mismas características del terreno siendo $h_s = q/\gamma_s$. Luego el empuje será:

$$E_a = \frac{1}{2} \gamma_s H^2 K_a \left(1 + \frac{2h_s}{H} \right) - 2cH\sqrt{K_a}$$

Normalmente con sobrecargas, debido a vehículos, se adopta:

$$q = 1.5 \text{ a } 2.0 \text{ t/m}^2$$

FIGURA 26. Diagrama de aplicación del empuje.



Altura de aplicación del empuje (Escalones internos y Escalones Externos)

La altura del punto de aplicación del empuje es de difícil evaluación y varía bastante en la práctica; normalmente puede producirse a un altura comprendida entre $1/2 H$ y $1/3 H$. Las variaciones se deben en algunos casos al desplazamiento del muro, a su rigidez e inclinación, a modificaciones en las características del terreno y sobrecarga.

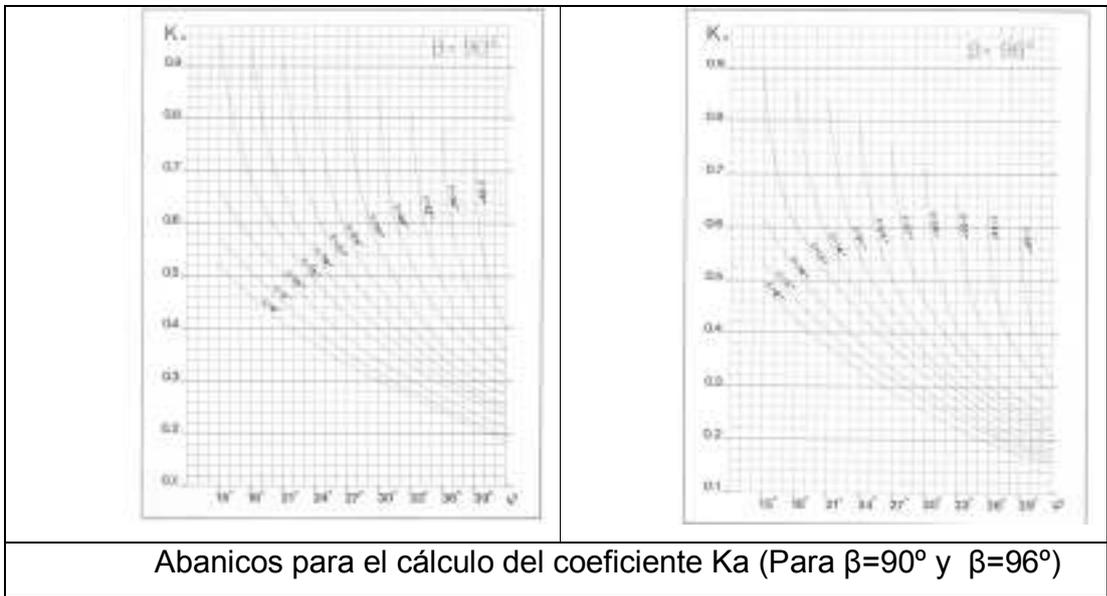
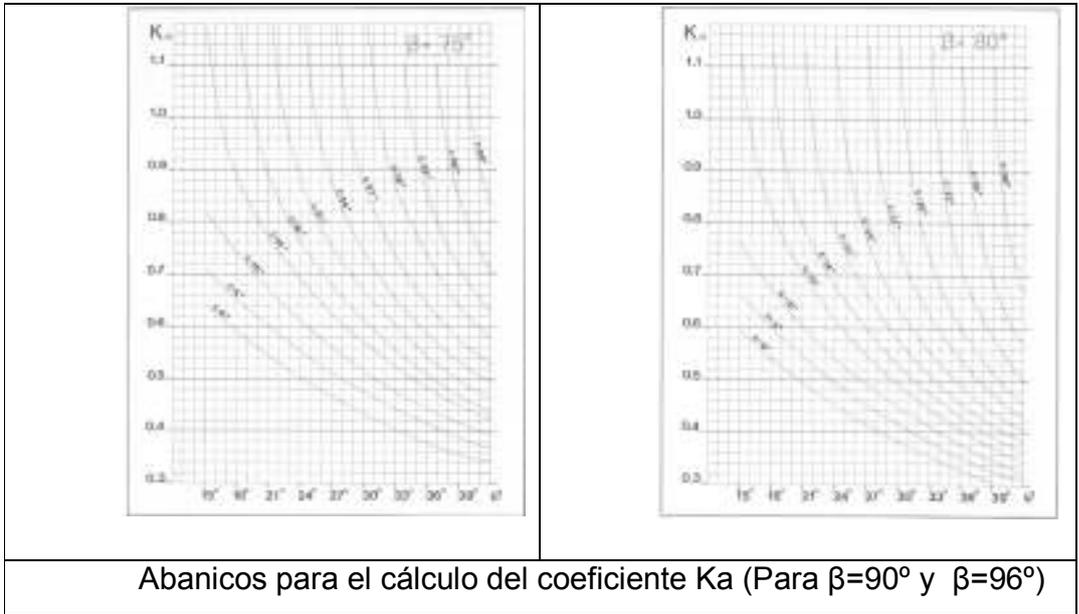
Normalmente se considera a $1/3$ de H . Con sobrecarga se tiene:

