



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**PROGRAMA DE MAESTRIA Y DOCTORADO
EN INGENIERÍA**

**CRITERIOS DE ANÁLISIS DE FALLA EN BORDOS DE
PROTECCIÓN EN RÍOS**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**MAESTRA EN INGENIERÍA
HIDRÁULICA**

P R E S E N T A:

TÉLLEZ QUINTANAR CECILIA

TUTOR:
DR. JESÚS GRACIA SÁNCHEZ

JULIO 2012

JURADO ASIGNADO

Presidente: Dr. Fuentes Mariles Oscar

Secretario: Dr. Domínguez Mora Ramón

Vocal: Dr. Jesús Gracia Sánchez

1^{er} Suplente: M.I. Franco Víctor

2^{do} Suplente: Dr. Escalante Sandoval Carlos

INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM

TUTOR DE TESIS
DR JESÚS GRACIA SÁNCHEZ

FIRMA

DEDICATORIA

**Con mucho cariño a mis padres y hermanos
quienes siempre han estado para mí.**

**A toda mi familia, a los que se fueron
y a los que están por venir.**

AGRADECIMIENTOS

- **A CONACYT por otorgarme una beca con la cual fueron posibles mis estudios de Maestría y la realización de este trabajo.**
- **Al Dr. Jesús Gracia por brindarme sus conocimientos y apoyo durante la elaboración de esta tesis.**
- **Al Ing. Víctor Franco por creer en mí, por sus consejos y apoyo constante.**

CRITERIOS DE ANÁLISIS DE FALLA EN BORDOS DE PROTECCIÓN EN RÍOS

INDICE	PAG
1. RESUMEN.	3
2. INTRODUCCIÓN.	5
3. BORDOS Y RECUBRIMIENTOS.	7
3.1. Funcionamiento y características.	7
3.2. Recubrimientos marginales.	8
3.3. Diseño de bordos.	11
3.4. Diseño de recubrimientos.	14
3.4.1. Espesor del enrocamiento.	16
3.4.2. Taludes recomendados.	17
3.4.3. Bordo Libre ...	17
4. TIPOS DE FALLAS EN BORDOS Y RECUBRIMIENTOS.	19
4.1. Fallas por estabilidad.	19
4.1.1. Pérdida de la capacidad de carga local.	20
4.1.2. Desbordamiento.	21
4.1.3. Tubificación.	21
4.1.4. Erosión.	23
4.1.5. Agrietamiento.	23
4.1.6. Socavación.	24
4.1.7. Licuación.	24
4.2. Fallas por deformación.	25
4.2.1. Asentamientos.	26
4.2.2. Expansión.	26
4.3. Fallas por vaciado rápido.	27
4.4. Principales problemas en los recubrimientos.	27
5. ANÁLISIS DE FALLAS POR ROTACIÓN.	29
5.1. Software para análisis de estabilidad de taludes SLOPE/W.	30
5.2. Métodos de análisis de SLOPE/W.	30
5.2.1. Método de Morgenstern-Price.	31
5.2.2. Método de Jambú.	33
5.2.3. Método de Bishop.	35
5.3. Uso del programa SLOPE/W.	36
5.3.1. Factores de seguridad.	40
5.3.2. Círculos de falla.	40

6. ANÁLISIS DEL FLUJO INTERNO.	43
6.1 Red de flujo.	43
6.2 Gasto de filtrado.	44
6.3 Gradiente hidráulico y presión intersticial.	47
6.4 Velocidades de filtrado.	48
6.5 Software para el análisis de flujo interno SEEP/W.	48
6.5.1 Uso y características del programa.	49
6.5.2 Generación de redes y gráficas de resultados.	49
7. SOCAVACIÓN EN CAUCES.	53
7.1 Rugosidad y rugosidad equivalente.	53
7.2 Velocidad permisible y de erosión.	55
7.3 Cálculo de la socavación en secciones rectas.	60
7.4 Efecto del material en suspensión.	61
7.5 Cálculo de la socavación en meandros.	62
7.6 Cálculo de la socavación en cauces heterogéneos.	63
8. PROCEDIMIENTOS CONSTRUCTIVOS Y COLOCACIÓN DE RECUBRIMIENTOS.	65
8.1 Compactación y calidad de los materiales.	65
8.2 Colocación de enrocamientos.	66
8.3 Colocación de tapetes flexibles.	67
8.4 Colocación de colchas o formaletas.	68
9. EJEMPLOS NUMÉRICOS.	71
9.1 Características propuestas.	71
9.1.1 Ejemplo 1.	73
9.1.2 Ejemplo 2.	78
9.1.3 Ejemplo 3.	80
9.1.4 Ejemplo 4.	82
9.1.5 Ejemplo 5.	84
9.1.6 Ejemplo 6.	85
9.1.7 Ejemplo 7.	87
10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	91
11. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.	93
APENDICE A.	
RESULTADOS DE LOS EJEMPLOS NUMÉRICOS.	97
ANEXO A.	
HOJAS TÉCNICAS DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS GEOTEXILES Y COLCHACRETOS	131

1. RESUMEN

Los bordos longitudinales son estructuras que se colocan como protección ante las inundaciones. Estas estructuras son construidas la mayoría de las veces con materiales naturales sueltos, es decir material impermeable en su cuerpo y enrocamiento como protección ante la socavación, recientemente se ha optado por las nuevas propuestas de tapetes y colchas de concreto flexibles, diseñadas también para evitar la socavación.

El presente trabajo propone diferentes diseños y condiciones de funcionamiento de bordos, los cuales son diseñados y analizados bajo 3 criterios

- Análisis Geotécnico
- Análisis Fluvial
- Comportamiento del recubrimiento

El diseño y análisis geotécnico se llevó a cabo con un paquete computacional llamado GeoStudio el cual cuenta con programas como SLOPE/w que realizan el análisis de estabilidad de taludes o SEEP/W que permite conocer las líneas de flujo y el gasto de filtrado dentro de un terraplén. Los resultados obtenidos revelaron que la colocación de enrocamiento solo favorecen la disminución de presiones, pero no al gasto de filtrado; por otro lado, los resultados obtenidos para las colchas flexibles mostraron funcionar favorablemente con una correcta colocación y bajo condiciones iniciales de diseño; su funcionamiento posterior a la socavación fue desfavorable.

El análisis Fluvial, se realizó con base en las investigaciones realizadas en el Instituto de Ingeniería sobre la socavación en causas naturales, donde se proponen formulas para el cálculo de la socavación dependiendo del tipo de material del que esté formado el cauce. Estas formulas se aplicaron para zonas de meandro, zonas rectas y cauces muy amplios. La variación en los resultados fue mucha, dado que el comportamiento del material varía mucho en relación con las velocidades que se presenten y las características geotécnicas del material, sin embargo se observó que posterior a la socavación el comportamiento del enrocamiento resulta más favorable que el de las colchas debido a que el comportamiento interno del bordo no varía mucho.

Las propuestas constructivas para los recubrimientos fueron tomadas para el caso de colchacretos de las especificaciones técnicas proporcionadas por los fabricantes. Se analizaon 3 de ellas, la primera consiste en abrir una zanja y colocar dentro de ella en la colcha y una membrana geotextil, la segunda cubriendo completamente el río, y la tercera disponiendo la colcha sobre el bordo y el cauce sin sujetarla. Se encontró la de comportamiento más desfavorable fue las de aquellas que no estaban sujetas o sujetas a una profundidad mayor que la de la socavación esperada.

Se concluye que la técnica, material y proceso constructivo que se utilicen deben proporcionar estabilidad ante condiciones geotécnicas como fluviales por lo que el diseño y análisis de los bordos debe realizarse de manera integral.

2. INTRODUCCIÓN

Las inundaciones son sucesos que ocurren con la presencia de agua excedente en los ríos o costas, producto de lluvias fuertes o por la falla de alguna estructura de control, estos fenómenos representan un alto riesgo para la seguridad de nuestras comunidades.

Un mal diseño de la obra o la exposición a condiciones extraordinarias llegan a producir daños que desestabilizan la estructura o producen su falla total, en el caso de los bordos el principal problema es el deslizamiento de taludes que están en función de las características del material y condiciones de flujo interno. La estabilidad de los bordos es estudiada desde un punto de vista Geotécnico, sin embargo en un diseño así no se consideran las condiciones fluviales a las que está expuesta la obra, por lo que muchas veces el comportamiento del río produce que los bordos fallen súbitamente. Las inundaciones súbitas son las más peligrosas ya que la falta de tiempo evita que se tomen las medidas necesarias y se produce la mayor cantidad de daños, tanto en pérdidas de vidas humanas, pérdidas económicas, infraestructura, bienes materiales y fuentes de trabajo de la población.

Los bordos de protección marginal son construidos en su cuerpo con materiales naturales sueltos y en su talud con enrocamiento o colchas flexibles de concreto, existen muchas técnicas de análisis numérico, propuestas constructivas y herramientas computacionales para el diseño y análisis de estas estructuras por lo que no es claro por qué siguen fallando estas estructuras, es por ello que en este trabajo se propone realizar análisis que permitan conocer el comportamiento para poder tomar medidas que favorezcan su comportamiento y por tanto la estabilidad de la obra.

3. BORDOS Y RECUBRIMIENTOS

Dada la gran variedad y acciones que existen para impedir las inundaciones y al estudio que debe realizarse para diseñar y mejorar el funcionamiento de éstas, este trabajo se enfocará únicamente a los bordos longitudinales y recubrimientos.

Los bordos son estructuras hidráulicas, construidas de materiales naturales cuya función es encauzar un río y confinar su escurrimiento para evitar que el agua sobrepase los niveles normales y llegue a causar inundaciones, se construyen en zonas que sufren de inundaciones periódicas, tormentas tropicales o crecidas de ríos y su principal objetivo consiste en proteger la vida de las personas y bienes de la población.

De acuerdo con su propósito los bordos pueden ser de dos tipos, longitudinales y perimetrales.

Los bordos longitudinales: son construidos directamente en las márgenes de los ríos en los que se aumenta la sección y con ello la capacidad del cauce, pueden construirse en una o ambas márgenes según las necesidades del sitio. En los ríos que tienen bordos en sus márgenes, pueden identificarse dos zonas, la zona natural del cauce también conocida como cauce principal y la zona donde se construyó el bordo, a esta zona se le conoce también como cauce de avenidas. Este tipo de obras se seleccionan más comúnmente para proteger zonas desarrolladas.

Los bordos perimetrales: son obras que se construyen alrededor de poblaciones cercanas a ríos y con alto riesgo de inundación. Es posible construir este tipo de estructuras si la topografía de la zona lo permite, es decir si el poblado se encuentra en una llanura. En ocasiones se rodea solamente una parte de la población manteniendo fuera las zonas altas y más alejadas de los ríos, es decir aquellas que tienen menor riesgo de inundarse. Como este tipo de bordos no se construye sobre el cauce no se afectan las condiciones naturales de éste. Otra ventaja que presentan es que son económicos, sin embargo debe tomarse en cuenta que será necesario proporcionar un mantenimiento adecuado cada vez que aumenten los niveles del río.

Recubrimientos: Los recubrimientos son las protecciones que se utilizan en los taludes de los bordos para protegerlos contra la erosión y socavación por efecto del agua o taludes labrados en los márgenes del río; los recubrimientos pueden ser de 2 tipos los colocados en camas y los de materiales naturales. Los recubrimientos colocados en camas como es el caso de los colchacretos o tapetes flexibles, se colocan sobre membranas geotextiles que confinan el talud del bordo manteniendo en su lugar el material fino. Estas membranas presentan diferentes grados de permeabilidad, de acuerdo con el fabricante y su colocación requiere la unión de varias camas y/o el relleno de las mismas in situ.

Los recubrimientos construidos con rocas permiten el paso libre entre éstas disminuyendo el efecto de la presión del agua en el cuerpo del bordo. En la actualidad se llegan a utilizar también recubrimientos de vegetación.

3.1 FUNCIONAMIENTO Y CARACTERÍSTICAS

Los bordos se construyen de materiales naturales colocados de acuerdo con las características geotécnicas que permitan retener el flujo del agua en el cauce, su forma geométrica es muy parecida a la de las presas, sin embargo estos tienen una altura mucho menor y trabajan bajo diferentes condiciones y propósitos:

- Pueden encausar ríos o rodear poblaciones o áreas de importancia.
- Sólo uno de sus taludes trabaja directamente con el agua y no permanece sumergido todo el tiempo.
- Se construyen para evitar inundaciones
- Quedan expuestos a turbulencias y grandes variaciones hidráulicas

3.2 RECUBRIMIENTOS MARGINALES

Los recubrimientos se colocan sobre los bordos que tienen problemas de inestabilidad, lo que está más relacionado con el arrastre del material y la resistencia de éste a la socavación.

Las nuevas propuestas de protección en bordos para evitar la socavación y erosión consisten en colocar concreto en forma de tapetes flexibles y colchones de concreto. Los tapetes flexibles (ver figura 3.1) consisten en la unión de bloques de concreto pequeños que van unidos con acero formando lienzos del tamaño que se necesite para cubrir la estructura.



Figura 3.1 Colocación de tapete flexible en todo el cana, (Sub Marelher, 2001).

Las características de los tapetes varían dependiendo del fabricante, Grupo Elther por ejemplo; ofrece tapetes de 2 tipos con las características mostradas en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Características de los tipos de tapetes flexibles del grupo Elther, (Sub Marelher, Fecha de consulta: Mayo 2011).

Tapete tipo I para construcción	
Dimensiones:	2.44 mt X 6.10 mt X 0.23 cm (8' X 20' X 9)
Integrado por:	160 elementos de concreto monolítico
Peso en tierra:	4,762.72 kg (10,500 lbs)
Peso sumergido en agua:	2,721.55 kg . (6,000 lbs)
Densidad del concreto:	2,322.67 kg/M3 (145 lbs ./ft3)
Resistencia del concreto:	281.22 kg/cm2 (4,000 lbs ./in2)
Cable estructural:	De copolímero extruido de 15.87 mm (5/8)
Resistencia de la cuerda:	4,762 kg (10,500 lbs)

Tapete tipo II para revestimiento	
Dimensiones:	2.44 mt X 6.10 mt X 0.114 cm (8' X 20' X 4 1/2)
Integrado por:	160 elementos de concreto monolítico
Peso en tierra:	4,762.72 kg (10,500 lbs) 2,721.55 kg (6,000 lbs)
Peso sumergido en agua:	1,632.93 kg . (3,600 lbs)
Densidad del concreto:	2,322.67 kg/M3 (145 lbs/ft3)
Resistencia del concreto:	281.22 kg/Cm2 (4,000 lbs ./in2)
Cable estructural:	De copolímero extruido de 15.87 mm (5/8)
Resistencia de la cuerda:	4,762 kg . (10,500 lbs)

Los tapetes de concreto flexible se colocan acompañados de una membrana geotextil, que permite el paso del agua manteniendo en su lugar el material de las márgenes y/o bordo evitando las fallas por deformación y ayudando a la estabilidad del talud.

Las mallas geotextiles son diseñadas para resistir tensión, deterioro químico o rotura. Los diferentes tipos de mallas geotextiles se eligen dependiendo de la granulometría del cauce. Las mallas geotextiles funcionan por su peso, cuando más pesada es la malla puede retener mejor las partículas más pequeñas, además estas son ayudadas por los elementos que se colocan sobre ella.

Como se mencionó, las mallas presentan diferentes características y estas dependen del fabricante. En México; Feltrex ofrece geotextiles para recubrimiento de taludes de los tipos G-10, G-20, G-40, G-50, G-60, G-70, G-80, en este trabajo se seleccionó la de tipo G-70 para la realización de los ejemplo y sus características se encuentran en el Anexo A.

Este tipo de membranas se fabrican entrelazando sus tejidos de polipropileno para lograr una mayor resistencia, los mencionados anteriormente son los que sugiere utilizar en terraplenes en suelos blandos, en taludes pronunciados y para recubrimientos en bordos y muros de protección. Este tipo de material es diseñado para resistir la luz ultravioleta y las condiciones ambientales (químicas, biológicas) de los suelos.

Las formaletas flexibles o felexocreto también conocidas como colchacretos o colchones de concreto, consisten en bolsas textiles creadas para ser rellenas de mortero en la zona donde se necesite proteger de la erosión y socavación, existen diferentes geometrías de acuerdo con los fabricantes y al tipo de protección que se desee proporcionar (ver figura 3.2).



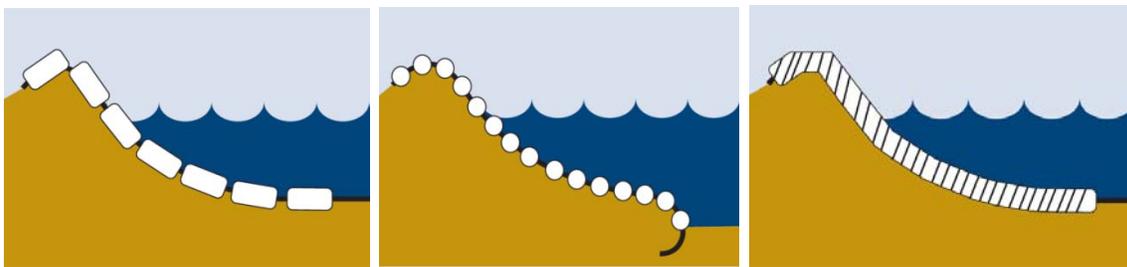
Figura 3.2 Formaleta Textil, Colchacreto FP-T (Geomatrix, Fecha de consulta: Mayo 2011)

Tres tipos de colchones se mencionan a continuación.

Colchones filtrantes. Este tipo de recubrimientos fueron diseñados para trabajar con rugosidades parecidas a la de recubrimiento con rocas y permite la filtración de agua, para evitar que se generen presiones dentro del cuerpo del bordo que lleguen a deformar el terraplén. Se utilizan principalmente para proteger bordos y márgenes en ríos. Un ejemplo de éste se observa en la figura 3.3 a).

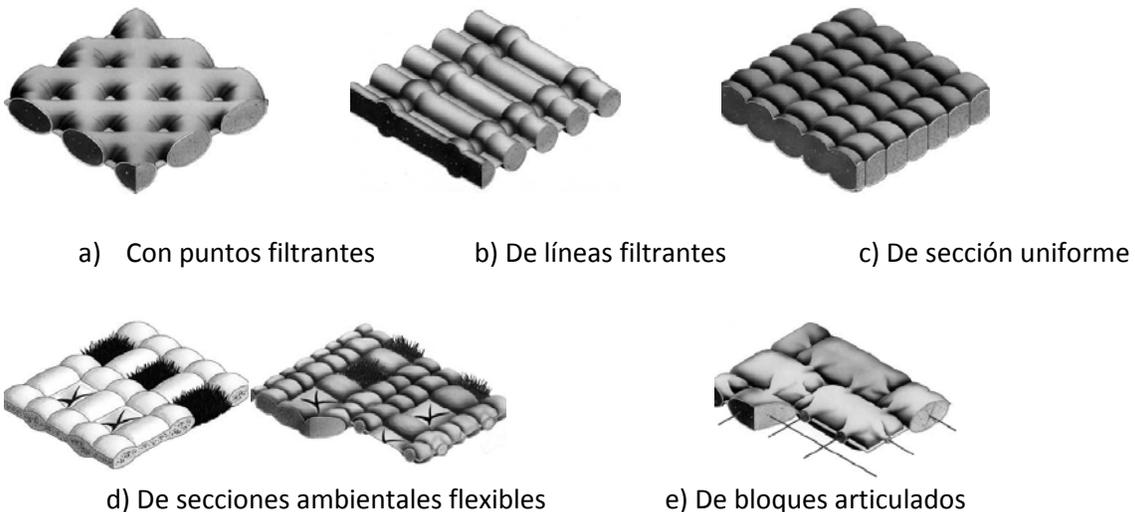
Colchones por bloques. Constan de bloques de mayor magnitud, son permeables en sus uniones y están reforzados con acero o una cuerda de polímero insertado entre los bloques, se usan principalmente en zonas donde se prevé un asentamiento, en protecciones marítimas y al pie de los diques (ver figura 3.3 b).

Colchón uniforme. Estos colchones como el mostrado en la figura 3.3 c), están diseñados con una malla doble y se encuentran reforzados por medio de una fibra interna, como no es necesario llenar por completo el geotextil, puede colocarse únicamente el espesor que requiera el proyecto. Este recubrimiento por ser uniforme tiene un bajo coeficiente de fricción, como es poco permeable puede utilizarse en los vasos de embalses para reducir las pérdidas por infiltración, en lagunas, canales, desagües y aliviaderos.



a) Colchón Filtrante b) Colchón por bloques c) Colchón uniforme
Figura 3.3 Tipos de recubrimientos. (EPS, 2011)

La forma de las colchas es muy variable ya que depende del fabricante y del propósito para el que se requiera, algunas de estas formas se muestran a continuación en la figura 3.4.



d) De secciones ambientales flexibles e) De bloques articulados
Figura 3.4 Diferentes formas de colchas (Hydrotex, 2001)

Los Jetty Jacks son recubrimientos colocados individualmente que por sus irregularidades retardan el flujo del agua reduciendo su velocidad y evitando que éstas lleguen a erosionar el cauce. Pueden ser prefabricados, o colocados con la unión de acero o de materiales naturales como se observan en la figura 3.5.

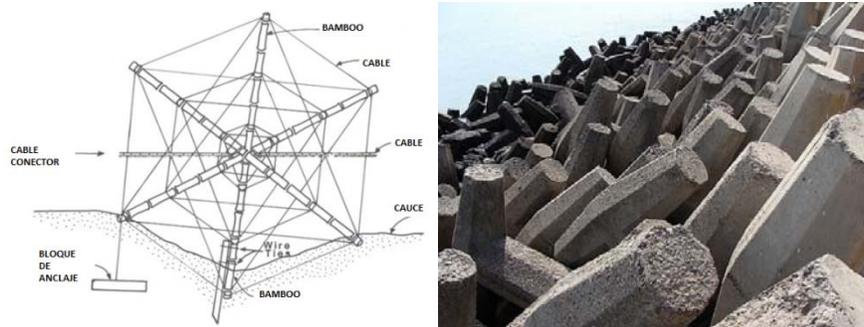


Figura 3.5 Jacks de Bamboo y prefabricados (TravelPod, 1998).

Por otra parte el primer recubrimiento utilizado por el hombre para proteger los bordos contra socavación y erosión fue el enrocamiento, del cual se hablará más adelante.

3.3 DISEÑO DE BORDOS

Como todas las obras de ingeniería para su diseño se deben realizar estudios previos, que justifiquen su construcción. En el caso de los bordos, dado que su principal objetivo es retener los gastos excedentes del cauce y evitar inundaciones, por ello es necesario definir la magnitud de la obra y las características que debe cumplir.

Para definir el tamaño de la obra se realiza un análisis beneficio-costos, donde se analizan los beneficios que se obtendrán respecto a los costos que involucra la construcción, con ellos se deciden las dimensiones de la obra. Una vez definida la magnitud de la obra se realiza un diseño de ésta, para ello se requiere analizar las condiciones del terreno, condiciones hidráulicas del cauce, materiales disponibles, zonas a proteger, etcétera.

El diseño y proyección de los bordos se realiza como se muestra a continuación

- Características del cauce y zona de protección
- Características hidráulicas, tirantes asociados a gastos y períodos de retorno
- Diseño preliminar de las secciones transversales y longitud de los bordos
- Análisis de estabilidad de taludes y flujo interno
- Análisis de factibilidad y dimensionamiento final
- Tratamientos preventivos y procedimiento constructivo
- Diseño del recubrimiento

En algunos casos puede corregirse la morfología del río trazando su eje y colocando los bordos en la forma que se espera del río, o rectificando su forma a una sección recta; en otros casos esto no es posible ya que se cuenta con construcciones de casas o pasos vehiculares que no pueden ser reubicados, en estos casos únicamente se aumenta la capacidad del cauce en la sección con la morfología que lleva el río o se coloca el bordo únicamente en la sección cóncava (extradós).