$$d = \frac{H}{3} \left(\frac{H + 3h_s}{H + 2h_s} \right) - B \text{Sen} \alpha$$

En la cual d es la altura de aplicación del empuje activo, medida en forma vertical, desde la horizontal que pasa por el fulcro o punto de rotación F y B , que es la base del muro.

Si no hay sobrecarga $d=H/3 - B \text{ sen } \alpha$, si $\alpha =0$ y $d=H/3$.

FIGURA 27. Abanicos para cálculo de coeficiente Ka



Criterios de verificación de la estabilidad

Para verificar la estabilidad de un muro de gaviones, se debe calcular:

- Seguridad al deslizamiento
- Seguridad al vuelco
- Carga sobre el terreno
- Verificación en secciones intermedias
- Seguridad de rotura global

Las fuerzas estabilizantes y desestabilizantes son indicadas en los diseños, que siguen para muros con escalones internos y externos. Al enterrar un muro, aparece un estado de empuje pasivo que es conveniente despreciar para estar del lado de la seguridad.

Verificación de la seguridad al deslizamiento

Se considera el plano ortogonal, que pasa por la base del muro, se tendrá:

$$\eta' = \frac{F_{en} \tan \varphi + F_{eh}}{F_d} \geq 1.5$$

En la cual:

F_{en} = Fuerza estabilizante normal.

F_{eh} = Fuerza estabilizante horizontal.

F_d = Fuerza desestabilizante.

$$\eta' = \frac{[(W + E_v)\text{Cos}\alpha + E_h\text{Sen}\alpha]\text{Tan}\varphi + (W + E_v)\text{Sen}\alpha + cB}{E_h\text{Cos}\alpha} \geq 1.5$$

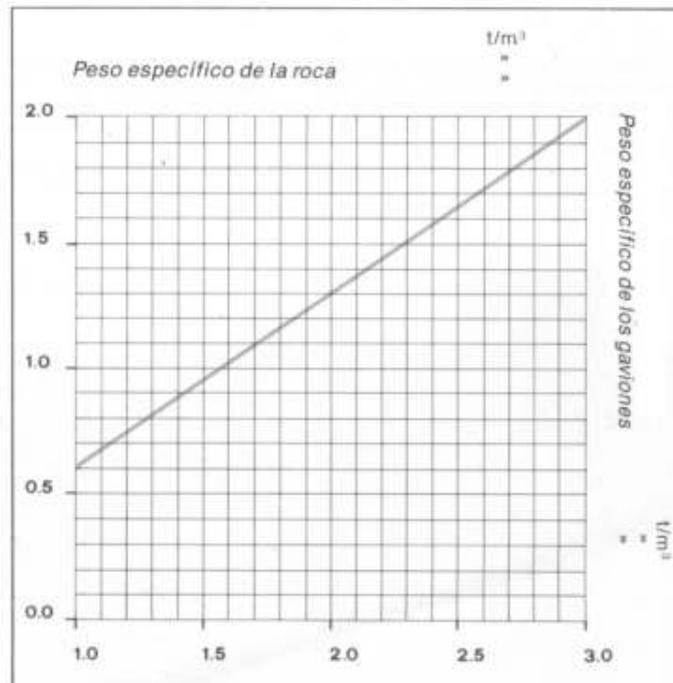
En la cual:

W = Peso propio de la estructura. Depende de la sección de/muro y del peso específico del relleno. En el gavión, se considera un porcentaje de yacios (n) alrededor de 0.3, es decir, del 30%, con lo cual se tendrá γ_g , según la expresión:

$$\gamma_g = \gamma_p (1-n)$$

El valor de γ_p se obtiene de la tabla siguiente, en la cual son relacionados los pesos específicos por diferentes tipos de roca.

FIGURA 28. Abanico para valor γ_g



Normalmente el peso específico del gavión llenado con piedra partida de cantera se considera igual a $1,7 \text{ t/m}^3$.

$E_v = E_a \text{ Sen}(90^\circ + \delta - \beta)$; componente vertical del empuje activo.

$E_h = E_a \text{ Cos}(90^\circ + \delta - \beta)$; componente horizontal de! empuje activo.

c = Cohesión (es conveniente despreciarla).

B = Ancho de la base del muro.

α = Inclinación del muro.

Para la verificación del deslizamiento, se ha transformado la fuerza normal en horizontal multiplicándola por el coeficiente f . Este valor es coeficiente de fricción suelo gavión.

En pruebas realizadas por la fabricante de gaviones Maccaferri y otras hechas por el I.C.E. (Instituto Costarricense de Electricidad), se han obtenido para ters cohesivos valores de rozamiento altos de 0.7 a 0.75; en este valor interviene la cohesión, sin la cual el coeficiente será menor. En las mismas mediciones, se comprobó que el coeficiente de rozamiento entre un gavión y una superficie de hormigón es de $f=0.64$.

Por seguridad, se adopta siempre el mismo valor $f= \text{Tan } \phi$ independiente de la cohesión, y se admite que el deslizamiento se produce entre ter y ter.

TABLA XIII. Peso específico de rocas distintas.

Peso específico para diversos tipos de roca	
Tipo de roca	Peso específico t/m^3
Basalto	2.9
Granito	2.6
Caliza compacta	2.6
Traquita	2.5
Guijarro de río	2.3
Arenisca	2.3
Caliza tierna	2.2
Toba	1.7

Verificación de la seguridad al vuelco

Se considera, como fuerza estabilizante, el peso propio del muro y la componente vertical del empuje activo y, como desestabilizante, la componente horizontal del empuje activo; se tendrá:

$$M_v = E_h d; \text{ como momento volcador.}$$

$$M_r = W S' + E_v s; \text{ como momento resistente.}$$

En las cuales:

d = distancia entre el fulcro y el punto de aplicación del empuje activo medida sobre la vertical.

$s = B \cos \alpha \frac{H}{3} \left(\frac{H + 3h_s}{H + 2h_s} \right) \frac{1}{\tan \beta}$; como la distancia entre el fulcro y el punto de aplicación del empuje medida sobre la horizontal.

$$s' = X_g \cos \alpha + Y_g \sin \alpha$$

en la cual:

X_g y Y_g : son las coordenadas del centro de gravedad del muro referido a un sistema de ejes cartesianos, cuyo origen coincide con punto F.

El coeficiente del vuelco será:

$$\eta'' = \frac{Mr}{Mv} \geq 1.5$$

Verificación de las tensiones transmitidas al terreno

Se puede suponer que exista una distribución lineal de tensiones sobre el terreno; cuando la resultante cae dentro del núcleo central las tensiones, resultan:

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_1 \\ \sigma_2 \end{array} \right\} \frac{N}{B} \left(1 \pm \frac{6e}{B} \right) \quad \begin{array}{l} \text{Para} \\ \text{el} \\ \text{caso} \\ \text{de} \\ e < \frac{B}{6} \end{array} \quad \begin{array}{l} \text{En} \\ t/m^2 \end{array}$$

En la cual:

$N = (W + E_v) \cos \alpha + E_h \sin \alpha$, es la resultante de las fuerza normales a la base del muro.

$$e = \frac{B}{2} - \left(\frac{M_r - M_v}{N} \right) \text{ es la excentricidad de la resultante.}$$

El valor de la tensión resultante debe mantenerse por debajo de tensión admisible del ter. Este valor puede calcularse aplicando las expresiones de Terzaghi, Hansen, Meyerhoff, etc. También pueden usarse las tablas que dan la resistencia en función del tipo de suelo y para arenas y arcillas, en función del SPT.

Debido a la alta flexibilidad de los gaviones, es posible admitir que la resultante caiga fuera del núcleo central de inercia, sin llegar a valores elevados en la tensión de tracción, ya que se reduce la sección de trabajo de la base.

La excentricidad real será:

$$e' = \frac{B}{2} - e \quad \text{Para } e > \frac{B}{6}$$

$$\sigma_1 = \frac{2N}{3e'} \quad \text{en t/m}^2$$

$$\sigma_2 = \sigma_1 \left(\frac{B - 3e'}{3e'} \right) \quad \text{en t/m}^2$$

Se considera conveniente que $\sigma_2 \leq 2.0 \text{ t/m}^2$ en tracción y σ_1 no deba sobrepasar la tensión admisible del ter.