La selección del sitio donde se construirá el bordo está determinado por las zonas en las que se presentan las inundaciones, actualmente existen programas como HEC-RAS con el cual conocidas las características del cauce se pueden conocer los niveles de agua, las secciones hidráulicas del cauce y las velocidades, éstos resultados pueden ser visualizados fácilmente en perfiles, cortes longitudinales, en planta o en imágenes tridimensionales. Este tipo de herramientas permite visualizar directamente los daños esperados para diferentes gastos al sobreponer a estos resultados, imágenes satelitales de las zonas en estudio como se puede observar en la figura 3.6.

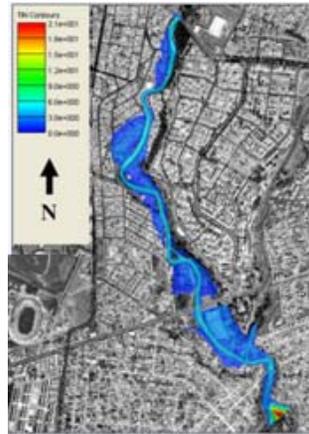


Figura 3.6 Mapa bidimensional de áreas de inundación, elaborado con datos de HEC-RAS, (Solís, 2007).

En mapas como el mostrado anteriormente pueden identificarse las zonas más vulnerables y en las que se necesitan estructuras de protección. Una vez identificada esta zona se realizan cortes transversales para conocer la geometría del cauce e identificar el bordo natural de éste (ver figura 3.7)

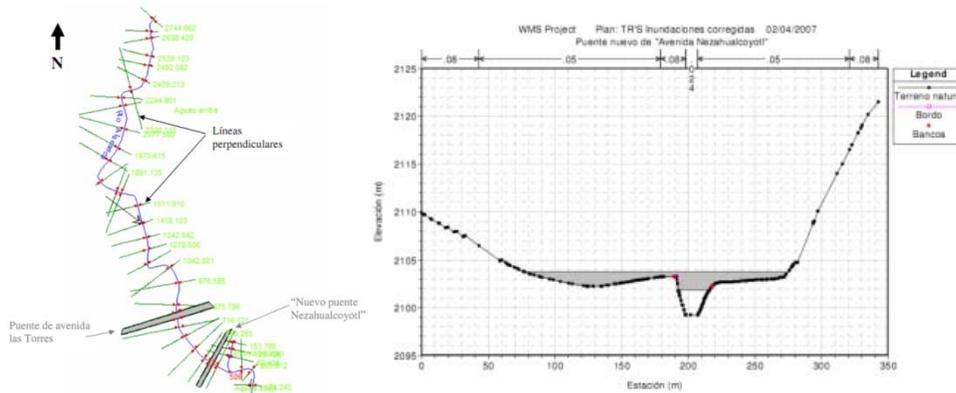


Fig 2.16.b. Sección transversal aguas abajo del puente nuevo Nezahualcoyotl,

Figura 3.7 Líneas perpendiculares de corte y sección transversal, elaborado con datos de HEC-RAS, (Solís, 2007).

Posteriormente se realiza un estudio geológico para conocer los tipos de materiales que existen en las zonas y los bancos de materiales cercanos que podrían ser explotados. Este estudio debe incluir tipos de rocas, su origen, textura y estructura, con esto se conoce el acomodo de sus granos y si las rocas contienen cavidades, fisuras o fracturas. Deben analizarse también las características del suelo en el cauce es decir su composición.

La estratigrafía es un rasgo representativo de las rocas que debe incluirse en este estudio para conocer las capas o lechos y su acomodo en el suelo en el cauce. Para la descripción de la estratigrafía de una zona se utilizan columnas (estratigráficas) en las cuales es posible ubicar a una profundidad, el tipo de afloramiento, tipo de roca, su acomodo y edad para saber si el sitio representa una buena zona de cimentación que produzca pocos asentamientos y el comportamiento del material del río en diferentes condiciones.

Como los bordos son obras construidas directamente en los ríos deben conocerse muy bien las características fluviales del cauce.

Dentro de los parámetros que se deben conocer se tienen:

- Geomorfología, la cual permite identificar el tipo de río que se tiene, edad, tipo de corrientes, geometría de los meandros, material, etcétera
- Régimen de flujo, gastos, rugosidades
- Erosión, socavación y depósito

Conociendo estos parámetros se pueden definir los factores que influyen en su estabilidad y considerar estos efectos para la construcción de algún tipo de estructura o para proponer alguna implementación en las estructuras ya existentes.

Conociendo ya las características del río y la zona que se desea proteger así como los materiales de que se dispone, puede procederse a realizar un diseño preliminar de las secciones de los bordos y proponer la longitud de éste.

Con el diseño preliminar es posible tener una idea de los factores a los que se enfrentará la estructura y realizar análisis de estabilidad de taludes, comportamiento del flujo interno que permitan tener una idea de las condiciones de trabajo de la obra y visualizar algún ajuste que sea necesario en la geometría.

Debe realizarse un estudio hidrológico que es la base para la construcción de una obra de protección contra inundaciones, con él se logran definir los gastos de diseño y la magnitud de la obra.

Para determinar la magnitud de la obra se debe determinar un período de retorno el cual depende del tipo de zona que se desea proteger para esto se realiza un análisis de lluvia-escurrimiento con el que se conoce el gasto máximo o gasto de diseño para diferentes períodos de retorno.

El período de retorno corresponde al número de años en que un evento máximo puede presentarse o ser excedido. El período de retorno adecuado al tipo de obra que se construirá depende del tipo de zona que se desea proteger como puede observarse en la Tabla 3.2.

Un análisis de factibilidad determina el impacto económico que tendrá la construcción, dentro de él se analizan las condiciones del terreno en el que se quiere construir, es decir, se determina el uso del suelo y si este tiene propietarios. También se determinan las magnitudes de la obra haciendo una comparación de los beneficios y costos.

Tabla 3.2. Período de retorno de acuerdo con la zona por proteger, (Fuentes, 1999).

Características de la zona por proteger	Tr (Años)
Parcelas agrícolas son posibles pérdidas de vidas humanas	5
Distritos de riego, sin riesgo de pérdidas de vidas humanas	25
Zonas agrícolas poco pobladas	50
Zonas agrícolas con poblados	100
Zona industrial y urbana	500
Zona densamente poblada	1000
Ciudades	1000

Antes de llevar a cabo la construcción de la obra debe analizarse si se requiere aplicar algún procedimiento preventivo antes de la construcción de la obra.

Una vez garantizada la estabilidad del bordo y definidas las magnitudes óptimas de la obra se diseña el recubrimiento del bordo que será el que evite daños por erosión y socavación, la elección del material o tipo de recubrimiento va en función de las características del flujo y condiciones de trabajo del bordo.

Posteriormente se procede a realizar la construcción de la obra de acuerdo con el programa de construcción.

3.4 DISEÑO DE RECUBRIMIENTOS

Los recubrimientos son colocados en los bordos o simplemente ser colocados para proteger los taludes de estos, para su diseño los datos que se necesitan son semejantes a los necesarios en el diseño de bordos: características de talud a proteger y gastos asociados a un período de retorno, los tirantes correspondientes a estos gastos, las velocidades del flujo y tipos de materiales.

La selección del tipo de recubrimiento dependerá en gran medida de la disponibilidad de materiales, costos de colocación y acarreo, disminución de la sección efectiva del cauce y efecto del cambio de la rugosidad (en caso de utilizar colchas o tapetes) además de las necesidades constructivas y de colocación.

Como se mencionó anteriormente los recubrimientos son colocados para proteger de la socavación el material del cuerpo del bordo, por lo que generalmente, se trata de material grande como gravas o cantos rodados que resisten los efectos del agua.

Tanto el enrocamiento como el recubrimiento deben tener un peso suficiente o una colocación adecuada para que impida su arrastre o el arrastre del material de las márgenes, pero no excesivo como para que sobrepase la capacidad de carga del material que se encuentra debajo de él.

Los recubrimientos marginales de tipo impermeable solo se recomiendan para cauces cuyo nivel freático se encuentra por debajo del nivel del fondo del cauce y el propósito de estos es mantener el agua en el cauce e impedir su pérdida. Una alternativa que puede ayudar a evitar el paso del

agua al interior del bordo es el uso de geotextiles de la permeabilidad deseada y un recubrimiento de tapetes que impida el movimiento de éste.

Un recubrimiento impermeable puede crearse al colocar un recubrimiento de gaviones e inyectarlo con concreto hidráulico o una capa asfáltica, como se observa en la figura 3.8; este tipo de recubrimientos se realizan solamente en ríos pequeños donde se puede trabajar en seco (época de estiaje).

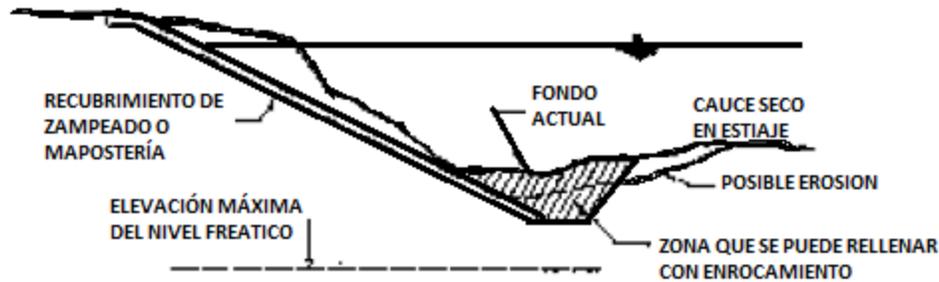


Figura 3.8 Recubrimiento impermeable en pequeños cauces, (Lenmac, 1997).

Por otro lado, los recubrimientos permeables son elementos que se colocan en las márgenes de los ríos y que tienen la suficiente resistencia como para no ser arrastrados, ejemplo de estos son los Jetties o los gaviones. El propósito de estos consiste principalmente en reducir las velocidades para evitar que el cauce sea erosionado, en algunos casos este tipo de recubrimientos se proponen para capturar basura o permitir el libre crecimiento de la vegetación.

La colocación de vegetación es propuesta también como medida ecológica, para evitar socavación pueden colocarse pastos y vegetación de la zona, para lo cual es recomendable analizar las condiciones locales. En caso de utilizar este tipo de medida para prevenir la erosión debe considerarse su colocación de recursos vegetales aumenta la rugosidad del cauce y por tanto reduce su capacidad hidráulica.

Para los recubrimientos de materiales naturales colocados a volteo o compactados se hace una revisión que garantice la permanencia del material en el sitio (condición de no arrastre) y la estabilidad en el talud (círculos de falla, ángulos de diseño y reposo del material), para el caso del los recubrimientos colocados en forma de cama se debe analizar además la estabilidad al pie del talud y en la cimentación del recubrimiento.

Para conocer si el material será removido de su sitio, deben compararse el esfuerzo cortante actuante con el resistente. El esfuerzo resistente es el esfuerzo cortante crítico del material del cauce τ_c y el esfuerzo actuante τ_0 es el esfuerzo producido por el flujo en el fondo que se calcula como se observa en la ecuación 3.1.

$$\tau_0 = \gamma d S_0 \quad \dots (3.1)$$

- τ_0 esfuerzo cortante producido por el flujo en el fondo (N/m^2)
- γ peso específico del agua (N/m^3)
- d tirante (m)
- S_0 pendiente del cauce

Si

- $\tau_0 < \tau_c$ No hay arrastre
- $\tau_0 = \tau_c$ El arrastre de partículas está a punto de iniciarse
- $\tau_0 > \tau_c$ Hay arrastre

Otra forma de conocer si existe arrastre conociendo la velocidad crítica que existe cerca del fondo U_c , la determinación de éstas se puede realizar bajo diferentes criterios o pueden tomarse como referencia las obtenidas de varias investigaciones, esta información se encuentra en tablas que resultan muy útiles, ya que se puede leer directamente la velocidad que soporta el material asociada a su esfuerzo cortante crítico. A continuación se presentan algunas de ellas (ver tabla 3.3)), si se desea más información al respecto se sugiere consultar “Inicio de movimiento y acorazamiento” de Maza, 1997.

Tabla 3.3 Comparación de valores de velocidades máximas permisibles o no erosivas, y sus correspondientes esfuerzos cortantes, según Etcheverry, (Maza, 1997).

Suelo	Valor de n	U_c (m/s)	τ_c (N/m ²)
Arena pura muy ligera (Arenas Movedizas).	0.020	0.229 a 0.305	0.287 a 0.527
Arena suelta muy ligera.	0.020	0.305 a 0.457	0.527 a 1.197
Arena gruesa o suelo arenoso ligero.	0.020	0.457 a 0.61	1.197 a 2.155
Suelo arenoso promedio.	0.020	0.61 a 0.762	2.155 a 3.352
Limo arenoso.	0.020	0.762 a 0.838	3.352 a 4.022
Suelo aluvial con limo, ceniza volcánica.	0.020	0.838 a 0.914	4.022 a 1.788
Limo firme, limo arcilloso.	0.020	0.914 a 1.143	1.788 a 7.517
Arcilla rígida, gravas ordinarias.	0.025	1.219 a 1.524	13.311 a 20.78
Grava gruesa y cantos	0.030	1.524 a 1.829	30.021 a 43.237
Conglomerados, grava cementada, pizarra suave, roca sedimentaria suave.	0.025	1.829 a 2.438	30.021 a 53.34

3.4.1 ESPESOR DEL ENROCAMIENTO

El WES sugiere que las rocas deben caber perfectamente dentro del espesor del enrocamiento para proveer una mejor resistencia ante las fuerzas erosivas. Rocas demasiado grandes pueden o aisladas pueden producir una falla y afectar a la estabilidad entre rocas individuales o causando huecos de gran magnitud que exponen el material interno a las filtraciones o que remueven el material más fino, las rocas muy pequeñas o muy grandes pueden ser removidas individualmente y remplazadas por otras de tamaño adecuado. Cuando la cantera produce rocas de gran magnitud debe cambiarse el método de extracción o eliminar el tamaño máximo de la curva granulométrica para utilizar solamente rocas de menor tamaño, obtener las rocas de otro banco o incrementar el espesor de la capa para que estas rocas puedan estar contenidas perfectamente. Los siguientes criterios aplican en la selección del espesor del enrocamiento:

Éste no debe ser menor que el diámetro esférico de del límite superior W_{100} o menor que 1.5 veces el diámetro mínimo inferior de las rocas W_{50} . En espesor del recubrimiento determinado de esta manera debe incrementarse un 50% cuando es colocado bajo el agua para absorber la incertidumbre producida por el método de colocación.

Por otro lado Marsal 1979 propone los siguientes tamaños mínimos para las rocas y sugiere el espesor de las capas de acuerdo con éstos (ver Tabla 3.4)

Tabla 3.4 Diseño de protecciones de enrocamiento, (Marsal 1979).

altura máxima esperada (m)		Tamaño mínimo recomendado para el espesor medio de la roca (m)	Espesor de la capa (m)
0	0.6	0.25	0.3
0.6	1.2	0.3	0.5
1.2	1.8	0.38	0.6
1.8	2.4	0.46	0.8
2.4	3	0.53	0.9

3.4.2 TALUDES RECOMENDADOS

La estabilidad del enrocamiento también se ve afectada por taludes muy pronunciados por lo que el WES sugiere que el talud no sea más pronunciado que la relación 1.5:1, se recomiendan pendientes con relaciones 2:1 o 3:1 para tener una mejor estabilidad del recubrimiento. El tamaño de la roca que se requiere para resistir las fuerzas erosivas del flujo incrementa cuando el ángulo del talud incrementa en relación con el ángulo de reposo del material.

3.4.3 BORDO LIBRE

El cálculo de la altura del bordo libre propuesto por Marsal 1979, es el siguiente

$$H_{BL} = (H_1 + H_2 + H_3) + \Delta H + H_s \quad \dots (3.2)$$

donde

H_{BL} Altura del bordo libre

H_1 Altura sobreelevada por el efecto del viento

H_2 Altura de las olas producidas por el viento respecto al nivel de aguas en reposo ya sobre elevado

H_3 Altura del rodamiento de las olas sobre la estructura

ΔH Asentamiento máximo

H_s Altura adicional de seguridad

H_s debe cubrir los errores de las estimaciones hidrológicas y la profundidad de agrietamiento del a corona, asentamientos diferenciales o sismo. El valor más usado para H_s es entre 1 y 4m, dependiendo de las condiciones locales.

4. TIPOS DE FALLAS EN BORDOS Y RECUBRIMIENTOS

Como se mencionó anteriormente los bordos son estructuras que se encargan de encausar y retener el agua para evitar inundaciones, la construcción de este tipo de obras en un río presenta algunas alteraciones en el funcionamiento del cauce como son:

- Elevación del nivel de agua
- Incremento de la velocidad del flujo
- Aumento de la erosión del río

En algunos tramos éstas estructuras llegan a reventar por lo que es necesario corregir sus condiciones actuales, sobre elevar sus niveles y desazolvarlas en algunos casos.

Las fallas en los bordos se presentan en su mayoría durante y después de una avenida, en otras ocasiones ocurren por el proceso de asentamientos, erosiones y socavación.

Dado que los bordos y estructuras marginales son elementos de tierra que funcionan bajo efectos del agua es necesario hacer estudios de hidráulica fluvial que permitan conocer las características y comportamiento del cauce, de la misma forma es necesario conocer el mecanismo de falla de este tipo de estructuras para poder evitar aquellas acciones que lo afectan. En los subtemas siguientes se mencionarán los principales tipos de fallas y su mecanismo, se presentaran algunos métodos de análisis con el propósito de conocer las fuerzas actuantes que la ocasionaron y proponer medidas que eviten una falla futura, en cuanto a los efectos producidos por el agua, se analizarán en el capítulo siguiente.

Algunos puntos que pueden indicar la presencia de alguna anomalía son los siguientes

- Elevación y alineación de la corona
- Formación de grietas en la corona y paramento mojado
- Protuberancias en la cimentación y talud aguas abajo
- Desprendimiento del pie en la base del bordo
- Desprendimiento del material inundado en el paramento mojado
- Identificación de madrigueras
- Filtraciones
- Erosión de los taludes por lluvias

Analizando un poco el comportamiento geotécnico que es lo correspondiente a este capítulo, tenemos que el tipo de falla está en función de su material de construcción y de la mecánica del mismo. Las fallas de este tipo de terraplenes se pueden clasificar en dos tipos:

- Por estabilidad. Se producen ante efectos mecánicos del material y su alteración debida al flujo del agua.
- Por deformación. Cuando la falla que se presenta es producida por la zona de desplante de la obra o por las características del material con que se construyó.

4.1 FALLAS POR ESTABILIDAD

Este tipo de fallas son muy similares a las que se producen en presas flexibles, éstas llegan a afectar gran parte de la estructura provocando su falla total o parcial. En algunos casos si falla

parcial es localizada a tiempo pueden tomarse medidas preventivas que permitan que la obra siga funcionando de lo contrario si la falla no es detectada a tiempo se puede perder la estructura por completo y ocasionar serias afectaciones.

Dentro de las fallas por estabilidad los tipos de fallas que se presentan son debidas a

- Deslizamientos de taludes de tipo circular (ver figura 4.1), o lineal
- Pérdida de capacidad de carga
- Fallas por movimiento del agua

Las fallas debidas al deslizamiento de taludes son producto de la variación y movimiento del agua, pueden analizarse de acuerdo con su forma de falla, que puede ser circular y analizarse por los métodos de Jambú, Fellenius, Taylor, o método Sueco, en caso de llevar una tendencia lineal el análisis puede hacerse por el método de la cuña. También se pueden considerar fallas compuestas en donde una parte de la falla sigue un comportamiento plano y el resto sigue un comportamiento curvo.



Figura 4.1 Falla circular de una ladera en Colombia, (Suarez J, 2008)

4.1.1 PÉRDIDA DE LA CAPACIDAD DE CARGA LOCAL

Se presentan cuando la estructura ha sido expuesta a cargas cortantes de gran magnitud que dejan vulnerable a la zona, reduciendo la capacidad de carga de la estructura de tal forma que al trabajar bajo condiciones de carga fuertes llega a producir una falla, este tipo de falla es la más común en cimentaciones, sin embargo considerando que los bordos son aprovechados como caminos (ver figura 4.2), debe realizarse el diseño considerando una carga viva correspondiente al peso del vehículo más grande que puede transitar la zona. Este tipo de fallas es de rotación, es decir su análisis se puede llevar a cabo bajo el criterio de falla circular.



Figura 4.2 Exceso de carga en un bordo. Villahermosa, Tabasco.

4.1.2 DESBORDAMIENTO

Esta falla ocurre por una falla en el estudio hidrológico o por la llegada de una avenida extraordinaria con lo que el gasto de diseño excede el nivel del bordo y pasa por encima de él, como se observa en la figura 4.3 a), dado que el talud aguas abajo no está diseñado para resistir el paso del agua éste comienza a socavarse debilitando el cuerpo del terraplén y destruyendo la estructura (ver figura 4.3 b). La falla puede ser total y llegar a colapsar el bordo o puede presentarse progresivamente; en el caso de arcillas, permitiendo que se tomen medidas de reparación o en su defecto desalojar el área de inundación.

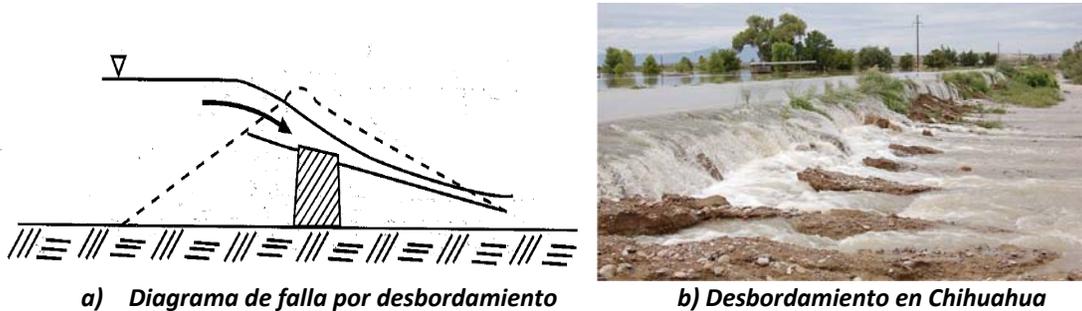


Figura 4.3 Fallas por desbordamiento. (IMTA, 2000; El sol de Chihuahua)

Como los bordos son estructuras construidas principalmente de materiales naturales sueltos, no tienen la capacidad de funcionar como estructuras vertedoras, por lo que su gasto de diseño debe quedar afectado por un factor de seguridad que garantice la estabilidad de la estructura.

Para absorber los errores posibles en el cálculo de los gastos de diseño y las variaciones de la elevación de los bordos debidos ya sea a asentamientos o deformaciones se coloca una sobreelevación conocida también como bordo libre mencionados en el subtema 3.4.3. En algunas ocasiones, cuando se llegan a exceder esta elevación lo que se hace es sobre elevar la corona ya sea con materiales propios del bordo o con algún otro material que se tenga disponible, sin embargo este tipo de medidas se realizan solo en situaciones de emergencia ya que siempre es necesario calcular y planear adecuadamente cualquier obra o implementación de esta (ver figura 4.4).

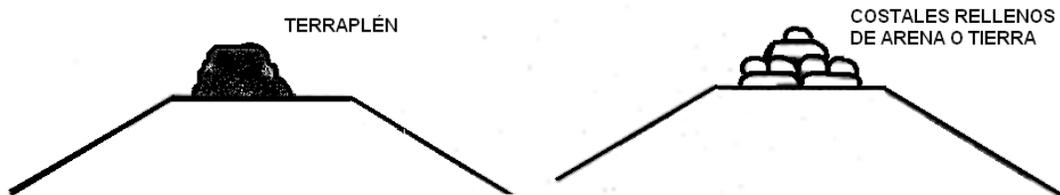


Figura 4.4. Sobreelevación de bordos, (Maza, 1997).

4.1.3 TUBIFICACIÓN

La tubificación se presenta cuando una partícula de agua atraviesa los granos del suelo transportándose de un lado a otro y creando tubos que atraviesan completamente el terraplén, cuando el flujo de agua aumenta crea canales que debilitan el cuerpo del bordo llegando a ocasionar su falla. Esta falla se presenta en el cuerpo de la estructura cuando el material no fue compactado suficientemente o los materiales no cumplían con las sollicitaciones por lo que la

probabilidad de ocurrencia de este fenómeno depende en gran medida de las propiedades de los suelos. Se sabe que los suelos con alta plasticidad presentan mayor resistencia a la tubificación que aquellos no plásticos.

Este tipo de falla también puede presentar en la cimentación cuando el material es arrastrado por el río y deja pasar el agua más fácilmente.

En algunas ocasiones estos tubos los cavan los animales o se generan con el crecimiento de las raíces de la vegetación, por lo que es recomendable para ambos casos que se evite la presencia de vegetación que pueda invitar a este tipo de animales, como se muestra en la figura 4.5.



Figura 4.5 Tubificación debida al efecto de los peces. Villahermosa, Tabasco.

En ocasiones después de un deslizamiento local el terraplén queda debilitado permitiendo que se genere más fácilmente la turificación. Para este caso el análisis que se debe realizar es el de un tipo de falla circular de pie.

Estas fallas pueden ser corregidas si se detectan en sus inicios colocando costales que no permiten el transporte del agua y evitan que el tubo siga a travesando el cuerpo del bordo.

Cabe señalar que las arcillas muy plásticas presentan una gran resistencia a la tubificación, ya sea con una compactación buena o con una deficiente por lo que debe buscarse la mejor calidad de arcilla de la zona para la construcción de los bordos. En caso de no contar con la disposición de los materiales se sugiere consultar la Tabla 4.1 donde se muestra la resistencia a la tubificación para diferentes suelos.

En los casos en los que el bordo está construido de material homogéneo semejante al del cauce debe cuidarse muy bien la ubicación de la línea de flujo superior ya que si ésta llega a atravesar completamente el cuerpo del bordo se corre el riesgo de fallar por tubificación por lo que es necesario mantener supervisado el talud exterior y detectar filtraciones. Cuando se conoce la presencia de estos problemas puede pensarse en la colocación de una pantalla impermeable o un dren que permita abatir la línea de flujo y conducir el agua de tal forma que no cauce efectos desfavorables en el bordo.

Tabla 4.1 Resistencia a la tubificación ante diferentes mezclas de suelo (Juárez, 1997).

Gran resistencia a la tubificación	1	Arcillas muy plásticas ($I_p > 15\%$)
	2	Arcillas muy plásticas ($I_p > 15\%$), con compactación deficiente
Resistencia media a la tubificación	3	Arenas bien graduadas o mezclas de arena y grava, con contenido de arcilla de plasticidad media ($I_p > 6\%$), deficientemente compactadas.
	4	Arenas bien graduadas o mezclas de arena y grava con contenido de arcilla de plasticidad media ($I_p > 6\%$), deficientemente compactadas.
	5	Mezclas no plásticas bien graduadas y bien compactadas, de grava, arena y limo ($I_p > 6\%$)
Baja resistencia a la tubificación	6	Mezclas no plásticas bien graduadas y deficientemente compactadas, de grava, arena y limo ($I_p > 6\%$)
	7	Arenas limpias, finas, uniformes ($I_p < 6\%$)
	8	Arenas limpias, finas, uniformes ($I_p < 6\%$), deficientemente compactadas.

4.1.4 EROSION

La erosión puede afectar tanto el talud mojado como el seco, este tipo de efectos se producen principalmente por la lluvia y oleaje y llegan a ser más notorios cuando el tamaño medio de las partículas es pequeño y fácilmente transportable. En el talud mojado ocurre si no se tiene la suficiente protección del material en su desplante por lo que es fácilmente transportado por la corriente del cauce. Una falla por erosión es considerada cuando se pierde el recubrimiento del talud.

4.1.5 AGRIETAMIENTO

Esta falla se considera por estabilidad ya que afecta el comportamiento mecánico del elemento, sin embargo; los agrietamientos son causados por asentamientos diferenciales que se consideran fallas por deformación de los cuales se hablará más adelante.

Las grietas que se presentan en los bordos pueden ser:

- Longitudinales (Paralelas al eje del bordo)
- Transversales
- Profundas
- Someras

Estas fallas se pueden presentar debido a movimientos bruscos como explosivos o sismos. Los agrietamientos longitudinales llegan a presentarse después de un deslizamiento en el talud mojado. Las grietas transversales llegan a ser producto de un secado o expansión excesiva del material.

Las grietas generadas favorecen el curso del agua a través del terraplén por lo que la capacidad del bordo se ve reducida y el agua puede llegar a salir de él produciendo grietas más profundas, deformándolo y socavando el cuerpo de éste.

La falla debida a una grieta transversal es la que llega a derramar o deformar el bordo por lo que el mecanismo de falla es similar al de un desbordamiento. Las fallas longitudinales pueden analizarse por alguno de los métodos de rotación, como falla circular (ver figura 4.6).



Figura 4.6 Grietas longitudinales producidas en un Bordo. Villahermosa, Tabasco.

4.1.6 SOCAVACIÓN

La socavación se produce por la fuerza del agua ejercida en las partículas del terraplén, es decir por las fuerzas cortantes producidas por el agua. La socavación es más severa cuando la pendiente es muy fuerte y cuando se presentan avenidas. El análisis de este fenómeno se analizará en el subcapítulo 3.3

Algunas medidas para prevenir la socavación consisten en la colocación de tapetes o colchas de concreto, que adicionalmente evitan los efectos de la erosión. Ya sea en la sección recta o en la curvatura de un meandro. Los procedimientos que sugiere Lemac en su manual de gaviones para evitar que se socave un recubrimiento es desplantar la protección a una profundidad tal que no sea afectada por la erosión general o la erosión en curvas, otra de ellas consiste en excavar una trinchera al pie del recubrimiento, rellenándola con un material que no pueda ser arrastrado por la corriente.

Las principales fallas en los recubrimientos ya sean los de materiales naturales o los de recubrimientos de colchas o tapetes se ven influenciados en su proceso de colocación, por ejemplo la colocación a mano del enrocamiento resulta más favorable que dejar caer simplemente el material sobre el bordo, de la misma manera el proceso que se elija en la colocación de los recubrimientos influye en el comportamiento del flujo y del talud.

4.1.7 LICUACIÓN

El fenómeno de licuación ocurre en arenas y limos cuando la presión del fluido aumenta por la aplicación de algún tipo de fuerza como puede ser la debida a movimientos sísmicos, en las obras construidas de materiales naturales la licuación se genera con la presencia de cargas cíclicas que aumentan la presión de poro por lo que el contacto entre los granos disminuye y se comporta como un líquido denso que provoca deslizamientos en los taludes.

Como esta falla produce deslizamiento de taludes pueden utilizarse métodos de falla circular para su análisis.

4.2 FALLAS POR DEFORMACIÓN

En cualquier estructura de materiales naturales sin cementar, puede esperarse este tipo de falla dado que se llegan a presentar deformaciones durante la construcción y en su vida útil (ver figura 4.7). La mayor parte de las veces son causa de una cimentación desfavorable, o un mal proceso constructivo (por ejemplo una mala compactación).



Figura 4.7 Deslizamiento del terraplén como consecuencia de deformaciones debidas a la filtración de agua en la ladera. Villahermosa, Tabasco.

Las fallas debidas a la deformación pueden dar pie a otro tipo de fallas que pueden ocasionar el colapso de la estructura, como es el caso de los agrietamientos, es por eso que debe tenerse una supervisión adecuada para conocer la magnitud de las deformaciones, y saber hasta qué punto pueden ser aceptables.

Internamente y durante la construcción deben monitorearse los desplazamientos superficiales, internos, verticales, horizontales, deformaciones, presiones totales, presiones efectivas y presiones de poro, supresión y niveles de agua que son factores que pueden ocasionar una falla de este tipo.

En la actualidad existen equipos de monitoreo que permiten conocer estas deformaciones, una vez que la obra está terminada, se deben realizar revisiones y proporcionar un mantenimiento para garantizar que la obra se encuentra en las mejores condiciones posibles o en caso contrario para hacer implementaciones a la estructura. Dentro de estas revisiones periódicas se identifican posibles filtraciones para prevenir la formación de fallas o impedir que se sigan formando por medio de un tratamiento.

Las fallas debidas a deformaciones pueden clasificarse de acuerdo con dos parámetros; sus asentamientos debidos a pérdida de masa y las debidas al incremento de la densidad en caso de ser material expansivo. Las primeras generalmente son causa de la socavación y las segundas dependen de las características del material.

4.2.1 ASENTAMIENTOS

Los asentamientos en suelos cohesivos se producen por la expulsión de agua debido a la aplicación de cargas externas. (ver figura 4.8). En el caso de suelos arenosos se atribuye a que algunas partículas llegan a ser transportadas generando huecos que producen hundimientos. Los asentamientos llegan a producir grietas debido a las variaciones producidas en el material.

Los asentamientos generados por pérdida de masa se deben al movimiento de las partículas del suelo que puede ser resultado de la socavación o colapso de los taludes.



Figura 4.8. Bordo con falla por asentamiento. Villahermosa, Tabasco.

4.2.2 EXPANSIÓN

La expansión se presenta en materiales arcillosos que pueden aumentar notablemente su volumen por efecto del agua o al encontrarse bajo pequeños esfuerzos. Este tipo de suelos admiten y pierden muy fácilmente el agua, por lo que en épocas de lluvias bajo los cambios constantes de expansión y contracción generan grietas.

Si se utilizan arcillas expansivas, estas pueden generar deformaciones durante la construcción o durante la vida útil de la obra. Una característica de las arcillas expansivas es que éstas al aumentar su volumen también se vuelven fuertemente compresibles. El principal factor que contribuye a la expansión es la liberación de las cargas que actúan sobre las arcillas favoreciendo a su vez el contacto prolongado con el agua lo que hace posible que el agua sea más fácilmente absorbida.

Sabiendo que los asentamientos son producto de un cambio en la densidad de la masa se propone realizar las pruebas de compactación y consolidación para el material que se va a construir el terraplén. Para conocer tanto la expansión como la compactación se realiza la prueba de compactación estándar.

De la prueba de compactación puede obtenerse la fuerza necesaria para extraer el volumen de vacíos del material, es decir la fuerza de compactación que debe aplicarse durante el proceso constructivo para sufrir menos asentamientos.

4.3 FALLA POR VACIADO RÁPIDO

Estas fallas se presentan en arcillas de alta plasticidad con considerables contenidos de agua. Un vaciado rápido ocasiona un aumento del peso específico del suelo debido a que el grado de saturación de éste es mayor al recibir la avenida por lo que se producen altas presiones en el talud mojado.

Estos deslizamientos rara vez se presentan dos veces y lo hacen con velocidades lentas. La mayoría de estas fallas llegan a ser profundas hasta llegar al terreno de cimentación o a dañar la mitad del ancho de la corona.

Estas fallas, se analizan con el criterio de esfuerzos totales y el de esfuerzos efectivos; en el primero la resistencia del suelo se conoce por medio de pruebas rápidas consolidadas mientras que en el cálculo de los esfuerzos efectivos las presiones neutrales son calculadas del estudio de la red de flujo que se establece durante el vaciado rápido. (Juárez 1979)

Este tipo de fallas tienen como consecuencia el deslizamiento del talud mojado.

4.4 PRINCIPALES PROBLEMAS EN LOS RECUBRIMIENTOS

A pesar de las especificaciones en la colocación de estos materiales, los taludes fallan y tanto los tapetes como los colchones sufren fallas, como por ejemplo, en la figura 4.9 a) se observa que el bordo está trabajando con un muro en su corona, provocando la falla de talud por capacidad de carga además, puede observarse la formación de pliegues del tapete y presencia de vegetación.

En la figura 4.9 b) se observa que hubo un deslizamiento de talud en presencia de vegetación, lo que arrastró por completo la colcha.



a) Bordo con muro en su corona b) Falla de talud y desprendimiento de colcha



c) Bordo con deformación d) Falla de talud con costales de concreto en la corona

Figura 4.9 Fallas en los recubrimientos. Villahermosa, Tabasco

En la figura 2.4 c) se observa la deformación de bordo y deformación del tapete debido a la filtración y comportamiento del material del terraplén. La figura 2.4 d) muestra la falla de talud debida a exceso de carga, se puede observar una mala colocación de las colchas de concreto sobre costales de arena y colocación de costales de concreto en la corona del bordo y sobre la colcha.

En la figura 4.10 a) se puede observar que en el bordo se utilizaron diferentes materiales de protección, en el centro se observa una falla debida a la colocación de costales de concreto con lo que se tuvo una falla por capacidad de carga, en esta misma figura además se observa que las colchas fueron sobrepuestas y que por debajo de ellas se presentó una socavación.



a) Bordo con sobre posición de colchas



b) Falla de talud y rotura de la colcha



c) Falla de talud debido a las raíces de los árboles



d) Socavación vista en recubrimiento de concreto

Figura 4.10 Fallas en los recubrimientos. Villahermosa, Tabasco.

En la figura 4.10 b) se observa un deslizamiento de talud que ocasiona la rotura de la colcha; de manera semejante en la figura 4.10 c) se observa que por la falla de talud el bordo pierde por completo su recubrimiento y que esto es muy probablemente por la presencia de raíces de los árboles. En la figura 4.10 d) se puede observar claramente el efecto de la socavación en el talud del bordo que deja en caída libre el recubrimiento de concreto que se colocó sobre éste.

5. ANÁLISIS DE FALLAS POR ROTACIÓN

El método de Fellenius, fue el primero en desarrollarse y de él parten los análisis posteriores. Fellenius inició este análisis al intentar calcular la falla del muelle de Göteborg en Suecia. Este método llamado Sueco por la nacionalidad del autor, y también conocido como de las dovelas propone una superficie deslizante circular en donde actúan como fuerzas resistentes la cohesión y la fricción. Este análisis ha sido el punto de partida de otros métodos.

Las fallas por rotación pueden ser de tres tipos diferentes (ver figura 5.1)

- Rotación local
- Rotación por pie de talud
- Rotación por base

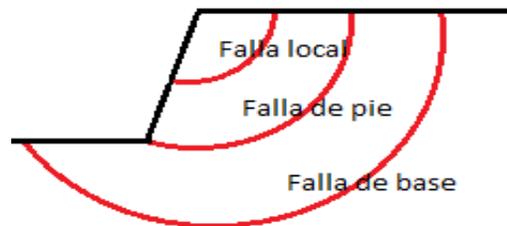


Figura 5.1 Fallas por rotación, (Juárez, 1996).

Como hemos visto anteriormente de acuerdo con diferentes condiciones de funcionamiento se llegan a producir fallas, la mayoría de ellas se ve reflejada en un deslizamiento de tipo circular por lo que el análisis de esta falla es de suma importancia.

Para realizar el análisis de estabilidad, de una manera rápida y sencilla para taludes cohesivos homogéneos, se recomienda el método sueco que se enfoca en el análisis por estabilidad para fallas de tipo circular y los cálculos son relativamente sencillos de efectuar. Para suelos cohesivos friccionantes, como es el caso de terraplenes construidos con mezclas de arcillas y arenas, se sugiere utilizar el método de las dovelas cuyas características pueden consultarse más detalladamente en el libro "Mecánica de Suelos" de Juárez 1997.

Cabe señalar que los métodos que evalúan la probabilidad de falla catastrófica y de daños en la estructura, por medio de sus esfuerzos y deformaciones son únicamente dos: el método de elementos finitos y el método de modelos físicos; ambos basados en la teoría de similitud.

El método de elementos finitos, está basado en el análisis básico de estructuras tradicionales. Su principal objetivo consiste en descomponer a la estructura en una serie de elementos pequeños (tan pequeños como minucioso se requiera el análisis), ligados por sus vértices o puntos nodales, de los cuales se desean conocer sus desplazamientos y esfuerzos.

Generalmente, estos elementos son de forma triangular y se encuentran sometidos a fuerzas actuantes en los nodos, que son los puntos de aplicación de las cargas. Las cargas son obtenidas por medio de un proceso de trabajo virtual asociado a la forma del elemento considerado.

La unión de cada uno de los elementos analizados se realiza utilizando un método de análisis estructural, como puede ser el método de los desplazamientos o el método de rigideces, en él se

supone al elemento como una estructura elástica, continua, que es representada por un ensamble de elementos finitos.

Este método es únicamente aplicable cuando se cuenta con computadora, debido a la gran cantidad de cálculos que se requieren para su análisis.

El método concluye al momento de cumplir con las condiciones de equilibrio para todos los nodos del sistema, sus resultados son de gran confiabilidad y aproximación al comportamiento real de la estructura.

5.1 SOFTWARE PARA ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES SLOPE/W

GeoSlope es una empresa que ha desarrollado un paquete llamado GeoStudio, este paquete incluye los siguientes programas

- SLOPE/W para el análisis de la estabilidad de taludes
- SEEP/W para calculo de redes de flujo y filtraciones
- SIGMA/W para calculo de tensiones y deformaciones de suelos sometidos a cargas
- QUAKE/W comportamiento de las estructuras ante sismos
- TEMP/W para analizar el efecto del calor en suelos
- CTRAN/W analiza la difusión de contaminantes en suelos
- VADOSE se utiliza para la modelación de acuíferos

Dentro de los programas anteriores el utilizado para conocer estabildades de talud es SLOPE/W con el que es posible calcular el factor de seguridad necesario para garantizar la estabilidad de taludes naturales o artificiales. Este Software permite analizar el talud bajo diferentes condiciones, características del suelo, ángulos de reposo, para diferentes tirantes, etcétera; el programa SEEP/W permite analizar el comportamiento del agua en el terraplén y su cimentación.

En nuestro estudio, nos interesan las condiciones en las que trabaja y falla la estructura, así como las trayectorias que recorre el flujo en el interior del cuerpo del bordo, la ventaja que representa este programa es que es posible analizar los tipos de fallas para diferentes tirantes y diferentes configuraciones y características del material. Una desventaja del programa, en cuanto a análisis fluvial; es que los análisis geotécnicos utilizados para calcular el factor de seguridad consideran que los tirantes de agua se presentan en condiciones estáticas por lo que el programa no considera el efecto de la velocidad del flujo y la dinámica del arrastre del material.

5.2 MÉTODOS DE ANÁLISIS DE SLOPE/W

El programa SLOPE/W permite realizar 12 tipos diferentes de análisis, con diferentes criterios.

1. Morgestern-Price
2. Spencer
3. Método General de Equilibrio Límite (GLE, General Limit Equilibrium Method)
4. Cuerpo de Ingenieros #1
5. Cuerpo de Ingenieros #2
6. Lowe-Karafiath

7. Jambú Generalizado
8. Sarma (Para taludes de 90°)
9. Método de Bishop ordinario y Jambú
10. Sigma/W Stess (Correspondiente al método de elementos finitos con el que fue diseñado el programa)
11. Quake/W Stress (Método de elementos finitos utilizado para calcular los efectos del sismo)
12. Quake/W Deformación de Newmark (Análisis sísmico basado en los estudios de Newmark)

De los métodos mencionados anteriormente los más comunes en México para este tipo de análisis son el método de Jambú y Bishop; el Morgenstern-Price es menos común, sin embargo también representa una buena opción para llevar a cabo los análisis. A continuación se mencionarán las características de los mismos.

5.2.1 MÉTODO DE MORGENSTERN-PRICE

Este método parte del análisis realizado por Spencer en el cual la superficie de falla no se asemeja a una superficie circular, supone simplemente una trayectoria curva. Su análisis se hace también dividiendo esta sección en dovelas, como se muestra en la figura 5.2.

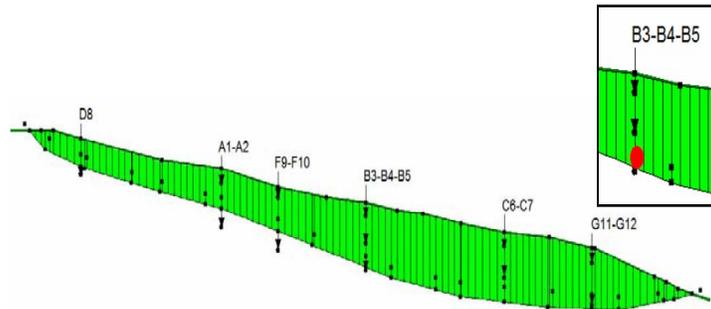


Figura 5.2. Sección de deslizamiento no circular dividido en dovelas (UPS, 2002-2004).

En cada dovela se analizan las fuerzas actuantes como puede observarse en la figura siguiente (ver figura 5.3).

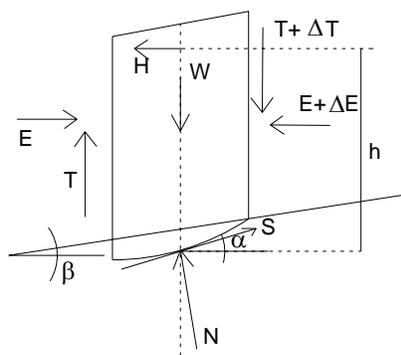


Figura 5.3 Análisis de fuerzas para el método de Spencer, (UIS, 2001).

De acuerdo con la figura 5.3 se tiene para un equilibrio de momentos lo siguiente

$$\sum \left[\left(E + \frac{1}{2} \Delta E \right) \tan \alpha - \left(T + \frac{1}{2} \Delta T \right) \right] * a + \sum H * h = 0$$

El factor de seguridad que debe cumplir es

$$F = \frac{\sum [(W + \Delta T - U * a + V) \tan \varphi + c * a] * m}{\sum (W + V + \Delta T) \tan \alpha + R_H}$$

$$m = \frac{1}{\cos^2 \alpha} \left(\frac{\gamma_R}{\gamma_R + \tan \alpha * \tan \varphi} \right)$$

c cohesión

φ ángulo de fricción interna

a ancho de cada dovela

α pendiente media del fondo de la dovela

W peso de la dovela

T tensión entre las caras verticales de las dovelas

ΔT desequilibrio de las fuerzas tangenciales entre ambas caras verticales de la dovela

R_H resultante de las fuerzas horizontales actuando por el talud

V- Resultante vertical de todas las acciones en la dovela.

Estas ecuaciones se resuelven con base en iteraciones proponiendo valores de ΔT . Spencer supone un ángulo delta δ , con un valor constante en función de T y E

$$\tan \delta = \frac{T}{E}$$

Esta suposición solo se cumple si la integral de línea de un vector \bar{R} que pasa por la línea de deslizamiento es igual al momento de las fuerzas horizontales aplicadas a la dovela.

$$\oint R \text{ sen } (\delta - \alpha) dl = \sum Hh$$

Siendo R la resultante de E y T

$$R = \sqrt{E^2 + T^2}$$

En algunas ocasiones el ángulo δ llega a ser muy alto, lo que puede ser debido a que las fuerzas aplicadas en horizontalmente en sentido desfavorable sean demasiado altas, si el ángulo de fricción interna del material es muy alto, los valores elevados de δ pueden sobreestimar la resistencia al pie de la línea de rotura, lo que hace vulnerable al método de Spencer, sobre todo en las dovelas en las que el valor de α es negativo.

Para minimizar este factor Morgenstern-Price propone lo siguiente:

$$\tan \delta = \lambda * f(x)$$

donde

λ es una constante que cumple garantiza que se cumplan las condiciones de equilibrio

x abscisa de acuerdo a un eje horizontal de referencia

f(x) es una función a especificar por el usuario, en el método de Spencer f(x)=1.