TABLA XIV. Tensiones admisibles para terrenos de fundación

TENSIONES ADMISIBLES BÁSICAS PARA TERRENOS DE FUNDACIÓN	Kg/cm²
a - Roca viva, maciza sin laminaciones, fisuras o signos de descomposición, como: gneis, granito, basalto	100
b - Rocas laminadas, con pequeñas fisuras, estratificadas como: esquistos	35
c - Depósitos compactos y continuos de rocas y piedras de diversos tipos	10
d - Suelo cementado	8
e - Grava compacta o mezclas compactas de arena y grava	5
f - Grava suelta o mezclas de arena y grava. Arena gruesa compacta	3
g - Arena gruesa suelta. Arena fina compacta	2
h - Arena fina suelta	1
i - Arcilla dura	3
j - Arcilla compacta	2
k - Arcilla medianamente compacta	1
l - Arcilla blanda	Se exigen estudios especiales o experiencias locales
m - Arcilla muy blanda	
n - Rellenos	
o - Otros suelos no incluidos en esta tabla	

Arenas		
Resistencia a la penetración N (golpes)	Compacidad	Tensión admisible (Kg/cm² - Fund. Dir.)

Continúa tabla XIV

/30cm) Standard Penetration Test (SPT)		Zapatas de 3x3m
0 - 4	Muy suelta	-
4 - 10	Suelta	0.8
10 - 30	Media	0.8 - 3.0
30 - 50	Compacta	3.0 - 5.0
50	Muy compacta	5.0

Arcillas		
Resistencia a la penetración N (golpes /30cm) Standard Penetration Test (SPT)	Consistencia	Tensión admisible (Kg/cm²- Fund. Dir.) Zapatas Cuadradas
2	Muy blanda	0 - 0.45
2 - 4	Blanda	0.45 - 0.90
4 - 8	Media	0.90 - 1.80
8 - 15	Compacta	1.80 - 3.60
15 - 30	Muy compacta	3.60 - 7.20
30	Dura	7.20

Verificación de secciones intermedias

Es necesario verificar las secciones intermedias del muro, en las cuales se tiene:

Momento actuante $M = M_r - M_v$, tensión de corte T y esfuerzo normal N . Dadas las características de resistencia a la tracción de los gaviones, la tensión máxima actuante cuando hay una excentricidad es:

$$e = \frac{B}{2} - \frac{M}{N}, \text{ vale:}$$

$$\sigma_{\max} = \frac{N}{0.8x}, \text{ en la cual: } x = \frac{\left(\frac{B}{2} - e\right)}{0.4}$$

Este valor representa la parte de la sección que está trabajando a la compresión. Los valores de M , N y T deben ser estudiados, como se indicó al tratar la verificación del muro completo.

En valor de σ_{\max} , no debe superar al admisible:

$$\sigma_{\text{adm}} = 50 \gamma_g - 30, \text{ en } t/m^2$$

La tensión tangencial vale: $\tau=T/B$ (en t/m^2) y deberá ser menor a:

$$\tau_{adm} = \frac{N}{B} \text{Tan}\varphi^* + c_g \text{ en } t/m^2$$

En ésta $\varphi^*=25$ y $\gamma_g 10$, con γ_g expresado en t/m^3 y $c_g=(0.03P_u-0.05) 10[t/m^2]$, siendo P_u el peso de la red metálica (en kg/m^3). para gaviones standard de $h=1.0m$ vale $8,6 kg/m^3$ y para gaviones de $h=0.5m$ es $12,0 kg/m^3$. Esto confirma la conveniencia de colocar gaviones de $h=0,5 m$, en el tercio inferior de los muros de gran altura. Debido a la resistencia de la malla, las secciones intermedias casi siempre dan valores favorables, respecto a la sección completa.

Seguridad a la rotura global

La inestabilidad de una obra en gaviones puede darse para una rotura del conjunto suelo-muro, a lo largo de una superficie cualquiera. El análisis se realiza para diversas superficies y se determina aquella de rotura crítica. El coeficiente de seguridad debe dar entre 1.2 y 1.3.

La superficie de rotura es normalmente una espiral logarítmica, que puede por simplificación ser admitida como circular y calculada por el método de las fajas (Fellenius), Bishop, etc. Otro método simplificativo aproxima la superficie de rotura a una recta; el esquema de fuerzas se muestra en la figura siguiente.

FIGURA 29. Esquema para verificación de rotura global