El valor de λ se debe determinar con base en la ecuación que se muestra a continuación

$$\lambda = \frac{\sum Hh + \phi E \tan \alpha dx}{\phi f(x) * E dx}$$

Al resolver las integrales de línea se pueden tener problemas de convergencia si se tienen valores negativos para $f(x)$ lo que anula el denominador de esta ecuación. Una alternativa consiste en no utilizar superficies de rotura con valores demasiado pequeños (fuertes valores negativos), esto ayuda a resolver el problema sin embargo limita las pendientes de salida de las líneas de rotura.

5.2.2 MÉTODO DE JAMBU

Si se considera un talud homogéneo, para el cual las fallas ocurren al pie del talud, su factor de seguridad asociado a los círculos de falla queda representado de la forma siguiente:

$$F_s = \frac{N_e c}{\gamma_m H}$$

H altura del talud

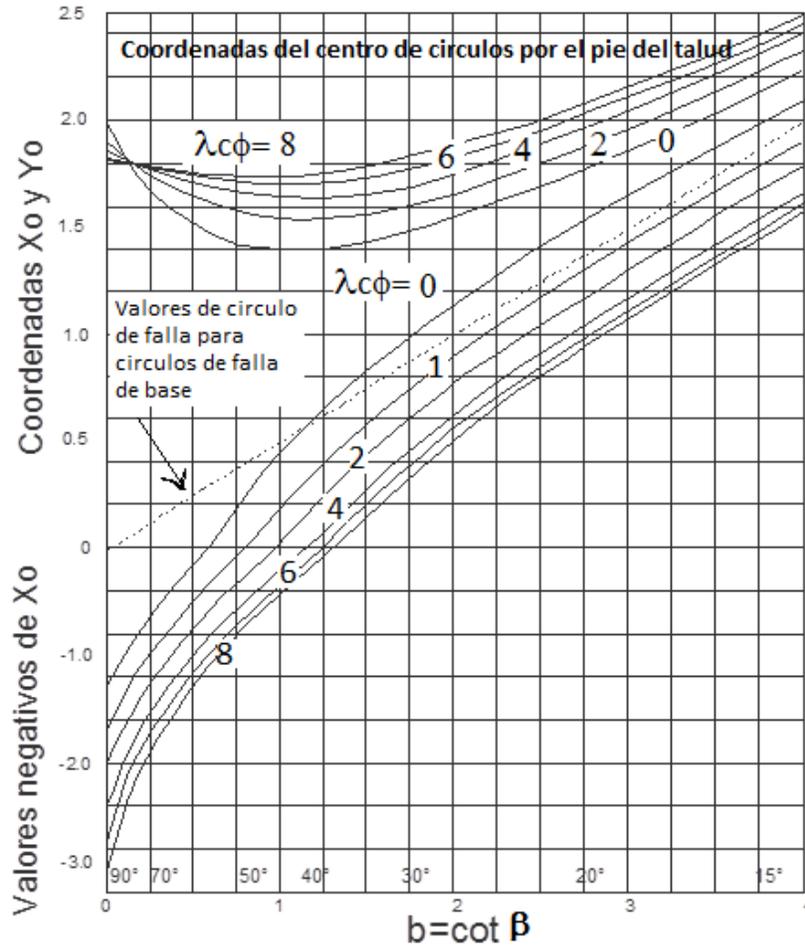
c cohesión

γ_m peso específico del material (suelo)

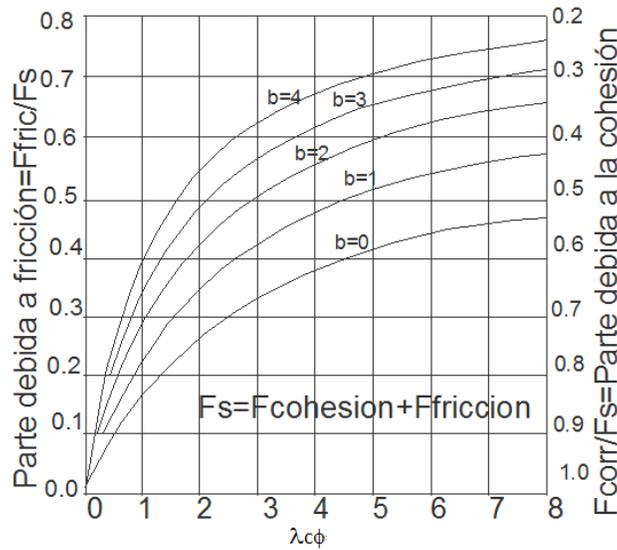
N_e número de estabilidad que puede obtenerse de la figura 4.6.2 a, a través del parámetro

$$\lambda_{c\phi} = \frac{\gamma H}{c} \tan \phi$$

Cuyo valor puede leerse de la figura 5.3 b. La figura 5.3 permite resolver el problema de una forma práctica, sin embargo, el problema puede resolverse a través de iteraciones sucesivas considerando además las fuerzas del estado tensorial de cada una de las dovelas, un análisis así resulta más completo y confiable, sin embargo requiere de la ayuda de herramientas computacionales para su desarrollo.



a. *Coordenadas de los centros de círculos críticos por el pie de talud*



b. *Contribución de la fricción y la cohesión al factor de seguridad*

Figura 5.3 Tablas para método de Jambu, (Juárez, 1979).

5.2.3 MÉTODO DE BISHOP

El método de Bishop, supone una superficie deslizante circular dividida en Dovelas verticales, para las cuales considera las fuerzas de tensión, sin considerar la dirección ni sentido de estas.

Para cada dovela se dibujan las fuerzas actuantes, a partir de estas se realiza el análisis de estabilidad para cumplir las condiciones de equilibrio estático. Para este análisis las fuerzas actuantes son expresadas en sus componentes vertical y horizontal (ver figura 5.4).

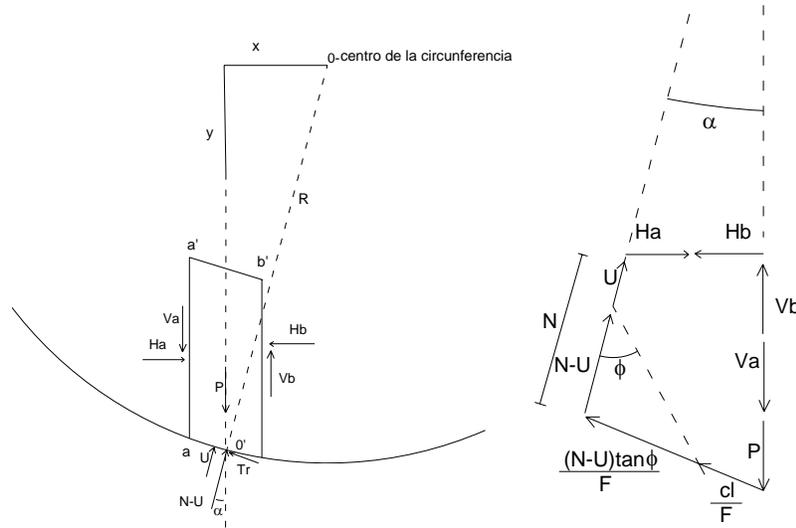


Figura 5.4 Fuerzas actuantes en las dovelas para el Método de Bishop, (UIS, 2001).

De esta manera, Bishop propone que para una dovela de longitud l , la fuerza tangencial se expresa de la siguiente manera:

$$\tau_r = \frac{cl}{F} + \frac{(N - U) \tan \phi}{F}$$

donde

- F coeficiente de seguridad
- l longitud de la dovela en la zona de rotura
- τ_r fuerza tangencial resistente en la base deslizante
- U presión de poro
- N componente normal del peso de la dovela
- ϕ ángulo de fricción interna

Considerando el eje X y el eje 0-0' se pueden considerar momentos respecto al centro de la circunferencia, por lo que las fuerzas normales se anulan, de la misma forma que sucede con las fuerzas H_a , H_b , V_a , V_b . De esta manera las ecuaciones de equilibrio quedan expresadas

$$\sum N = \sum (P + Va - Vb) \cos \alpha - \sum (Ha - Hb) \operatorname{sen} \alpha$$

$$\sum (P + Va - Vb) = \sum \left[N \cos \alpha + \frac{(n - U) \tan \phi}{F} \operatorname{sen} \alpha + \frac{cl}{F} \operatorname{sen} \alpha \right]$$

$$\sum (P * x) = \sum (P * R \operatorname{sen} \alpha) = \frac{R}{F} \sum [cl + (N - U) \tan \varphi]$$

Y en una sola ecuación

$$F = \frac{1}{\sum P \operatorname{sen} \alpha} \sum \frac{\left(\frac{P + Va + Vb}{\cos \alpha} - U\right) \tan \varphi + cl}{1 + \frac{\tan \alpha \tan \varphi}{F}}$$

Dado que las únicas incógnitas son Va-Vb y F; sabiendo que $\sum (Va-Vb) = 0$ y que $\sum (Ha-Hb) = 0$, resulta

$$\sum \frac{(P + Va + Vb) \left(\frac{\tan \varphi}{F} - \tan \alpha\right) + \frac{cl - U \tan \varphi}{F \cos \alpha}}{1 + \frac{\tan \alpha \tan \varphi}{F}}$$

Para simplificar aun más la expresión considerando que el termino $\sum \frac{(Va-Vb) \tan \varphi}{\cos \alpha} = 0$ que implicaría que los ángulos φ y α fueran iguales entre si en todas las dovelas y diferentes de 90° se tiene

$$F = \frac{1}{\sum P \operatorname{sen} \alpha} \sum \frac{\left(\frac{P}{\cos \alpha} - U\right) \tan \varphi + cl}{1 + \frac{\tan \alpha \tan \varphi}{F}}$$

De la ecuación anterior se procede a hacer iteraciones hasta encontrar el valor de F, se puede comenzar el análisis con el método sueco para tener una idea de los valores que puede tomar F.

5.3 USO DEL PROGRAMA SLOPE/W

Al abrir el paquete GeoStudio aparecen las opciones de buscar, en donde se puede encontrar ayuda sobre el programa, la opción de abrir un proyecto o la de crear uno nuevo, al seleccionar un proyecto nuevo aparece un menú inicial con los análisis que lo componen, para el cálculo de estabilidad de taludes se elige SLOPE/W acto seguido aparece una ventana en donde se piden las características del análisis que se desea realizar, nombre y descripción. Las características pueden proporcionarse en este momento o colocarlas más adelante como se verá posteriormente.

La ventana mencionada está dividida en dos secciones, en el lado izquierdo se puede ver el proyecto con el icono , abajo se observa el tipo de análisis que se está realizando (SLOPE/W); en la pestaña de Add puede agregarse un nuevo análisis para el mismo proyecto de los que aparecieron en el menú inicial por lo que puede realizarse un análisis de estabilidad de un análisis previo.

En la figura 5.5 se observa la ventana donde es posible asignar el nombre del análisis una descripción y elegir el tipo de análisis que deseemos efectuar (Morgenstern-Price, Jambu, Bihop, etcétera) así como las características de éste.

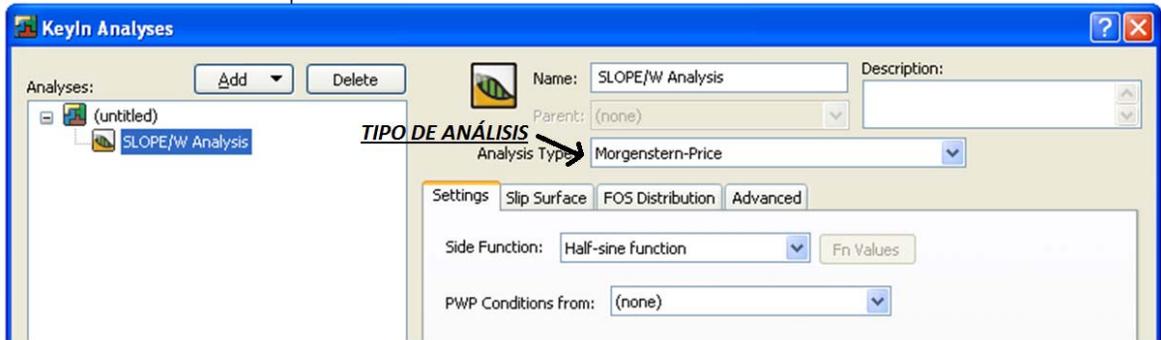


Figura 5.5 Ventana de características del análisis para estabilidad de talud de Geostudio.

Una vez asignada la información anterior, aparece el área de trabajo, como se muestra en la siguiente imagen (ver figura 5.6). Se dispone de una hoja en blanco con una red de puntos equidistantes, el espaciamiento de estos se asigna en el menú set -> grid, las dimensiones de la hoja y el espaciado de la red pueden definirse en el menú set-> units and scale.

Por defecto aparecen en la parte superior las barras de tareas con los iconos de las herramientas que pueden utilizarse en el programa, también aparece una barra vertical del lado derecho que ayuda a visualizar nombres, colores, mallado entre otras características del dibujo.

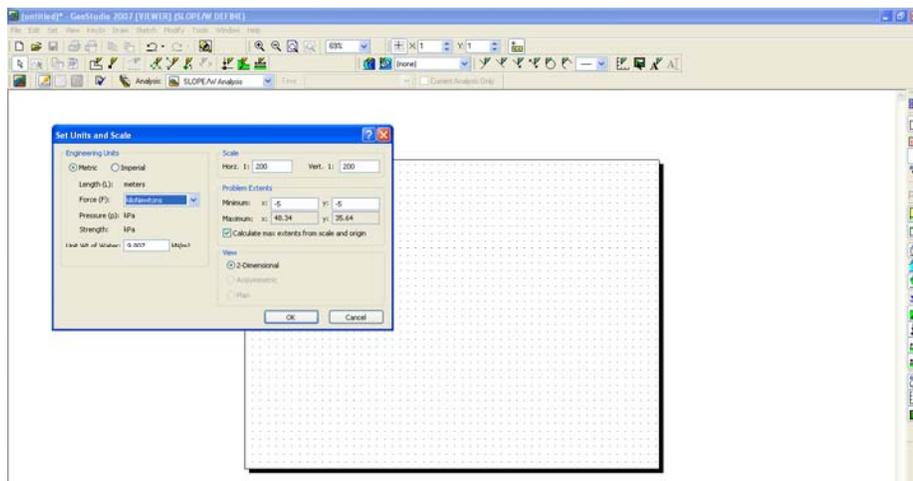


Figura 5.6. Área de trabajo y ventana de selección de unidades y escala en SLOPE/W de Geostudio.

En la hoja en blanco se puede dibujar directamente la geometría del bordo o bien exportarla de un archivo generado previamente en AutoCad y guardado en formato dxf. (file -> import regions).

Las herramientas de dibujo se encuentran en el menú Draw. El dibujo sobre el que se trabaje debe realizarse con puntos auxiliares de tal manera que posteriormente éstos permitan generar regiones. Las regiones pueden seleccionarse y modificarse en el menú KeyIn -> Regions.(Ver figura 5.7). Es importante que las regiones colindantes estén compuestas por los mismos puntos para que el programa no marque ningún error.

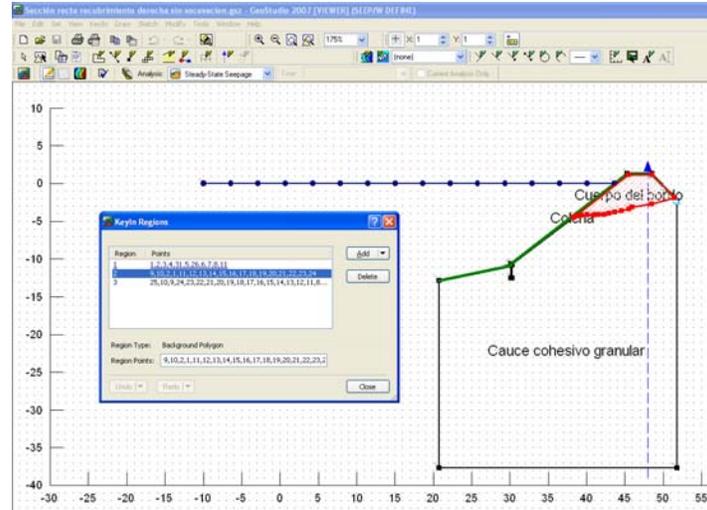


Figura 5.7. Revisión de regiones en Geostudio.

Una vez definidas las regiones, deben generarse los tipos y características de los materiales.

En la ventana KeyIn -> Materials pueden agregarse los materiales, asignarles color y propiedades.

Posteriormente es necesario indicar la línea superior de flujo, lo cual puede realizarse al colocar una línea auxiliar draw -> pore wáter pressure -> add, con lo cual se dibuja tanto la línea piezométrica como el nivel de agua en el bordo. Otra manera de ubicar estas líneas consiste en generar primero un proyecto en SEEP/W y crear a partir de éste el análisis de talud. Dentro de las propiedades del material en un archivo de SEEP/W se debe especificar si el material trabajará solamente saturado, sin saturar o en ambas condiciones. Para esta última condición debe asignar una función de conductividad hidráulica que depende también del tipo de material que se tenga, para el caso de que trabaje solo saturado se especifica el valor de saturación.

La función de conductividad puede ser capturada directamente como se muestra en la figura 5.8 con base en los valores obtenidos de estudios de laboratorio.

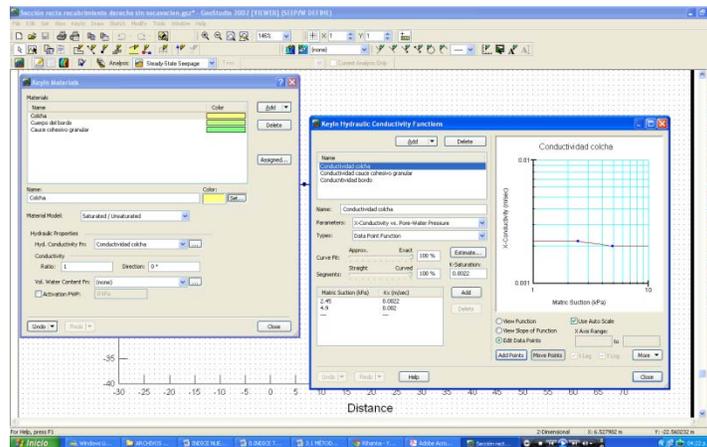


Figura 5.8. Características de los materiales y funciones de conductividad hidráulica en SEEP/W de Geostudio.

Una vez generados todos los materiales con sus respectivas características, éstos se asignan a cada región. Draw -> Materials. Conociendo la geometría, los materiales y sus características, se procede a crear las condiciones de frontera. Draw -> Boundary Conditions (ver figura 5.9).

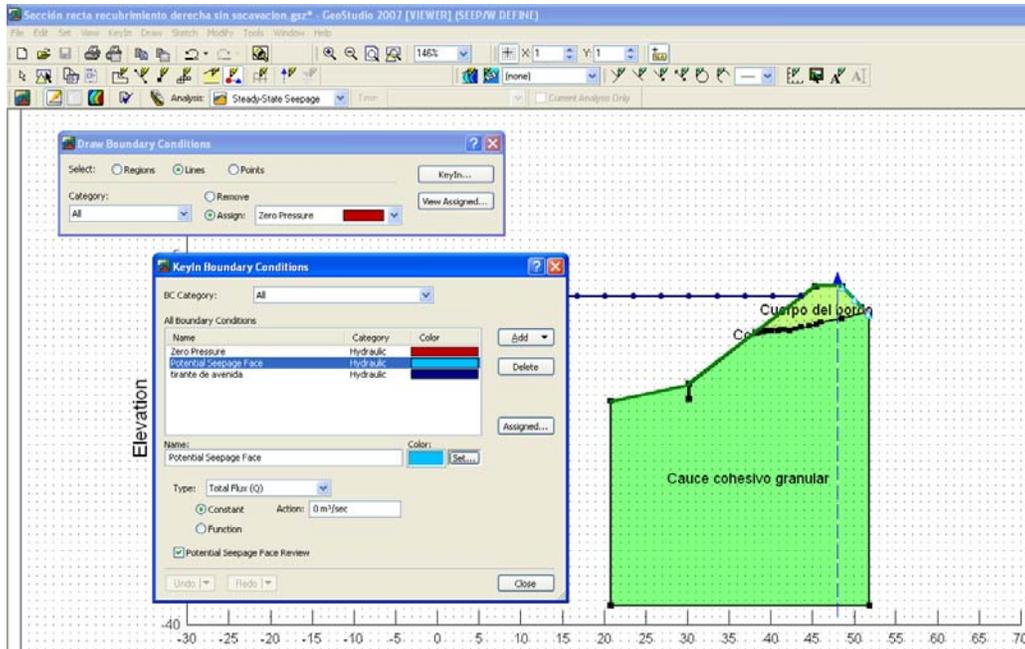


Figura 5.9. Condiciones de frontera en SEEP/W de Geostudio.

Para las condiciones de frontera deben definirse las siguientes características del proyecto:

- Condición de presión cero (En nuestro caso en el talón del bordo)
- Sección de posibles filtraciones (Sección en la que se espera que haya filtraciones)
- Posición del tirante de agua. Para esto se debe colocar la posición en Action que esta referenciado a los ejes auxiliares que pueden colocarse y modificarse en Set -> Axes y una línea auxiliar para referenciar esta posición así como la trayectoria interna del flujo dentro del elemento.

Regresando al análisis de estabilidad de talud en SLOPE/W y ya definidas las condiciones de flujo y características de los materiales se procede a definir la superficie de deslizamiento Draw -> Slip Surface -> enter and exit. Se dibuja una región de entrada y otra de salida donde se desea conocer las condiciones de deslizamiento.

Posteriormente se calcula la superficie de deslizamiento pulsando el botón de  Solve analyses, con lo que se abrirá una ventana (ver figura 5.10) para guardar el proyecto y otra para seleccionar el análisis que se desea correr.

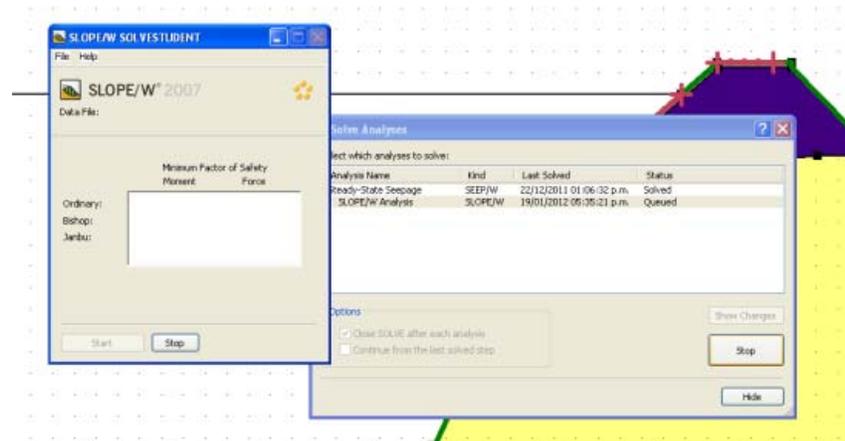


Figura 5.10 Obtención de resultados en SLOPE/W de Geostudio.

5.3.1 FACTORES DE SEGURIDAD

Al correr el análisis se genera una nueva ventana que comienza a hacer iteraciones para calcular el factor de seguridad de los métodos de análisis elegidos. Una vez encontrado el factor de seguridad mínimo el análisis concluye y pueden observarse diferentes superficies de deslizamiento como puede verse en la figura 5.11. Sus factores de seguridad se obtienen del menú draw-> slip surfaces.

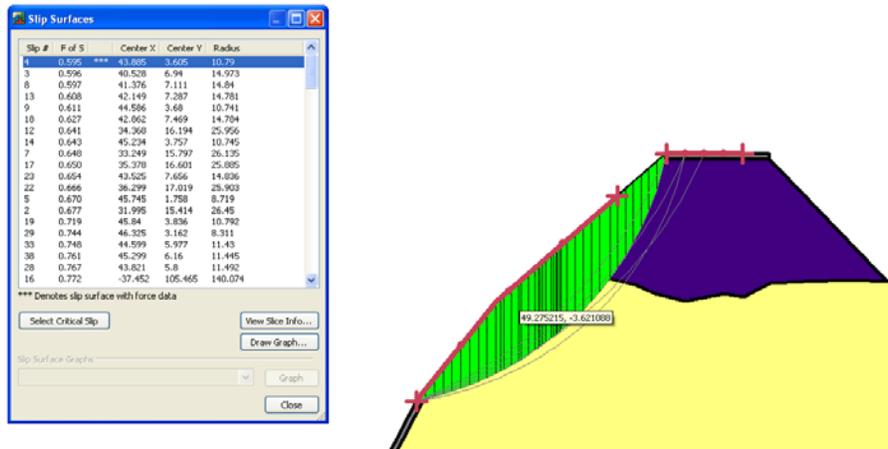


Figura 5.11 Superficies de deslizamiento generadas en SLOPE/W de Geostudio.

5.3.2 CIRCULOS DE FALLA

Para observar un número determinado de líneas de falla se utiliza el menú view-> preferences y en la esquina superior derecha de la ventana pueden modificarse el color, el número de superficies que se desee observar, el espesor de la línea entre otras características.

Otro método para obtener las superficies de deslizamiento consiste en lo siguiente

Teniendo ya asignados los materiales al borde, en el menú KeyIn -> slip surface se selecciona la opción grid and radius -> optimice critical slip surface location. Posteriormente en el área de trabajo se selecciona draw -> slip surface -> radius como se muestra en la figura 5.12, después de seleccionar esta opción se deben dibujar 4 puntos dentro de los cuales se quiere conocer los

deslizamientos posterior a esto selecciona en draw -> slip surface -> grid y se dibuja para la malla un cuadro en donde se puede esperar que esté el centro del radio de curvatura del deslizamiento, una vez dibujado aparece una ventana dentro de la cual se puede asignar el numero de incrementos con los que se desea calcular la falla. Por último se resuelve el análisis.

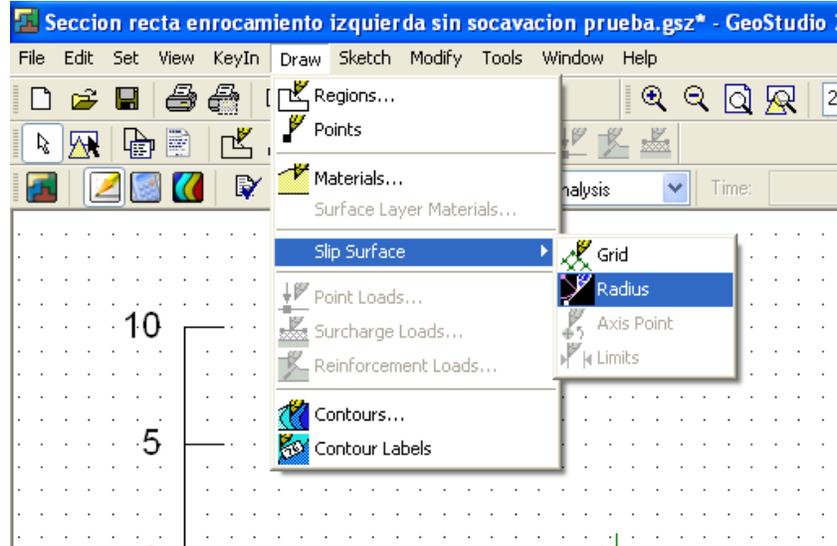


Figura 5.12 Análisis de estabilidad al seleccionar la opción de entrada y salida del círculo e falla.

Este análisis proporciona la superficie de falla para el mínimo factor de seguridad y los centros del círculo de falla referenciados a su Factor de Seguridad.

Para cada superficie de falla es posible conocer las fuerzas actuantes en cada una de sus dovelas en view -> slice information y posteriormente seleccionando la dovela de interés. Las características de la superficie de deslizamiento pueden encontrarse en view -> slide mass como puede verse en la figura siguiente (ver figura 5.13).

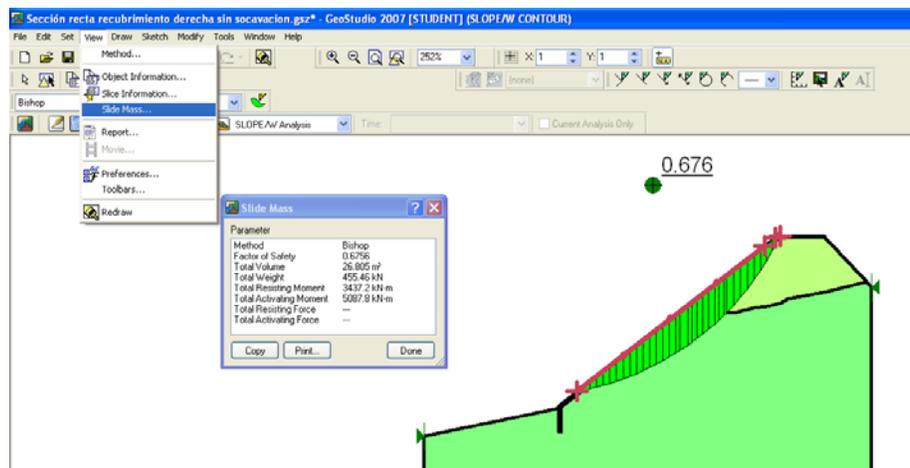


Figura 5.13. Resultados del deslizamiento más desfavorable del análisis en SLOPE/W.

6. ANÁLISIS DEL FLUJO INTERNO

El análisis del flujo ante un medio poroso es estudiado en base a la ley de Darcy que establece una relación lineal entre el gradiente hidráulico y la velocidad de descarga del flujo laminar a través de un medio poroso, otra ecuación que usada en estos análisis es la ecuación de continuidad, la cual para un régimen establecido debe suponer que el suelo se encuentra completamente saturado, partículas de agua y suelo son incompresibles en sí mismas y que el flujo no afecta la estructura del suelo.

Con base en estas dos ecuaciones se puede realizar el análisis del fluido bajo diferentes condiciones como puede ser, el flujo de agua en una presa de concreto o como en nuestro caso de estudio flujo de agua en un bordo.

La ecuación fundamental del flujo de agua en suelo es la ecuación siguiente, también conocida como ecuación de Laplace.

$$\nabla^2 h = \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} = 0$$

La solución matemática de la ecuación de Laplace son 2 familias de curvas; $\psi = cte$ y $\phi = cte$ ortogonales entre si llamadas líneas de flujo y líneas equipotenciales respectivamente conjunto de estas líneas se le llama red de flujo (ver figura 6.1). Si se conoce la red de flujo puede conocerse el gasto de filtración, las presiones hidrodinámicas y el gradiente hidráulico.

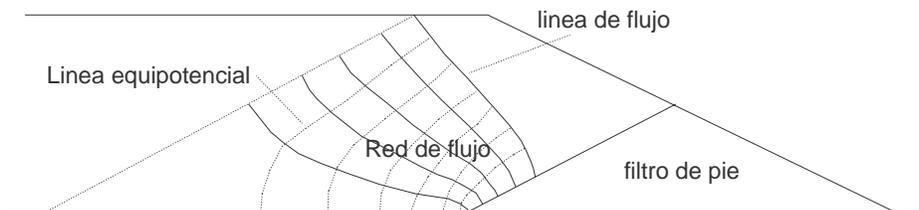


Figura 6.1. Red de flujo en un terraplén, (Ingeniería civil, 2010).

6.1 RED DE FLUJO

Para comenzar con los análisis posteriores es necesario visualizar las condiciones y características del flujo. El primer paso consiste en identificar las zonas por donde se infiltra el agua y las zonas impermeables para definir las fronteras por medio de una línea, una vez identificadas estas fronteras deben analizarse las cargas de presión, es decir se identifica si las cargas de presión son variables (líneas equipotenciales) o constantes a lo largo de las líneas de frontera (líneas de flujo).

Para las fronteras impermeables se considera que las líneas de flujo deben seguir la misma trayectoria, es decir no pueden atravesar la frontera, sólo rodearla (ver figura 6.2). Las líneas que se encuentran entre una frontera impermeable y otra permeable se consideran líneas de flujo.

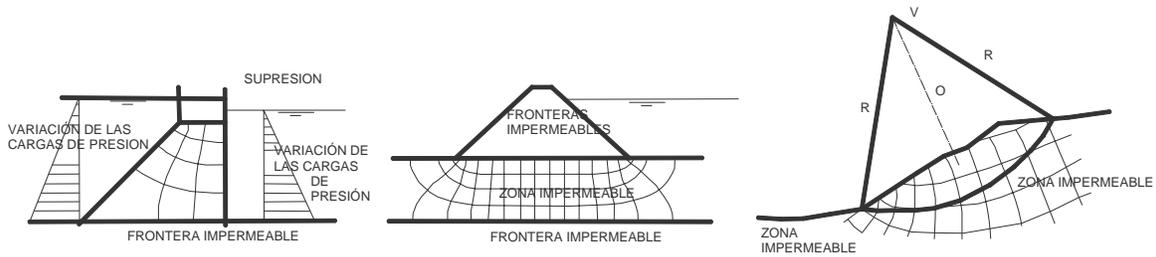


Figura 6.2. Líneas de flujo bajo diferentes fronteras impermeables, (Ingeniería civil, 2010).

Existen también fronteras que se encuentran a presión atmosférica, en donde todos los puntos se encuentran a la misma carga de presión, se tendrá que para dos puntos de la superficie atmosférica se experimenta una caída de presiones Δh correspondiente a la distancia medida verticalmente entre dos líneas equipotenciales y esta caída se ve reflejada como una pérdida de posición como se observa en la figura 6.3.

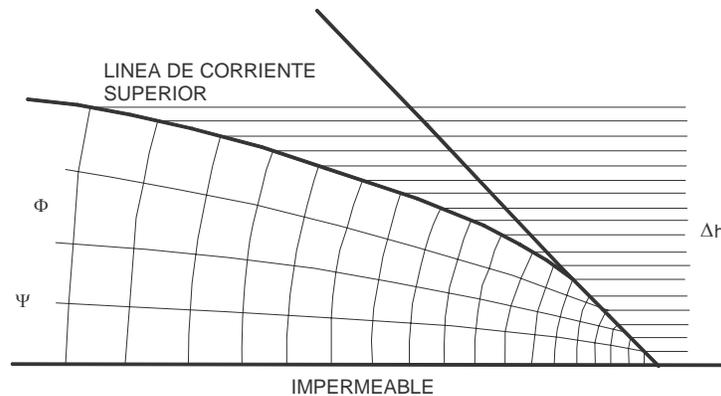


Figura 6.3. Líneas de flujo en la salida de un terraplén, (Ingeniería civil, 2010)

Lo anterior indica que entre cada línea equipotencial que corta la superficie libre existe la misma pérdida de carga y que en los puntos en que dichas líneas equipotenciales cortan a la superficie libre existe la misma diferencia de posiciones o caída de altura.

6.2 GASTO DE FILTRADO

Para determinar el gasto de infiltración de flujo a través de un suelo, se considera un cuadro formado por dos líneas de flujo y dos líneas equipotenciales como se muestra en la figura 6.4.

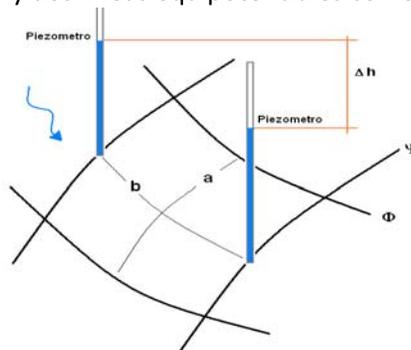


Figura 6.4. Cargas piezométricas en un cuadro de la red de flujo.

El gasto que circula a través de la sección calculado con la ley de Darcy es:

$$\Delta q = ka \frac{\Delta h}{b} \quad \dots (6.1)$$

Si el gasto total es

$$\Delta q = \frac{q}{n_f} \quad \dots (6.2)$$

Y la pérdida de carga total es

$$\Delta h = \frac{h}{n_e} \quad \dots (6.3)$$

donde

a área media del rectángulo curvilíneo normal al flujo

b distancia media recorrida por el agua

Δh caída constante de potencial hidráulico entre las líneas de corriente ϕ

n_e número de caídas de potencial hidráulico que hay en la zona de flujo (número de segmentos entre las líneas equipotenciales)

n_f número total de canales que tiene la red de flujo (número de segmentos entre las líneas de flujo)

q gasto total

h pérdida de carga total

De acuerdo con la ley de Darcy y considerando las ecuaciones anteriores el gasto total será

$$q = kh \frac{n_f a}{n_e b} \quad \dots (6.4)$$

Si se supone la sección como un cuadrado en donde $a=b$ la ecuación anterior queda como

$$q = kh \frac{n_f}{n_e} \quad \dots (6.5)$$

El último término, depende solamente de la forma de la región del flujo conocido como Factor de Forma

$$F_f = \frac{n_f}{n_e} \quad \dots (6.6)$$

De tal manera que la ecuación queda finalmente como

$$q = khF_f \quad \dots (6.7)$$

Donde k es el coeficiente de permeabilidad del suelo y que puede interpretarse como el volumen de filtración del suelo a través de un área establecida. El valor de k es determinado por medio de muestras de suelo analizadas en laboratorio. En el campo el valor de k es variable por las irregularidades que se presentan, en este caso el valor de k es solo un valor representativo que se usa para conocer la capacidad del suelo para dejar pasar el agua entre sus partículas por lo que para este caso especial el coeficiente k suele llamarse coeficiente de conductividad hidráulica.

Si un suelo presenta la misma permeabilidad en cualquier dirección es isotrópico, esta condición no depende del tipo de material de la estructura puesto que pueden existir

- Suelo homogéneo e isotrópico
- Suelo homogéneo no isotrópico
- Suelo no homogéneo e isotrópico
- Suelo no homogéneo no isotrópico

En el primer caso el valor de k no cambia de un punto a otro ni en ninguna dirección, para el segundo caso la permeabilidad cambia de una dirección a otra pero la permeabilidad es la misma, en el tercer caso el valor de k es constante en un punto pero diferente de un punto a otro, en el caso de un suelo no homogéneo y no isotrópico el valor de k es diferente en todos sus puntos y variable de una dirección a otra.

En el caso de suelos estratificados o estructuras construidas en capas, el medio se considera no homogéneo y no isotrópico.

En la tabla 6.1 se muestran algunos valores del coeficiente de permeabilidad de acuerdo con diferentes clasificaciones.

Tabla 6.1. Coeficientes de permeabilidad, (Sotelo, 2009)

SUELO	k (cm/s)
Aluviones de bloques calcareos	3×10^{-4}
Arcillas provenientes de los gneiss	10^{-5} a 10^{-7}
Concretos	10^{-6} a 10^{-8}
Calcareas para construcción (Según Macmillan)	2×10^{-2} a 2×10^{-2}

PERMEABILIDAD TOLERABLE EN ROCAS	k (cm/s)
Según Ehrenberg	3×10^{-8}
Según F.A.W.G. de Berlín	1×10^{-7}
Gravas y arenas de 0.1 a 25 mm	5×10^{-2} a 2×10^{-2}
Arena uniforme (0.77mm) Según Darcy	3×10^{-4}
Arena Gruesa (0.1 a 5 mm)	1×10^{-4}
Arena media (0 a 2 mm)	2×10^{-5}
Arena fina (0 a 1 mm)	4×10^{-6}

6.3 GRADIENTE HIDRÁULICO Y PRESIÓN INTERSTICIAL

Como se mencionó en el subcapítulo 6.1 la pérdida de carga puede estimarse de la red de flujo y su valor corresponde a la carga que se encuentra entre cada línea equipotencial medida verticalmente (ver figura 6.5), estas caídas de presión pueden calcularse con la expresión siguiente

$$\Delta h = \frac{H}{n_e} \quad \dots (6.8)$$

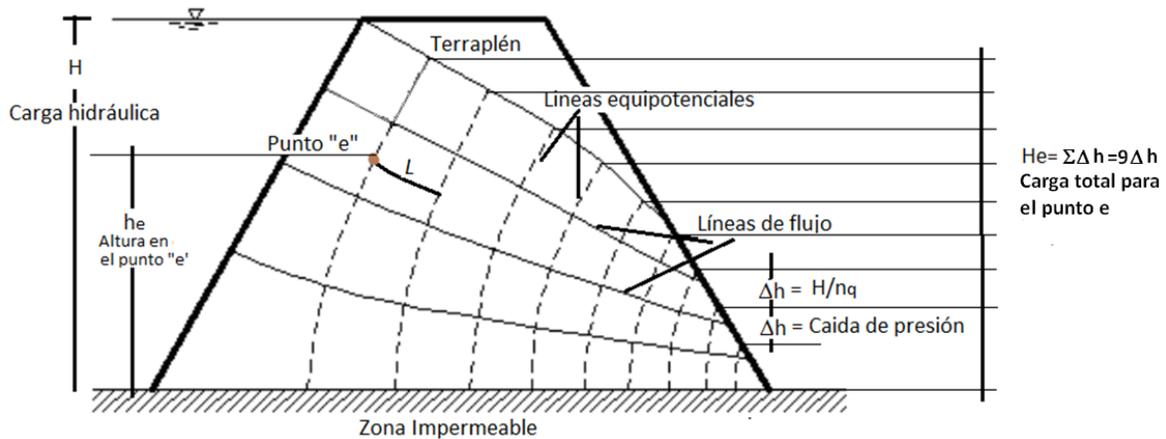
donde

H tirante de agua al que está expuesta la estructura

n_e número de segmentos entre las líneas equipotenciales elegidas para dibujar la red

n_f número de segmentos entre las líneas de flujo

Δh caída de presión o pérdida de carga



De esta manera a la salida del agua la pérdida de carga total será $\Delta h * n_f$

Finalmente si se desea conocer el gradiente hidráulico puede utilizarse la ecuación siguiente

$$i = \frac{\frac{H}{n_e}}{L} = \frac{\Delta h}{L} \quad \dots (6.9)$$

donde

L longitud del segmento de línea de flujo en análisis

i gradiente hidráulico

Si se conoce la pérdida de carga, el gradiente hidráulico para una sección será la pérdida de carga de esta sección multiplicada por la longitud de la línea de flujo de esta misma sección.

La carga total H_e en un punto de altura h_e será la suma de las pérdidas de carga ($\sum \Delta h$) hasta ese punto medidas de la base del terraplén o a partir de la zona impermeable en donde este desplantado. Conociendo esto, la presión intersticial será

$$P = (H_e - h_e) * \gamma_w \quad \dots (6.10)$$

P presión intersticial o presión de poro (ton/m^2)

H_e Carga total en el punto de interés

h_e altura del punto (m)
 γ_w peso específico del agua (1 ton/m³)

6.4 VELOCIDADES DE FILTRADO

Una vez que se conoce el gradiente hidráulico en un punto de interés, es posible calcular la velocidad del agua basta con hacer uso de la ley de Darcy.

Darcy propone la siguiente ecuación para el cálculo del gasto

$$Q = \frac{\partial V}{\partial t} = kiA \quad \dots (6.11)$$

De la ecuación de continuidad se tiene que

$$Q = vA \quad \dots (6.12)$$

donde

Q gasto (cm³/s)
 ∂V diferencial de la variación del volumen
 ∂t diferencial del tiempo
k coeficiente de permeabilidad (cm/s)
i gradiente hidráulico (adimensional)
A área transversal (m²)
v velocidad (cm/s)

Al relacionar ambas ecuaciones se obtiene

$$v = ki \quad \dots (6.13)$$

Que es la expresión correspondiente a la ley de Darcy.

6.5 SOFTWARE PARA ANÁLISIS DE FLUJO INTERNO SEEP/W

Como dibujar una red de flujo a mano puede ser muy variable, se recomienda hacer pocas líneas de flujo para que el problema pueda visualizarse más fácilmente, sin embargo mientras más densa sea la red mejores serán los resultados que se obtengan de ella. Si una red presenta muchos puntos se necesitarán muchos cálculos y una solución a mano no sería viable, es por eso que se debe recurrir a la ayuda de la computadora.

Anteriormente se mencionó que el método de elemento finito consiste en dividir el elemento de análisis en pequeños elementos definidos geoméricamente para los cuales se pueden analizar las condiciones en las zonas donde se intersecan, dado que las redes de flujo dividen el terraplén en elementos definidos, es posible aplicar a estos (Analizar en cada punto) por medio de elemento finito y conocer así las condiciones del flujo interno.

En los temas siguientes se hablará de una herramienta de GeoStudio (SEEP/W) la cual utilizando elemento finito puede calcular la red de flujo y las condiciones hidráulicas para diferentes tipos de material y condiciones de flujo.

6.5.1 USO Y CARACTERÍSTICAS DEL PROGRAMA

En la versión 2007 de este programa se pueden llevar a cabo dos tipos de análisis en las redes de flujo

- Régimen estacionario, el tiempo no interviene como variable en el proceso.
- Régimen transitorio, se tiene en cuenta la evolución del sistema con el tiempo.

El programa permite proponer la geometría del cauce o de las estructuras dibujando directamente con las herramientas del programa, pero también permite importar regiones definidas en AutoCad lo cual facilita en gran medida el trabajo.

Las características del material del cauce pueden definirse directamente conociendo previamente estas características con base en estudios de laboratorio, sin embargo el programa cuenta también con archivos precargados para diferentes modelos de comportamiento de algunos materiales que pueden ser de gran ayuda. Las propiedades del suelo que considera el paquete son

- Permeabilidad del terreno.
- Relación entre permeabilidades K_y/K_x
- Variación direccional de la permeabilidad de la componente k_x .
- Modelo de estado saturados e insaturado y saturado
- Definición de función de conductividad en suelos insaturados.

Las propiedades del terreno que son consideradas para el análisis son:

- Carga
- Gasto
- Carga de presiones
- Gasto unitario

6.5.2 GENERACIÓN DE REDES Y GRÁFICAS DE RESULTADOS

Como se vio en el subtema anterior, el programa abre con un menú inicial en donde se pregunta el tipo de análisis que se desea realizar, en este caso como se quiere conocer la trayectoria del flujo en el bordo se elige SEEP/W.

Para realizar este análisis se comienza de manera semejante al visto en SLOPE/W, una vez seleccionado new (crear un nuevo proyecto) se elige la opción SEEP/W con lo que aparecerá el área de trabajo inicial y una ventana para proporcionar las características deseadas. Del lado derecho de la pantalla en Analysis Type se puede seleccionar un análisis de tipo transitorio o estacionario, el programa incluye un análisis que considera transferencia de temperaturas y otro que involucra el efecto de la densidad. Para un análisis de bordos solo interesan las dos primeras condiciones de las cuales se elige un análisis estacionario (ver figura 6.6).

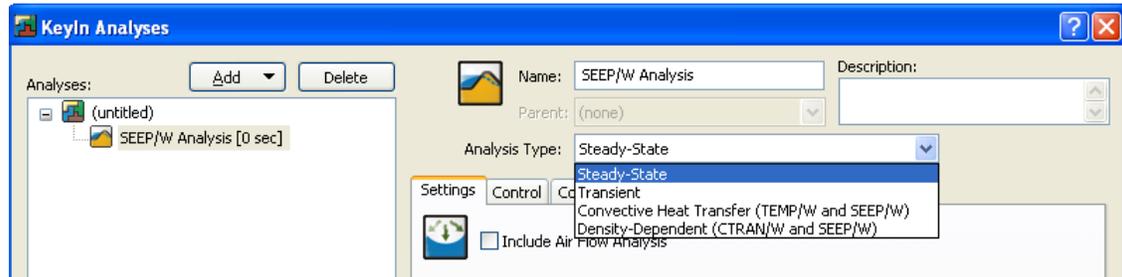


Figura 6.6. Selección del tipo de análisis en SEEP/W

Una vez elegido el tipo de análisis, asignado el nombre y descripción, se procede a dibujar la geometría de la sección, para ello se pueden usar polilíneas y puntos auxiliares. Una vez dibujado el elemento, se crean regiones para colocar los materiales en Draw -> Region. Una vez creadas las regiones se procede a asignarles el tipo de material en el menú Draw -> Materials -> KeyIn -> add. Posteriormente se debe seleccionar si el material trabaja o no saturado en “Material Model” y proporcionar las características correspondientes según sea el caso por ejemplo, si se selecciona Saturated/unsaturated se debe proporcionar una función de conductividad hidráulica Hydraulic Conductivity Fn -> add , en la opción Types, se puede elegir como se proporcionará la función si se utilizarán que vienen precargadas en Geostudio o si se proporcionarán los datos de las funciones de conductividad. Esta función se coloca de acuerdo con cada uno de sus materiales.

Posteriormente se cierra la ventana y los materiales se asignan a cada región con el cursor. Una vez colocadas las características del material y las funciones de conductividad hidráulica a cada región se coloca el nivel del agua dibujando primero una polilínea auxiliar sketch -> polilines, una vez dibujada en el menú draw -> boundary condition -> keyIn se selecciona la opción zero pressure y en add se clona esta condición, se nombra de preferencia con el tirante de análisis; posteriormente se indica la posición del tirante en la opción action. Cabe señalar que este valor corresponde a la ubicación del tirante de acuerdo con el sistema de referencia de la hoja de trabajo, es decir se puede tener un tirante de 3m cuya acción sea en la línea de 11 metros, por esto se sugiere que la posición de cero que se elija sea conveniente para trabajar lo más fácil posible con el archivo. Los ejes pueden ser modificados y desplazados en el menú set -> axes.

Una vez creadas las condiciones de frontera del flujo, en el menú draw -> boundary condition, se selecciona la condición creada para nuestro tirante (line) y con el cursor se selecciona el talud mojado y se recorta esta línea hasta el espejo de agua dibujado anteriormente.

En el mismo menú se selecciona la condición zero pressure -> point y se coloca un punto al talón del bordo, posteriormente se selecciona la opción potential seepage face -> line para poder seleccionar el talud exterior del bordo. Estas últimas condiciones se especifican para que el programa identifique las posibles trayectorias del flujo en el elemento.

GeoStudio realiza el análisis de las redes de flujo a través de un mallado, las propiedades de este se encuentran en draw -> mesh properties y sus dimensiones pueden ser modificadas, también se pueden conservar las dimensiones que propone por defecto el programa. Realizado esto se procede a colocar las secciones de control en el menú Draw -> Flux section, se coloca el número de secciones donde se desea conocer el gasto que pasa y posteriormente se ubican con el cursor. Una vez establecidos los materiales, las condiciones de frontera del flujo y las secciones de control, se guarda el proyecto y se resuelve seleccionando el ícono  con lo que aparecerá una ventana para seleccionar nuevamente el archivo que se analizará, si no se selecciona la opción

close SOLVE after each analysis aparecerá la ventana de análisis y se mostrara el proceso de solución del mismo. Una vez cerrada esta ventana se pueden observar los resultados seleccionando el ícono , aparecerán la trayectoria del flujo con una línea azul y sus respectivas líneas equipotenciales como se muestra a continuación (ver figura 6.7).

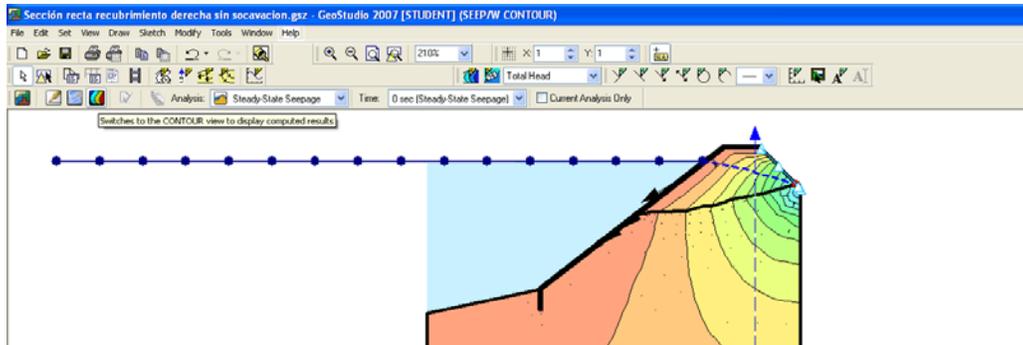


Figura 6.7. Línea superior de flujo y líneas equipotenciales obtenidas con SLEEP/W de Geostudio.

El gasto que pasa en la sección de control seleccionada puede leerse al seleccionar la opción Draw -> Flux labels y seleccionando la línea punteada con el cursor. Las trayectorias de flujo aparecen al pulsar la opción Draw -> Flux paths y colocar el cursor en el punto donde se desea conocer la trayectoria.

Es importante destacar que se puede elegir la forma en que se muestran estas condiciones en el ícono "preferences" .

Para visualizar los resultados obtenidos en algún punto en específico, se selecciona el ícono  con lo que se visualizará el mallado como se observa en la figura 6.8; posteriormente se usa el menú, view -> result information y se selecciona el nodo de interés, con esto aparecerá una ventana indicando la posición del nodo, su carga, presión de poro, carga piezométrica, gasto, velocidades, la conductividad en cada eje, entre otras cosas.

Los resultados también pueden ser expresados de en forma gráfica utilizando la opción Draw -> graph. En la ventana que aparece se selecciona la opción Add, se nombra y se pide que utilice los datos de los nodos, en las siguientes pestañas se selecciona el tipo de grafica y las variables que se graficarán, por ejemplo; la gráfica de presión de poro, con un eje que exprese la carga la presión de poro respecto a la carga total respecto al eje y (Pore Pressure ; Total head vs Y). Posteriormente debe elegirse Set locations, con lo que se cerrará la ventana y abrirá una (Draw Graph) para poder seleccionar los nodos que se graficarán, una vez seleccionados los nodos deseados, se oprime el botón Show Graph con lo que aparecerá inmediatamente la gráfica. Estas graficas cuentan con la opción de imprimirlas directamente o de copiarlas para exportar a otro archivo en el botón More ubicado en la parte inferior izquierda de la ventana del grafico.

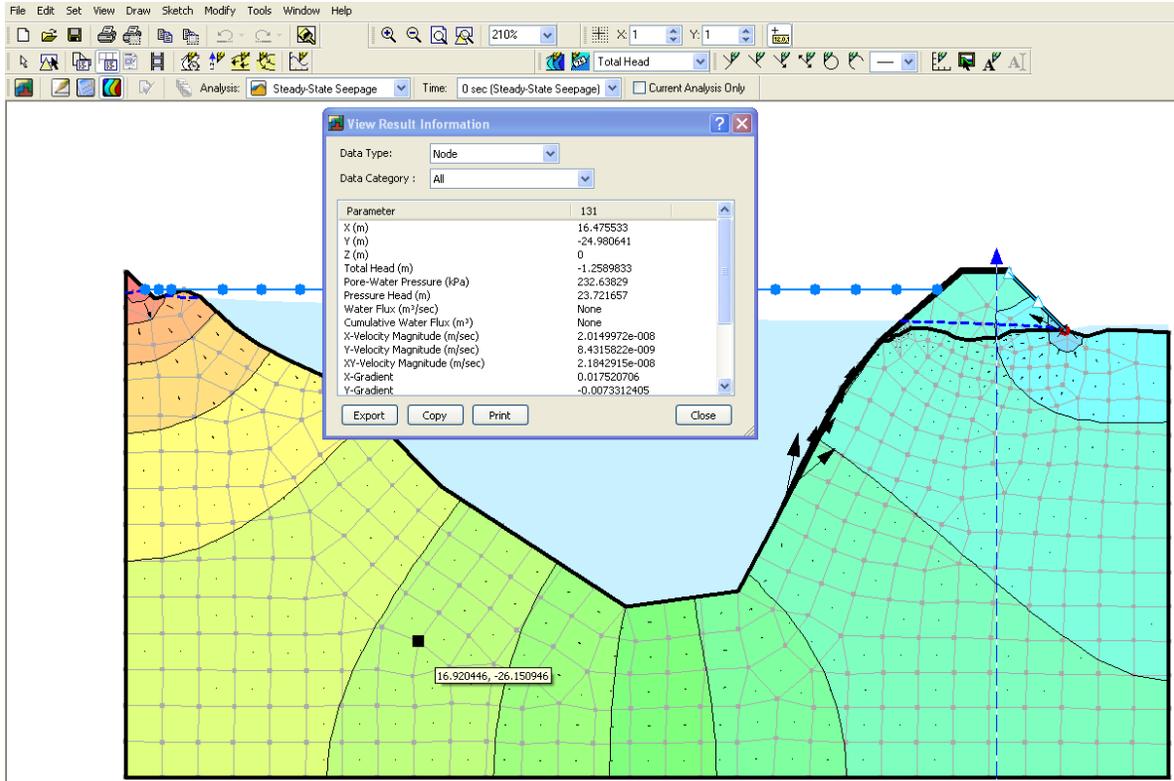


Figura 6.8 Información de resultados para un nodo de la malla de análisis con SEEP/W

De manera semejante puede crearse un archivo con los resultados obtenidos del análisis en la opción View -> Report.

Una de las ventajas con las que cuenta GeoStudio es que a partir de un análisis se puede generar otro, un ejemplo de esto es precisamente el análisis visto anteriormente con el cual conociendo la trayectoria del flujo puede analizarse la estabilidad haciendo un análisis con SLOPE/W como se muestra a continuación.

En el menú keyIn -> keyIn Analysis se selecciona el análisis realizado con SEEP/W y se elige la opción add, con lo que aparecerá el tipo de análisis que se quiere crear, ahí se selecciona SLOPE/W -> limit equilibrium (o el análisis deseado) y aparecerá un análisis nuevo abajo del análisis realizado con SEEP/W. Este análisis incluirá todas las características de flujo interno y las geometrías, posteriormente se asignaran las características de los materiales, condiciones de frontera del flujo y la zona de falla como se vio en el subtema 5.3.

7. SOCAVACIÓN EN CAUCES

En un análisis de la socavación intervienen diferentes variables entre ellas, las rugosidades, tipo de material, gastos y sus velocidades correspondiente, es importante conocer como intervienen éstas en el cálculo de la socavación y poder interpretar los resultados que se obtengan. A continuación se presenta una descripción de ellas y posteriormente las expresiones propuestas por Maza para el cálculo de la socavación.

7.1 RUGOSIDAD Y RUGOSIDAD EQUIVALENTE

El coeficiente de rugosidad de Manning es el más utilizado para cálculos hidráulicos sin embargo; su uso implica algunas limitaciones como son

- Su precisión depende de una selección cuidadosa de tablas
- Es válida para números de Reynolds grandes
- Es válida solo para rugosidades relativas medias
- La forma de la sección no se considera en los valores n conocidos
- No considera la influencia de distintas rugosidades en la misma sección y la de su distribución respecto a la del nivel del agua
- No considera la influencia de las ondas y la inestabilidad del régimen supercrítico
- No considera la influencia del transporte de sedimentos y de la forma variable de un lecho móvil.

Como puede observarse el uso del coeficiente de rugosidad se utiliza sólo para flujo estacionario en canales rugosos donde no hay cambios severos en su fondo. Para el caso opuesto se debe calcular el coeficiente C de la ecuación de Chezy.

El valor de n depende de muchos factores, como por ejemplo

- Presentar rugosidades diferentes para una sección
- Tener un cauce irregular debido al depósito o arrastre de sedimentos
- Presencia de obstrucciones como arboles, basura, puentes
- Crecimiento de vegetación
- Curvatura debida a un meandro
- El valor de n disminuye al aumentar el tirante y el caudal

Chow, propone los siguientes valores de n para canales naturales (ver tabla 7.1), los valores correspondientes a canales revestidos o excavados pueden consultarse en su libro "Hidráulica de Canales Abiertos" (Chow, 1994).

Tabla 7.1. Valores del coeficiente de rugosidad n , para cauces naturales (Chow 1994)

CORRIENTES NATURALES				
Corrientes menores (ancho superficial en nivel creciente < 30.5 m		Mínimo	Normal	Máximo
a) Corrientes de planicie				
1	Limpias, rectas, máximo nivel, sin montículos ni pozos profundos	0.025	0.030	0.033
2	Igual al anterior pero con mas piedras y maleza	0.030	0.035	0.040
3	Limpio, serpenteante, algunos pozos y bancos de arena	0.033	0.040	0.045
4	Igual al anterior, pero con algunos matorrales y piedras	0.035	0.045	0.050
5	Igual al anterior, niveles bajos, pendientes y secciones más ineficientes	0.040	0.048	0.055
6	Igual al 4 pero con mas piedras	0.045	0.050	0.060
7	Tramos lentos, con maleza y pozos profundos	0.050	0.070	0.080
8	Tramos con mucha maleza y pozos profundos o canales de crecientes con muchos árboles con matorrales bajos.	0.075	0.100	0.150
b) Corrientes montañosas, sin vegetación en el canal, bancas usualmente empinadas, arboles y matorrales a lo largo de las bancas sumergidas en niveles altos				
	Fondo: Gravas, cantos rodados y algunas rocas	0.030	0.040	0.050
2	Fondo: Cantos rodados con rocas grandes	0.040	0.050	0.070
Planicies de inundación				
a) Pastizales y matorrales				
1	Pasto corto	0.025	0.030	0.035
2	Pasto alto	0.030	0.035	0.050
b) Áreas cultivadas				
1	Sin cultivo	0.020	0.030	0.040
2	Cultivos en línea maduros	0.025	0.035	0.045
3	Campos de cultivo maduros	0.030	0.040	0.050
c) Matorrales				
1	Matorrales dispersos, mucha maleza	0.035	0.050	0.070
2	Pocos matorrales y arboles, en invierno	0.035	0.050	0.060
3	Pocos matorrales y árboles en verano	0.040	0.060	0.080
4	Matorrales medios a densos en invierno	0.045	0.070	0.110
5	Matorrales medios a densos en verano	0.070	0.100	0.160
d) Árboles				
1	Sauces densos, rectos en verano	0.110	0.150	0.200
2	Terreno limpio, con troncos sin retoños	0.030	0.040	0.050
3	igual que el anterior, pero con una gran cantidad de retoños	0.050	0.060	0.080
4	Gran cantidad de árboles, algunos troncos caídos, con poco crecimiento de matorrales, nivel de agua por debajo de las ramas	0.080	0.100	0.120
5	Igual que el anterior pero con nivel creciente por encima de las ramas,	0.100	0.120	0.160
Corrientes mayores (Ancho superficial en nivel de creciente > 30.5 m) EL valor de n es menor que el correspondiente a corrientes menores con descripción similar, debido a que las bancas ofrecen resistencia menos efectiva.		0.025		0.060
		0.035		0.100

Para canales naturales que necesiten ser estudiados es posible utilizar esta rugosidad sin embargo, en cauces que han sido alterados por la colocación de estas estructuras como es el caso de los bordos, las rugosidades son diferentes en el fondo y en las márgenes por lo que se sugiere calcular el coeficiente de rugosidad equivalente de la manera que se muestra a continuación. De acuerdo con Horton la rugosidad equivalente será

$$n_e = \left[\frac{\sum(P_i n_i^{1.5})}{P} \right]^{2/3} \quad \dots (7.1)$$

donde

- n_e Rugosidad equivalente
- n_i Rugosidad de la sección i
- P_i Perímetro mojado de la sección i
- P Perímetro total de la sección

Si se tiene una zona de meandros, el valor de n debe aumentar 0.001 por cada 20° de deflexión.

7.2 VELOCIDAD PERMISIBLE Y DE EROSIÓN

Para el análisis de la socavación en los cauces existen dos tipos de velocidades

- La velocidad real en el cauce
- La velocidad media de erosión

La primera de ellas se presenta para condiciones estables en el cauce ya sea antes de la socavación o después de ésta. De acuerdo con el principio de continuidad, la velocidad real puede expresarse como

$$V = \frac{Q}{A} \quad \dots (7.2)$$

$$Q = VA \quad \dots (7.3)$$

donde

- Q gasto
- V velocidad
- A área de la sección

Para el caso de los ríos, si se toma una franja Be de la sección transversal del río como se muestra en la figura 7.1, la variación de la velocidad media (después de la socavación) será

$$\Delta Q = V_r H_s B e \quad \dots (7.4)$$

$$V_r = \frac{\Delta Q}{H_s B e} \quad \dots (7.5)$$

Por otra parte de la ecuación de Manning

$$Q_d = \frac{A}{n} R^{2/3} S^{1/2} \quad \dots (7.6)$$

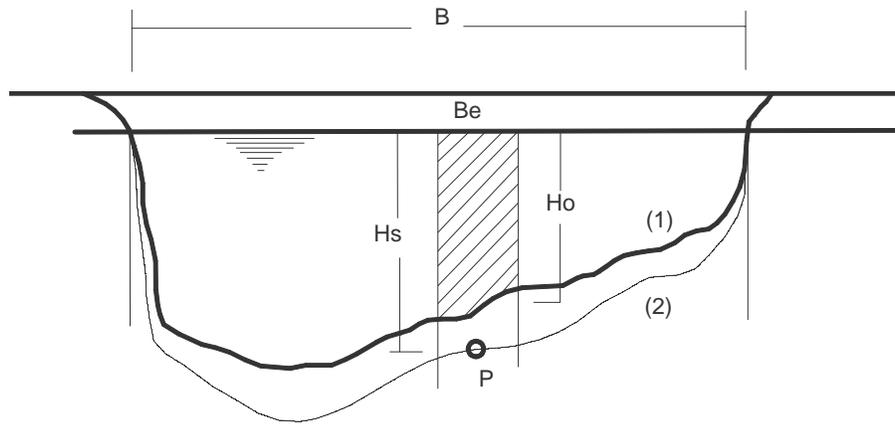


Figura 7.1. Variables para el cálculo de Vr, (Maza, 1968)

Con la expresión anterior es posible calcular el gasto de diseño, si la sección está afectada por pilas y estribos se introduce un coeficiente de contracción como lo propone Maza en su publicación "Socavación en cauces naturales". Maza también propone utilizar un coeficiente α que se encuentre en función del tirante medio del río (área hidráulica efectiva entre el ancho total del espejo de agua B)

$$\alpha = \frac{s^{\frac{1}{2}}}{n} = \frac{Q_d}{AR_h^{2/3}B} \quad \dots (7.7)$$

$$Q_d = \alpha AR^{2/3} \quad \dots (7.8)$$

Si se desea conocer un diferencial de gasto medio ΔQ en una sección de tramo Be

$$A = H_0 Be \quad \dots (7.9)$$

El radio hidráulico está definido como

$$R = \frac{A}{P_m} \quad \dots (7.10)$$

$$P_m \approx Be$$

$$R_H = \frac{H_0 Be}{Be} = H_0 \quad \dots (7.11)$$

$$\Delta Q = \alpha H_0^{5/3} Be \quad \dots (7.12)$$

De esta forma al igualar los gastos de la condición real con la condición media se tiene

$$\Delta Q = \alpha H_0^{5/3} Be = V_r H_s Be = \Delta Q \quad \dots (7.13)$$

Con lo cual la velocidad real de la corriente queda expresada de la forma siguiente

$$V_r = \frac{\alpha H_0^{5/3}}{H_s} \quad \dots (7.14)$$

Por otro lado la velocidad media de erosión es la velocidad que se tiene para que una partícula de suelo inicie su movimiento. Maza, propone la siguiente expresión para calcular la velocidad media de erosión en cauces definidos.

$$V_e = 0.60 \gamma_s^{1.18} \beta H_s^x \quad \text{para suelos cohesivos} \quad \dots (7.15)$$

$$V_e = 0.68 d_m^{0.28} \beta H_s^x \quad \text{para suelos granulares} \quad \dots (7.16)$$

$$d_m = 0.01 \sum d_i P_i \quad \dots (7.17)$$

donde

- γ_s peso volumétrico del material cohesivo seco que se encuentra a la profundidad H_s (ton/m³)
- β coeficiente de paso que depende de la frecuencia con que se repite la avenida y cuyo valor aparece en la tabla 7.2.
- H_s tirante considerado, a cuya profundidad se desea conocer el valor de v_e para arrastrar y levantar el material
- x exponente variable que está en función del peso volumétrico del material seco el cual se puede leer en la tabla 7.3.
- d_m diámetro medio de las partículas de suelo granular
- d_i diámetro medio de una fracción de la curva granulométrica de la muestra total
- P_i porcentaje del peso de la misma porción comparada con el peso total de la muestra

Tabla 7.2. Valores del coeficiente β , (Maza, 1968)

PROBABILIDAD (%), DE QUE SE PRESENTE EL GASTO DE DISEÑO	COEFICIENTE β
100	0.77
50	0.82
20	0.86
10	0.90
5	0.84
2	0.97
1	1.00
0.3	1.03
0.2	1.05
0.1	1.07

Tabla 7.3. Valores de x , $1/1+x$, para suelos cohesivos y no cohesivos, (Maza, 1968).

SUELOS COHESIVOS			SUELOS COHESIVOS			SUELOS NO COHESIVOS			SUELOS NO COHESIVOS		
Y_s	x	$1/1+x$	Y_s	x	$1/1+x$	D_m	x	$1/1+x$	D_m	x	$1/1+x$
0.80	0.52	0.66	1.20	0.39	0.72	0.05	0.43	0.70	40.00	0.30	0.77
0.83	0.51	0.66	1.24	0.38	0.72	0.15	0.74	0.70	60.00	0.29	0.78
0.86	0.5	0.67	1.28	0.37	0.73	0.50	0.41	0.71	90.00	0.28	0.78
0.88	0.49	0.67	1.34	0.36	0.74	1.00	0.40	0.72	140.00	0.27	0.79
0.90	0.48	0.67	1.40	0.35	0.74	1.50	0.39	0.72	190.00	0.26	0.79
0.93	0.47	0.68	1.46	0.34	0.75	2.50	0.38	0.73	250.00	0.25	0.80
0.96	0.46	0.68	1.85	0.33	0.75	4.00	0.37	0.74	310.00	0.24	0.81
0.98	0.45	0.69	1.58	0.32	0.76	6.00	0.36	0.74	370.00	0.23	0.81
1.00	0.44	0.69	1.64	0.31	0.76	8.00	0.35	0.75	450.00	0.22	0.83
1.04	0.43	0.70	1.71	0.3	0.77	10.00	0.34	0.75	570.00	0.21	0.83
1.08	0.42	0.70	1.80	0.29	0.78	15.00	0.33	0.75	750.00	0.20	0.83
1.12	0.41	0.71	1.89	0.28	0.78	20.00	0.32	0.76	1000.00	0.19	0.84
1.16	0.4	0.71	2.00	0.27	0.79	25.00	0.31	0.76			

De acuerdo con lo mencionado anteriormente, la condición de equilibrio en el fondo se presenta cuando la velocidad de erosión es igual a la velocidad real.

$$V_e = V_r \quad \dots (7.18)$$

Las velocidades medias que resisten los materiales, propuestas por Maza, se muestran a continuación.

Tabla 7.4. Velocidades medias de la corriente que son admisibles (no erosivas) para suelos no cohesivos, en m/s, (Maza, 1968).

	DIAMETRO MEDIO DE LAS PARTÍCULAS EN mm	TIRANTE MEDIO DE LA CORRIENTE EN METROS					
		0.40	1.00	2.00	3.00	5.00	MAS DE 10
Polvo y Limo	0.005-0.05	0.15-0.2	0.2-0.3.	0.25-0.40	0.30-0.45	0.40-0.55	0.45-0.65
Arena fina	0.05-0.25	0.2-0.35	0.3-0.45	0.40-0.55	0.45-0.60	0.35-0.70	0.65-0.80
arena media	0.25-1.0	0.35-0.50	0.45-0.6	0.55-0.70	0.60-0.75	0.70-0.85	0.80-0.95
Arena gruesa	1.0-2.5	0.50-0.65	0.6-0.75	0.70-0.80	0.75-0.90	0.85-1.00	0.95-1.20
Gravilla fina	2.5-5.0	0.65-0.80	0.75-0.85	0.80-1.0	0.90-1.10	1.00-1.20	1.20-1.50
Gravilla media	5.0-10	0.80-0.90	0.85-1.05	1.0-1.15	1.10-1.30	1.20-1.45	1.50-1.75
Gravilla gruesa	10.0-15.0	0.90-1.10	1.05-1.20	1.15-1.35	1.30-1.50	1.45-1.65	1.75-2.00
Grava fina	15-25	1.10-1.25	1.20-1.45	1.35-1.65	1.50-1.85	1.65-2.00	2.00-2.30
Grava media	25-40	1.25-1.50	1.45-1.85	1.65-2.10	1.85-2.30	2.00-2.45	2.30-2.70
Grava fgruesa	40-75	1.50-2.00	1.85-2.40	2.10-2.75	2.30-3.10	2.45-3.30	2.70-3.60
Guijarro fino	75-100	2.00-2.45	2.40-2.80	2.75-3.20	3.10-3.50	3.30-3.80	3.60-4.20
Guijarro medio	100-150	2.45-3.00	2.80-3.35	3.20-3.75	3.50-4.10	3.80-4.40	4.20-4.50
Guijarro grueso	150-200	3.00-3.50	3.35-3.80	3.75-4.30	4.10-4.65	4.40-5.00	4.50-5.40
Canto rodado fino	200-300	3.50-3.85	3.80-4.35	4.30-4.70	4.65-4.90	5.00-5.50	5.40-5.90
Canto rodado medio	300-400		4.35-4.75	4.70-4.95	4.90-5.30	5.50-5.60	5.90-6.00
Canto rodado grueso	400-500			4.95-5.30	5.30-5.50	5.60-6.00	6.00-6.20

Tabla 7.5. Velocidades medias de la corriente del agua que son admisibles (no erosivas) para suelos cohesivos en m/s, (Maza, 1968).

DENOMINACIÓN DE LOS SUELOS	PORCENTAJE DEL CONTENIDO DE PARTÍCULAS	SUELOS POCO COMPACTOS, PESO VOLUMETRICO DEL MATERIAL SECO HASTA 1.66 ton/m3				SUELOS MEDIANAMENTE COMPACTADOS, PESO VOLUMÉTRICO DEL MATERIAL SECO 1.20 A 1.66 ton/m3				SUELOS COMPACTOS, PESO VOLUMETRICO DEL MATERIAL SECO DE 1.66 A 2.04 ton/m3				SUELOS MUY OCMPACTOS, EL PESO VOLUMETRICO DEL MATERIAL SECO DE 2.04 A 2.14 ton/m3			
		0.4	1	2	3	0.4	1	2	3	0.4	1	2	3	0.4	1	2	3
PROFUNDIDADES MEDIAS DE LA CORRIENTE EN m	< 0.0005, 0.005-0.05	0.4	1	2	3	0.4	1	2	3	0.4	1	2	3	0.4	1	2	3
ARCILLAS Y TIERRAS FUERTEMENTE ARCILLOSAS	30-60, 70-50	0.35	0.4	0.45	0.5	0.7	0.85	0.95	1.1	1	1.2	1.5	1.4	1.4	1.7	1.9	2.1
	20-30, 80-70																
TIERRAS LIGEREAMENTE ARCILLOSAS	10 -20, 90-80	0.35	0.4	0.45	0.5	0.65	0.8	0.9	1	0.95	1.2	1.4	1.5	1.4	1.7	1.9	2.1
SUELOS DE ALUVIÓN Y ARCILLAS MARGOSAS						0.6	0.7	0.8	0.85	0.8	1	1.2	1.3	1.1	1.3	1.5	1.7
TIERRAS ARENOSAS	5-10, 20-40	SEGÚN LA TABLA DE VELOCIDADES NO EROSIVAS PARA SUELOS NO COHESIVOS															

Para el caso de materiales cohesivos, se graficaron los valores anteriores y con ayuda de una línea de tendencia se obtuvieron las velocidades correspondientes a profundidades de hasta 6 metros. Los resultados se muestran a continuación (ver tablas 7.6).

Tablas 7.6. Velocidades no erosivas para suelos cohesivos para tirantes de de hasta 6 m.

ARCILLAS Y TIERRAS FUERTEMENTE ARCILLOSAS

PESOS VOLUMETRICOS TON/M3	PROFUNDIDADES					
	0.4	1	2	3	4	5
Y=1.66	0.35	0.4	0.45	0.5	0.52	0.54
1.20<Y<1.66	0.7	0.85	0.95	1.1	1.58	2.65
1.66<Y<2.04	1	1.2	1.4	1.5	1.58	1.71
2.04<Y<2.14	1.4	1.7	1.9	2.1	2.73	4.23

ARCILLAS Y TIERRAS LIGERAMENTE ARCILLOSAS

PESOS VOLUMETRICOS TON/M3	PROFUNDIDADES						
	0.4	1	2	3	4	5	6
Y<=1.66	0.35	0.4	0.45	0.5	0.52	0.54	0.55
1.20<Y<1.66	0.65	0.8	0.9	1	1.32	2.07	3.47
1.66<Y<2.04	0.95	1.2	1.4	1.5	1.70	2.19	3.18
2.04<Y<2.14	1.4	1.7	1.9	2.1	2.73	4.23	7.02

SUELOS DE ALLUVION Y ARCILLAS MARGOSAS

PESOS VOLUMETRICOS TON/M3	PROFUNDIDADES					
	0.4	1	2	3	4	5
1.20<Y<1.66	0.6	0.7	0.8	0.85	0.89	0.95
1.66<Y<2.04	0.8	1	1.2	1.3	1.38	1.51
2.04<Y<2.14	1.1	1.3	1.5	1.7	2.10	2.88

7.3 CÁLCULO DE LA SOCAVACIÓN EN SECCIONES RECTAS

Como se mencionó anteriormente, la socavación se presentará cuando $V_r = V_e$, por lo que para conocer la profundidad de erosión se tiene lo siguiente

$$V_e = 0.60 \gamma_s^{1.18} \beta H_s^x \quad \text{cohesivos} \quad \dots (7.18)$$

$$V_e = 0.68 d_m^{0.28} \beta H_s^x \quad \text{granulares} \quad \dots (7.19)$$

$$V_r = \frac{\alpha H_0^{5/3}}{H_s} \quad \dots (7.20)$$

$$0.60 \gamma_s^{1.18} \beta H_s^x = \frac{\alpha H_0^{5/3}}{H_s} \quad \text{cohesivos} \quad \dots (7.21)$$

$$0.68 d_m^{0.28} \beta H_s^x = \frac{\alpha H_0^{5/3}}{H_s} \quad \text{granulares} \quad \dots (7.22)$$

$$H_s^x = \frac{\alpha H_0^{5/3}}{H_s 0.60 \gamma_s^{1.18} \beta} \quad \text{cohesivos} \quad \dots (7.23)$$

$$H_s^x = \frac{\alpha H_0^{5/3}}{H_s 0.68 d_m^{0.28} \beta} \quad \text{granulares} \quad \dots (7.24)$$

$$H_s^{1+x} = \frac{\alpha H_0^{5/3}}{0.60 \gamma_s^{1.18} \beta} \quad \dots (7.25)$$

$$H_s^{1+x} = \frac{\alpha H_0^{5/3}}{0.68 d_m^{0.28} \beta} \quad \dots (7.26)$$

De esta manera la expresión para calcular la profundidad de socavación será

$$H_s = \left(\frac{\alpha H_0^{5/3}}{0.60 \gamma_s^{1.18} \beta} \right)^{\frac{1}{1+x}} \quad \text{Cauces cohesivos} \quad \dots (7.27)$$

$$H_s = \left(\frac{\alpha H_0^{5/3}}{0.68 d_m^{0.28} \beta} \right)^{\frac{1}{1+x}} \quad \text{Cauces granulares} \quad \dots (7.28)$$

7.4 EFECTO DEL MATERIAL EN SUSPENSIÓN

Cuando los cauces transportan mucho material ya sea de tipo cohesivo (limos y arcillas) o de material granular, aumenta el peso específico del agua y su viscosidad, por lo que disminuye la turbulencia con la que se transporta, erosionando menos el cauce y presentando una disminución con la velocidad de socavación. Conociendo esto se sabe que para la condición de aguas limpias de velocidad aumentará. Si se desea calcular estos tirantes, Maza propone afectar la expresión de la velocidad de erosión con un factor que está en función del peso específico del agua.

$$V_e = 0.68 d_m^{0.28} H_s^x \psi \beta \quad \dots (7.29)$$

De esta manera la socavación se expresará como sigue

$$H_s = \left(\frac{\alpha H_0^{5/3}}{0.68 d_m^{0.28} \psi \beta} \right)^{\frac{1}{1+x}} \quad \dots (7.30)$$

Recordando que α está en función de las características medias del río

$$\alpha = \frac{Q_d}{H_m^{5/3} B_e} \quad \dots (7.31)$$

$$H_m = \frac{\text{Area del gasto de diseño}}{\text{Ancho total del río}} \quad \dots (7.32)$$

Siendo los factores los expresados en la Tabla 7.7.

Tabla 7.7. Coeficiente ψ en función de γm , (Maza, 1968).

VALOR DEL COEFICIENTE ψ EN FUNCIÓN DE γm								
Ym (ton/m3)	1.05	1.10	1.15	1.20	1.25	1.30	1.35	1.40
ψ	1.05	1.13	1.20	1.27	1.34	1.42	1.50	1.60

7.5 CALCULO DE LA SOCAVACIÓN EN MEANDROS

Los ríos con meandros, como se vio al principio del capítulo son aquellos que en planta muestran curvaturas a lo largo de en su trayectoria.

Si se desea conocer la socavación debida a la avenida, se utiliza el cálculo visto anteriormente para secciones rectas, pero si se desea calcular la socavación en la sección curva bajo condiciones medias de una avenida puede utilizarse el método de Altunin propuesto por Maza, este método consiste en encontrar el tirante máximo que se produce en una curva, el método no considera una avenida, solo el gasto máximo que puede pasar por el cauce sin desbordar lo y solo puede aplicarse si la sección transversal de la curva no es reducida

$$H_{max} = \epsilon H_{re} \quad \dots (7.33)$$

donde

H_{re} tirante medio en el tramo recto durante la avenida (m)

ϵ coeficiente que depende de la relación B/R y que se encuentra en la tabla 7.8.

B ancho de la superficie del agua en el tramo recto (m)

R radio de la curva (m) (el menor posible medido en planta hasta el centro del cauce ó el radio que se podría llegar a formar, es decir el radio estable cuyo valor se aproxima a 3.5B)

Tabla 7.8 Coeficiente ϵ en función de la relación B/R, (Maza, 1968)

B/R	0.5	0.333	0.25	0.2	0.166	0
ϵ	3.00	2.57	2.20	1.84	1.48	1.27

El valor calculado como H_{max} es sustituido en la formula de la velocidad real y de las profundidades de socavación quedando de la manera siguiente

$$V_r = \frac{\frac{1}{n} s^{1/2} H_{max}^{5/3}}{H_s} \quad \dots (7.34)$$

$$H_s = \left(\frac{\frac{1}{n} s^{1/2} H_{max}^{5/3}}{0.60 \gamma_s^{1.18} \beta} \right)^{\frac{1}{1+x}} \quad \text{Cauces cohesivos} \quad \dots (7.35)$$

$$H_s = \left(\frac{\frac{1}{n} s^{1/2} H_{max}^{5/3}}{0.68 d_m^{0.28} \beta} \right)^{\frac{1}{1+x}} \quad \text{Cauces granulares} \quad \dots (7.36)$$

7.6 CÁLCULO DE LA SOCAVACIÓN EN CAUCES HETEROGÉNEOS

El cálculo de la socavación para cauces con estratos puede efectuarse de 2 maneras, una de ellas es graficando las velocidades de erosión obtenidas a cada profundidad para cada uno de los estratos y graficando a la vez la velocidad real también para cada estrato y cada profundidad, el punto en donde se intersequen las curvas será la socavación esperada. El otro método consiste en hacer tanteos; se calcula la erosión para el primer estrato si la erosión obtenida se ubica por debajo de este estrato se realiza el cálculo nuevamente pero con las características del estrato siguiente si la socavación calculada vuelve a ubicarse por debajo de este estrato se prosigue el cálculo con el estrato siguiente hasta que la socavación calculada se ubique dentro del estrato. Este cálculo se realiza para diferentes puntos en la sección transversal del cauce.

Cabe mencionar que los ejemplos realizados en este trabajo son analizados para cauces homogéneos, sin embargo; en la vida real los cauces presentan estratos con diferencia de materiales por lo que el cálculo de la socavación debe realizarse como se describió anteriormente.

8. PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO DE BORDOS Y COLOCACIÓN DE RECUBRIMIENTOS

Los procedimientos constructivos dependen del recubrimiento que se utilice. Si se diseña un bordo con enrocamiento las propuestas de diseño consisten principalmente en analizar la fuerza cortante a las que el material queda expuesto y conocer así las velocidades que resiste el material, otro factor importante consiste en la forma de colocar el recubrimiento y la compactación del material. En el caso de las formaletas de concreto o tapetes flexibles, se tienen técnicas de colocación proporcionadas por los fabricantes, algunas de ellas se exponen a continuación.

8.1 COMPACTACIÓN Y CALIDAD DE LOS MATERIALES

De acuerdo con su procedimiento constructivo los bordos pueden clasificarse en

- Compactados
- Semicompactados
- Sin compactación

Los bordos compactados requieren de taludes menos tendidos que los semi compactados o sin compactación.

La colocación de los materiales obedece al tipo de bordo que se haya seleccionado y su disposición del material sin embargo, por facilidad la colocación de materiales se describirá para el núcleo impermeable y los respaldos permeables.

La sección impermeable que es colocada en el talud de estos antes del material grueso; se compone por suelos finos, como arcillas y limos, las gravas y arenas son permitidas en combinación con finos siempre y cuando garanticen la permeabilidad.

Los materiales aceptables son aquellos que tienen origen aluvial, eólico, residual, lacustre o glaciario. La extracción de estos y su tratamiento dependen en gran parte de su origen, su homogeneidad y resistencia al ataque con herramientas. Para la extracción de gravas y arenas del cauce se utilizan dragas mecánicas. Una vez extraído el material, se le da un tratamiento que favorezca su colocación en el terraplén y garantice su funcionalidad, los parámetros que se cuidan para esta actividad son la humedad y homogeneidad.

Para suelos con humedad menor a la necesaria, se sugiere para su colocación depositar el material en capas de 30 a 50 cm de espesor, someterlo a riegos de aspersión y dejarlo en reposo durante 15 o 30 días.

La humedad de colocación es un parámetro que se fija dependiendo de las características del material y condiciones del terreno, cuando el suelo presenta ya un contenido de agua superior al óptimo, debe diseñarse para tal humedad ya que no resulta económicamente factible secar el material.

Es requisito indispensable una excelente compactación de los materiales impermeables junto con el control de la humedad. Para determinar el espesor de las capas, el número de pasadas del compactador y la densidad especificada, se realiza una prueba en el terraplén y en el laboratorio se realiza la prueba proctor. Los resultados de estas pruebas son representados por medio de curvas que muestran el grado de compactación (C) con el número de pasadas del equipo (N), para

diferentes espesores de la capa (h) (ver figura 8.1), conocidas estas curvas es posible escoger el valor del espesor de las capas y el número de pasadas de acuerdo con las especificaciones de diseño.

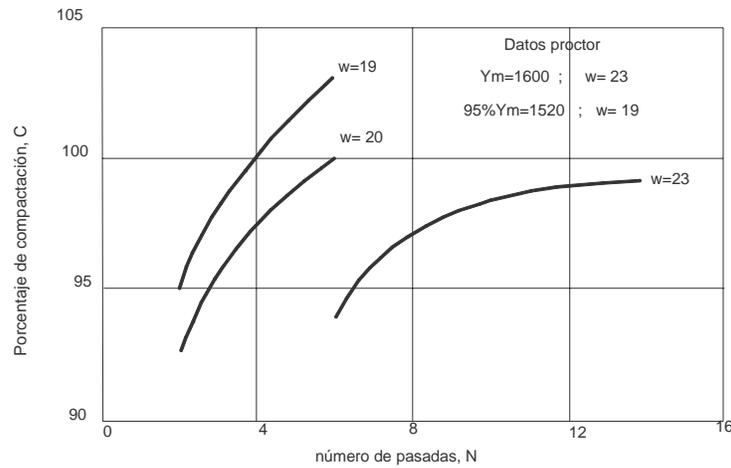


Figura 8.1. Variación del grado de compactación con el contenido de agua y número de pasadas en capas, (Marsal, 1975).

En los respaldos permeables el material que se utiliza es roca sana y no contaminada, los métodos de explotación están en función de sus fracturamientos en formaciones ígneas y metamórficas, así como de los planos de echado, grietas y cavernas en calizas. Para realizar las perforaciones debe tomarse en cuenta la dureza y abrasividad de la roca.

Es deseable que el material este bien graduado, con un tamaño máximo de 30 cm. Debe quedar libre de materiales cohesivos que son considerados contaminantes, la arena y grava se admiten solamente si fueron consideradas en su diseño.

El proceso que se aplique al material debe garantizar una buena granulometría, cuidar que el tamaño máximo de las partículas sea el indicado y tener el material libre de contaminantes. Para lograr la granulometría de las rocas y el tamaño máximo de las partículas se deja pasar el material por tamices con aberturas máximas de 30 cm.

El acomodo del material se hace por acarreo del material más grueso a los taludes exteriores. Si se llegan a colocar filtros el material utilizado para la colocación de filtros debe ser necesariamente un material bien graduado.

8.2 COLOCACIÓN DE ENROCAMIENTOS

El enrocamiento de los bordos puede ser colocado de forma manual o por medio de maquinaria. La colocación manual es la más estable, este tipo de colocación se recomienda para pendientes muy pronunciadas, una ventaja más de este tipo de colocación es que se utiliza menos material para el recubrimiento, sin embargo tiene la desventaja de representar altos costos.

Cuando se coloca el material por medio de maquinaria, debe cuidarse que el material se deje caer en distancias cortas al lugar donde se espera que permanezca.

No es recomendable arrastrar el material ya que se dispersa y se puede romper, ni dejarlo caer de alturas grandes con lo que también se quiebra.

Se sugiere incrementar el ancho del recubrimiento y tamaño del material a fin de absorber las deficiencias producidas por el método de colocación.

Es recomendable incrementar el espesor de la capa del material sumergido en un 50% y su colocación dependerá del peso por unidad de área.

8.3 COLOCACIÓN DE TAPETES FLEXIBLES

Recientemente se han fabricado colchas y tapetes de concreto que tienen como finalidad reemplazar el material rocoso de los recubrimientos. Grupo Elher, fabricante de tapetes de concreto recomienda llevar a cabo los siguientes procesos para la colocación de sus tapetes.

Conocido el sitio donde se desea colocar el tapete y las características del cauce, se debe llevar a cabo el desvío del río y el dragado de la zona donde se colocará el recubrimiento, teniendo la zona de trabajo seca se compacta el material de las márgenes y cauce del río y/o bordo construido para lograr secciones homogéneas, seguido de esto se colocan las mallas geotextiles, las cuales pueden ser de diferentes características.

Los geotextiles y tapetes deben quedar integrados en la corona del bordo, por lo que se abre un zurco que posteriormente se rellena con la malla y el tapete (ver figura 8.2). La malla geotextil es colocada únicamente en los taludes de los bordos y márgenes del río.



Figura 8.2. Colocación de tapetes flexibles, (Sub Marelher, 2001)

Las dimensiones de los tapetes son adaptables ya que se pueden unir las secciones hasta lograr las dimensiones requeridas.

Una vez colocada la malla geotextil se colocan las placas de tapetes y se unen cuidando de que estas queden igualmente incluidas en la corona del bordo. Los tapetes deben cubrir por completo el talud mojado del bordo y una pequeña sección del cauce que debe cubrirse con material compactado como se observa en la figura 8/3. Una vez realizado este proceso se regresa el agua a su escurrimiento original y la zona queda bien protegida.



Figura 8.3. Sección final de los tapetes dentro del cauce, (Sub Marelher, 2001).

Una alternativa más que se propone para asegurar los tapetes consiste en colocar en una zanja una parrilla de armado de la cual se amarran los tapetes; la zanja posteriormente es rellenada con concreto, como se muestra en la figura 8.4 sin embargo; es importante comentar que este tipo de estructura podría llevar a socavaciones similares a las producidas por efecto de pilas de puente por lo que se sugiere llevar a cabo un análisis similar. (Ver Socavación en cauces naturales, Maza, 1968).

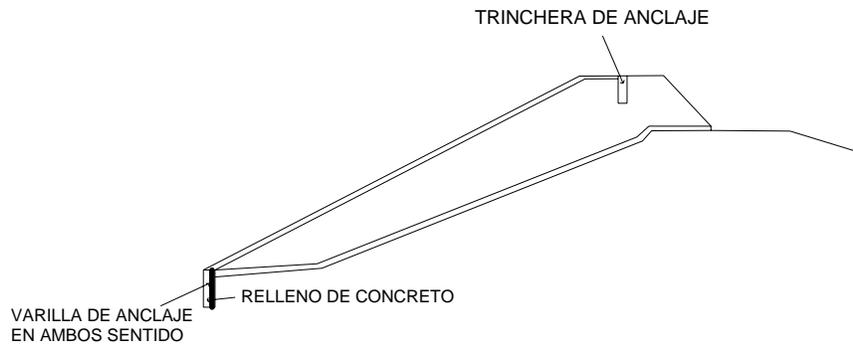


Figura 8.4 Colchas flexibles aseguradas con trinchera y concreto en la corona y el cauce.

8.4 COLOCACIÓN DE COLCHAS O FORMALETAS

Las recomendaciones de instalación de las colchas de concreto por el fabricante son las siguientes.

Como primer paso se prepara el área de colocación del colchón para ello se sugiere uniformizar el material y compactarlo hasta tener una superficie uniforme y suave para lo cual se sugiere retirar las piedras de gran tamaño y todo el material orgánico.

La colocación del colchón se inicia en la corona del bordo en donde debe excavarse una zanja de hincado con un mínimo de 60 cm de profundidad por 15 cm de ancho (ver figura 8.5), dentro de ella se coloca la punta de la colcha. Una vez colocado el hincado en la zanja como se muestra en la figura, se procede a rellenar la zanja con material compactado y depositar la colcha a lo largo del talud, la colcha debe quedar sumergida por lo menos un metro por debajo del nivel de aguas mínimas del cauce o hasta donde sea necesario para evitar el fenómeno de socavación. Esta protección debe ser suficientemente fuerte en caso de que se exponga a corrientes fuertes.

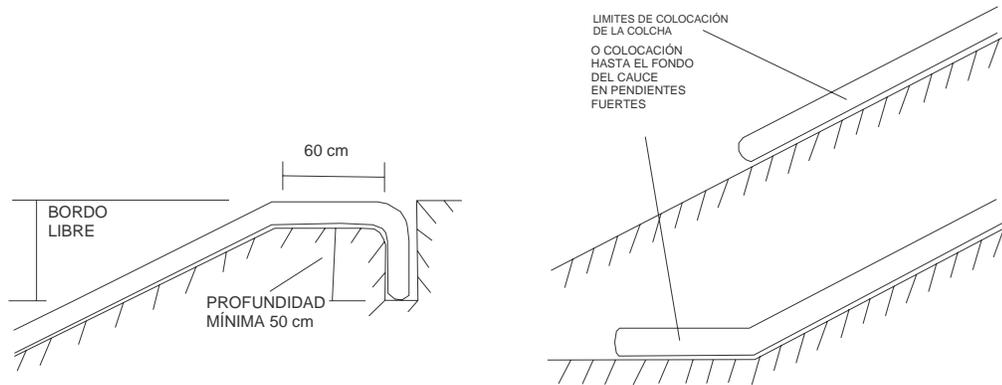


Figura 8.5. Especificaciones para la colocación de colchas de concreto, (Hydrotex, 2001)

Si se presenta una socavación extrema el revestimiento se debe extender hasta el fondo del cauce y garantizar la estabilidad del sistema.

La formaleta debe asegurarse al borde de su colocación y al final de esta, tanto aguas arriba como aguas abajo, esto se lleva a cabo por medio de una trinchera. La trinchera debe estar excavada con un talud de 45° y una profundidad mínima de 60 cm aguas abajo y aguas arriba como se observa en la figura 8.6.

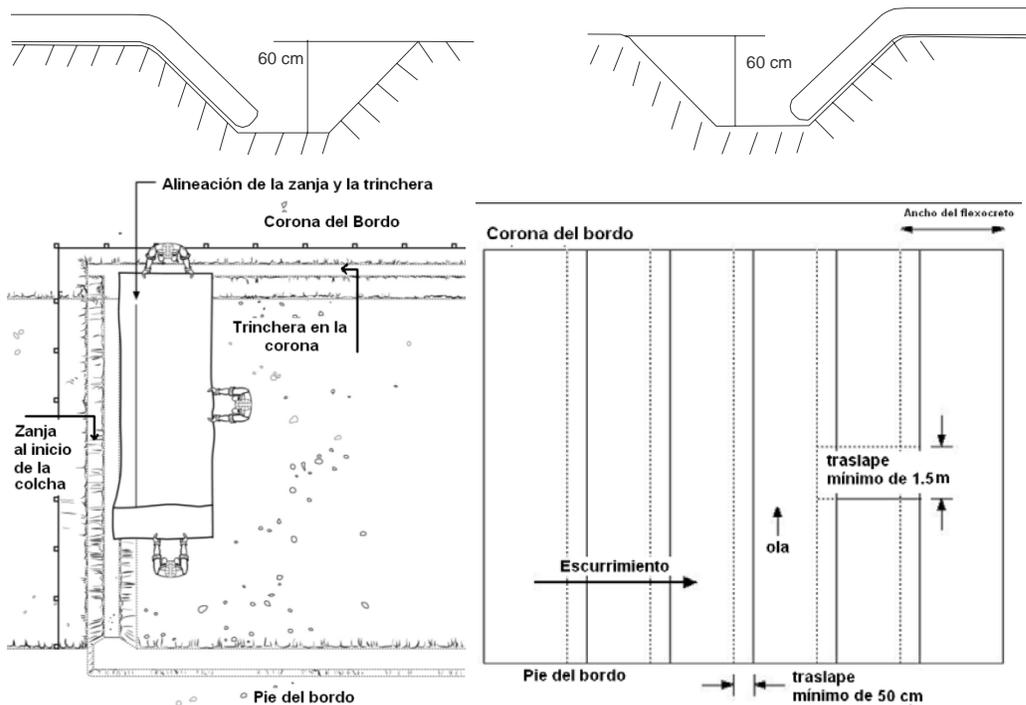


Figura 8.6. Especificaciones para la colocación de las colchas de concreto a lo largo del borde, (Hydrotex, 2001)

A lo largo de la colocación del flexocreto debe cuidarse de no dejar pliegues y de que la alineación del flexocreto coincida con el eje del borde. El recubrimiento es extendido de la corona del borde hacia el pie de este ya sea hasta el fondo del cauce o a cierta profundidad según las características del proyecto lo especifique. Las uniones entre recubrimiento y recubrimiento deben quedar perfectamente unidas, algunos fabricantes recomiendan coserlas con hilos de Nylon o Poliéster

que ellos mismos ofrecen. Algunos de estos productos además presentan un cierre que permite la unión entre ellos (ver figura 8.7).

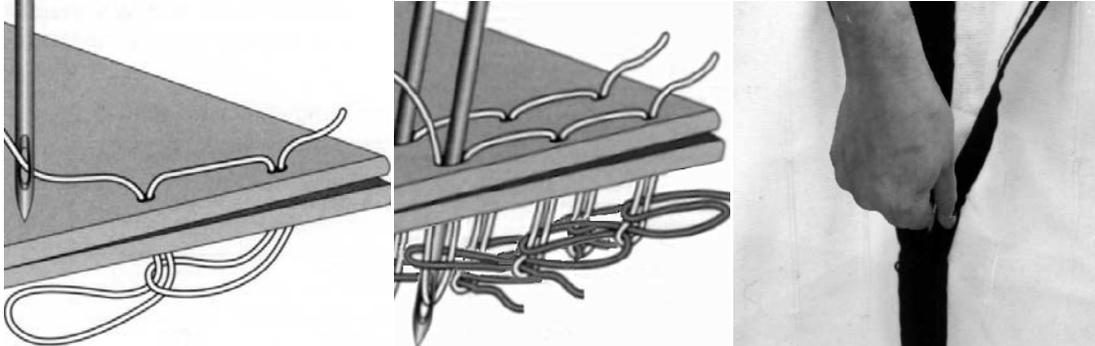


Figura 8.7. Especificaciones para unir las colchas de concreto, (Hydrotex, 2001)

Una vez colocada la formaleta se procede a rellenarla con un mortero para lo cual se debe realizar un corte en la parte superior de ésta es decir en la corona del bordo, (se debe tener cuidado de no cortar la parte inferior de la formaleta), en el corte realizado se coloca la boquilla de la bomba con la que se rellenaran primero las trincheras de los costados (aguas arriba) siguiendo con los extremos aguas abajo tratando de mantener la alineación de la colcha.

Se recomienda que las primeras colocaciones se hagan pedidos de concreto de 5m^3 mientras se logra la eficiencia necesaria, esto es para que el concreto no pierda fluidez en caso de tener que detener el bombeo. La relación agua/cemento en cemento Portland debe estar entre 0.6 y 0.7. Se pueden incluir aditivos que mejoren la plasticidad, trabajabilidad, tiempos de fraguado, cantidad de agua y la resistencia del concreto.

Debe evitarse el flujo de agua en todos los bordes de la colcha por lo que todos los bordes se deben asegurar. Este tipo de revestimientos no se recomienda para taludes con relaciones mayores a 1.5H:1V. Las especificaciones de colocación y agregados varían dependiendo el tipo de fabricante y el tipo de formaleta.

9. EJEMPLOS NUMÉRICOS

Si lo que se requiere es realizar el análisis o revisión de un bordo por lo general se dispone de la información siguiente

Ubicación y características de la zona
Características del cauce y rugosidades
Tipos de bordos y recubrimiento
Materiales de construcción y características del recubrimiento
Geometría y características constructivas
Gastos base y de diseño

Si no se cuenta con esta información se deben realizar los estudios, aforos o levantamientos correspondientes para contar con la información necesaria que permita llevar a cabo el análisis.

9.1 CARACTERÍSTICAS PROPUESTAS

Las conductividades hidráulicas que se utilizarán tanto para los materiales del cauce y del bordo de ejemplos anteriores son las siguientes

Tabla 9.1. Conductividades hidráulicas de diferentes materiales, (Lewis, 1988).

kPa	ENROCAMIENTO/ TAPETES m/s	COLCHAS m/s	GEOTEXTIL G-70 m/s	ARENA CON GRAVA	ARENA m/s	ARCILLA ARENOSA m/s	ARCILLA m/s	ARCILLA LIMOSA m/s	MATRIZ CALCAREA m/s
2.45	300	3.00E+00	2.20E-03	3.00E-05	1.16E-06	1.16E-06	1.74E-08	8.10E-08	2.31E-09
4.90	10	1.00E-01	2.00E-03	6.00E-04	1.16E-08	4.63E-07	1.16E-08	3.47E-08	1.62E-09
7.35					9.26E-10	1.16E-07	9.84E-09	1.97E-08	1.39E-09
9.81						2.31E-08	8.10E-09	1.04E-08	1.16E-09
12.26						3.47E-09	6.94E-09	4.63E-09	1.04E-09
14.71						8.10E-10	6.37E-09	3.13E-09	9.26E-10
17.16							5.79E-09	1.50E-09	8.10E-10
19.61							4.63E-09	8.10E-10	6.94E-10
22.06									6.48E-10
24.52									5.79E-10

Las características geotécnicas se propusieron con los valores siguientes

ENROCAMIENTO

Peso volumétrico: 20 kN/m³
Cohesion: 0 kPa
Angulo de fricción interna: 40°

COLCHAS

Peso volumétrico: 21 kN/m³
Cohesion: 3 kPa

Angulo de fricción interna: No se considera

MATERIAL ARCILLOSO (CUERPO DE LOS BORDOS)

Peso volumétrico: 17 kN/m³

Cohesion: 2.7 kPa

Angulo de fricción interna: 30°

MATERIAL ARCILLO-ARENOSO (CAUCES PREDOMINANTEMENTE COHESIVOS)

Peso volumétrico: 16 kN/m³

Cohesion: 2.5 kPa

Angulo de fricción interna: 16°

MATERIAL ARCILLO-GRANULAR (CAUCES PREDOMINANTEMENTE GRANULARES)

Peso volumétrico: 19 kN/m³

Cohesion: 0 kPa

Angulo de fricción interna: 30°

Las rugosidades se considerarán de la siguiente manera

- Coeficiente de rugosidad equivalente y el valor de n Manning extraído de tablas
- Coeficiente de rugosidad en cada tipo de material

De acuerdo con lo anterior los ejemplos que se presentarán a continuación fueron diseñados y revisados (Análisis posterior a la socavación) bajo las siguientes condiciones.

- a) Análisis de flujo interno
- b) Estabilidad de talud
- c) Socavación

Los resultados de todos los ejemplos pueden ser consultados a detalle en el Apéndice A, las figuras que se muestran en este capítulo son únicamente ilustrativas. A continuación se presentan las características de los bordos y el análisis de los resultados. Adicionalmente se presentan las variaciones que existen en el comportamiento cuando se cambia alguna característica y figuras de estos análisis.

9.1.1 EJEMPLO 1

Se tiene un cauce homogéneo de material arcillo arenoso. En la zona de meandro se ubica un bordo de 5 metros de altura cuyo cuerpo fue construido de arcilla y en su paramento mojado se colocó un recubrimiento de flexocreto acompañado de geotextil G-70 (Feltrex), el recubrimiento fue colocado en toda la corona del bordo hasta por debajo del nivel del NAMinO (11 m de profundidad), en donde se aseguró hincándola a 2 metros de profundidad.

La geometría y batimetría de las secciones en el meandro se observan en la figura 9.1.

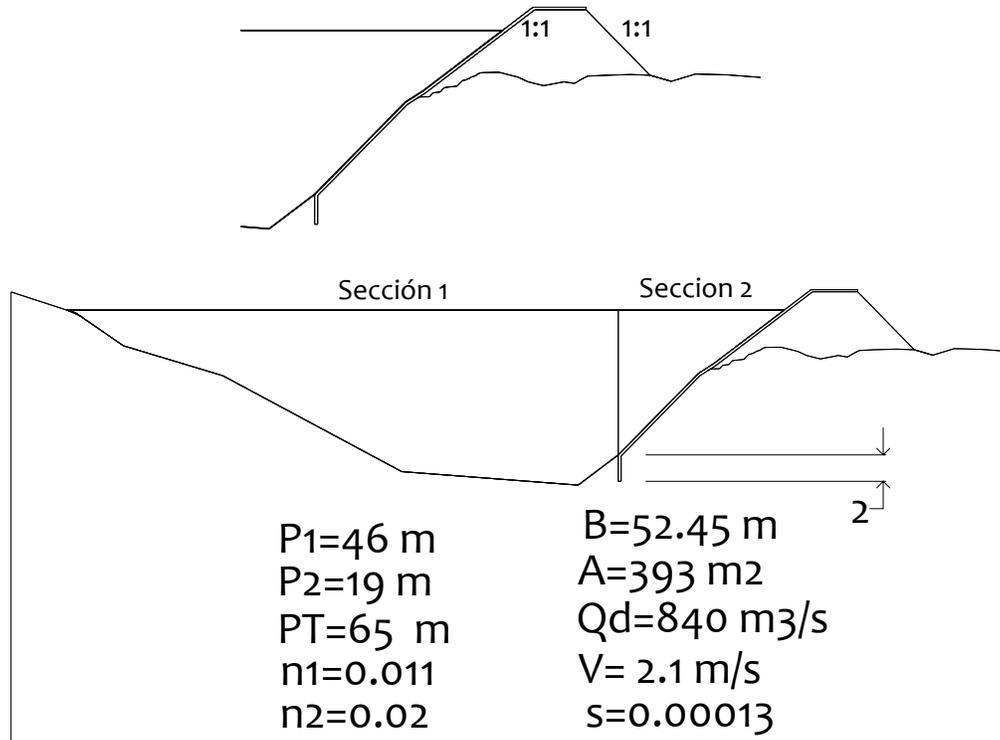


Figura 9.1. Características del ejemplo 1.

a) Comportamiento del recubrimiento

De acuerdo con los resultados obtenidos del análisis de este ejemplo la zanja donde entró el recubrimiento usado para mantener fija la colcha se colocó a 2 metros de profundidad por debajo del fondo del cauce. Se encontró que para un gasto de 840 m³/s, al cual corresponde una velocidad de 2.1 m/s existirá una socavación de hasta 4.7 metros. (De acuerdo con la tabla 7.5 para una profundidad mayor a 10 metros esta velocidad solo es soportada por suelos cohesivos de peso volumétrico seco entre 2.04 y 2.14 ton/m³ a profundidades de 3 metros).

Al hacer una comparación del estado posterior de la socavación con el estado inicial utilizando una rugosidad compuesta se observó que en la zona del hincado ésta socavación fue mayor a los 2 metros por lo que se concluye que para este caso el hincado no fue suficiente para estabilizar el recubrimiento ya que al finalizar la avenida la colcha hincada ya no trabajaría y se esperaría que este recubrimiento trabajara sobrepuesto o con una capa de material sobre él; esta última condición sugeriría que se tiene un comportamiento diferente. (Ver Ejemplo 6).

La socavación calculada al respetar el valor de la rugosidad en cada perímetro mostró que debido a que el recubrimiento tiene una rugosidad mayor que el cauce el material natural será arrastrado con mayor facilidad teniendo una socavación mayor en el talweg, sin embargo, esta socavación afecta de la misma manera la colocación del hincado por lo que puede esperarse el mismo comportamiento. Así mismo, debe considerarse que al quedar el flexocreto suelto éste puede ser suspendido por el agua generando que se tenga la misma socavación por debajo del geotextil y favoreciendo la falla de la estructura.

b) Estado del borde posterior a la socavación

Analizando sus líneas de flujo y la estabilidad del talud en GeoStudio mostradas en la figura 9.2, se observa que la tendencia de filtración fue la misma y el gasto de filtrado no tuvo variación considerable, además; el comportamiento de las líneas de flujo y carga de presiones tampoco presentaron diferencias significativas.

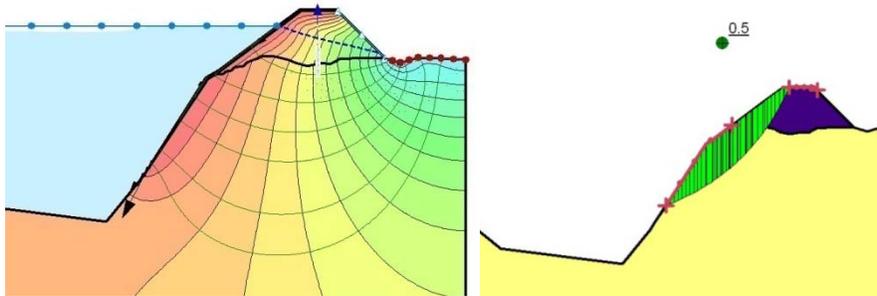


Figura 9.2. Red de flujo y factor de seguridad obtenidos con Geostudio.

Al presentar poca variación en el comportamiento interno del flujo y de su gasto de filtrado, pudo observarse que la condición más desfavorable para la estabilidad del borde fue el arrastre de material del cauce que disminuyó notablemente el factor de seguridad del terraplén. El recubrimiento no ayudó lo suficiente como para evitar la socavación puesto que la profundidad del hincado colocado fue menor a la socavación generada. Como el recubrimiento tiene un espesor pequeño presenta una mayor facilidad de movimiento de material en el cauce por lo que no puede considerarse que éste, después de ser desplazado de sus condiciones iniciales; contribuya a la estabilidad del talud.

c) Posibles variantes

De otros análisis realizados con características similares pero con alguna variación en sus características se observó lo siguiente.

Asegurando en recubrimiento con zanja simple en la corona y con zanja y relleno en el cauce

Los resultados de la red de flujo para este caso se tienen en la figura 9.3 donde puede observarse que la zanja colocada en la corona del borde tiende a mantener el agua en la zona e incluso a elevar la línea de flujo dentro del cuerpo del borde; por el contrario, en la zanja dentro del río se observó un comportamiento favorable al actuar éste como dren puesto que la zanja logra bajar el nivel del flujo y desviarlo manteniendo las trayectorias por debajo del cuerpo del borde, esto puede observarse más fácilmente al revisar el comportamiento de las cargas de presión donde se

puede considerar una presión de 2m en la base del bordo cuando el espejo de agua se encuentra a 3.3 m de la base.

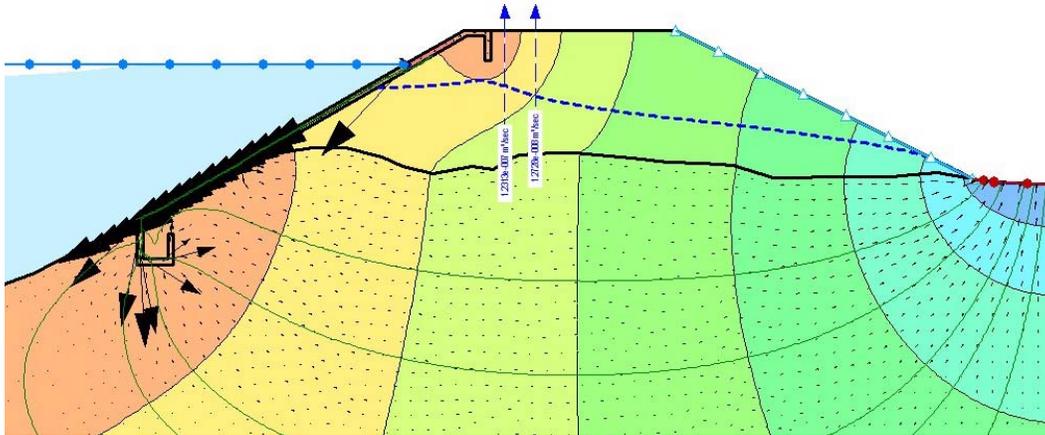


Figura 9.3. Red de flujo para recubrimiento colocado en zanja, obtenida con Geostudio.

Después de que la socavación arrastra la zanja y el relleno, la línea superior de flujo aumentó su nivel por lo que el gasto de filtrado también fue mayor en el cuerpo del bordo de la misma forma que aumentó la carga de presiones sobre todo en la zona de pie del bordo, estos factores favorecen el deslizamiento de tierras por lo que el factor de seguridad disminuyó dramáticamente de un valor de 5.3 a otro de 0.8 con lo cual la estructura no cumple con el factor de seguridad mínimo a pesar de haber sido sobre diseñado en un principio (ver figura 9.4).

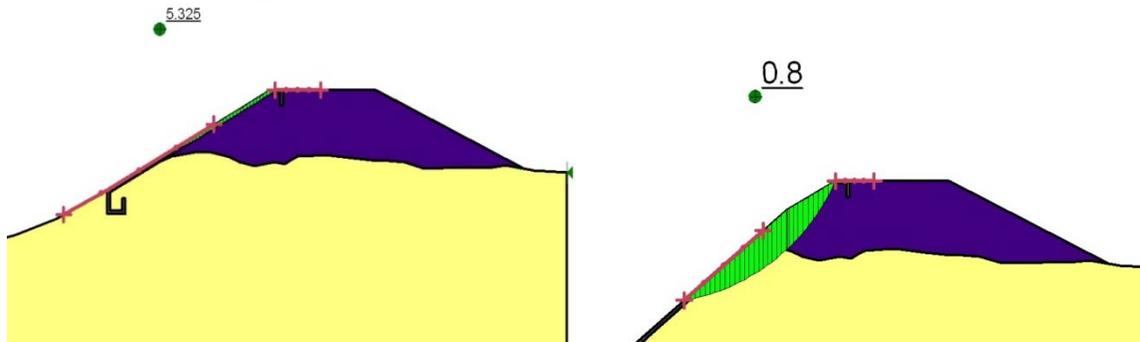


Figura 9.4. Resultados de la estabilidad de talud para una colcha colocada en zanja, obtenidos con Geostudio.

Bordo con núcleo limoso y recubrimiento sobrepuesto

Se observó en el bordo cuerpo se construyó de un material arcilloo-limoso que las trayectorias del fluido son favorables al disminuir la línea superficial del agua por debajo del espejo de agua y disminuir el gasto de filtrado casi al doble los construidos únicamente con arcillas, como puede verse en la figura 9.5, en ella también se observa que en la frontera entre el recubrimiento y el cauce el flujo de agua fluye con mucha más libertad éste efecto es desfavorable para la estabilidad del bordo ya que puede sufrir de turificación en la zona de desplante lo que ocasionaría la falla total del elemento.

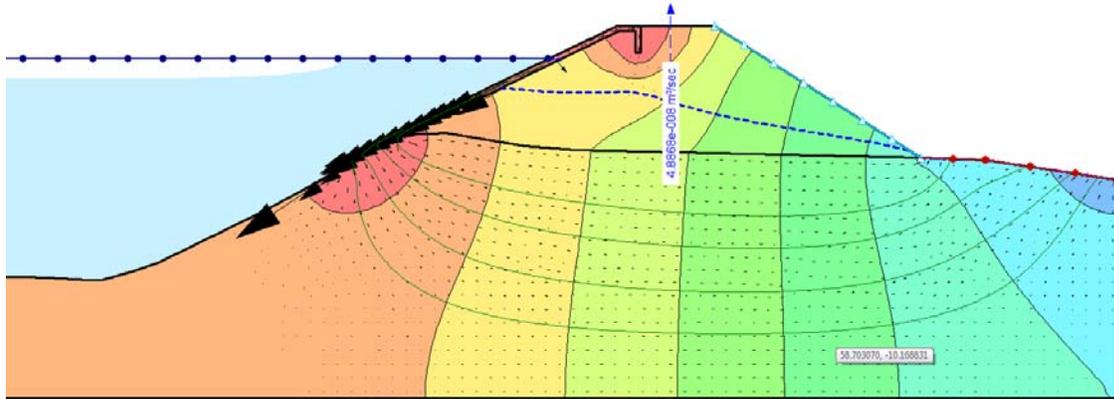


Figura 9.5 Red de flujo del análisis de un bordo de material limoso, obtenida con Geostudio.

El comportamiento de los recubrimientos colocados sobrepuestos es mejor mientras el material del cuerpo del bordo sea más plástico, mientras menos plástico es el cuerpo el paso del agua a través del bordo se vuelve más fácil aumentando el gasto de filtrado y haciendo al bordo más susceptible a una falla por tubificación.

La colocación del flexocreto en la corona resultó favorable para este tipo de colocación, sin embargo no debe olvidarse que una colocación muy cercana al talud puede favorecer una falla por deslizamiento de mayor magnitud.

Para un socavación máxima calculada de 3.79 m, el gasto de filtrado aumentó y las líneas de corriente fueron más desfavorables, sin embargo; la estabilidad de talud disminuyó hasta quedar con un valor de 1 (ver figura 9.6) lo cual no cumple con el factor de seguridad, pero representa un mejor comportamiento que en el caso de una zanja con relleno y cuerpo arcilloso en el bordo.

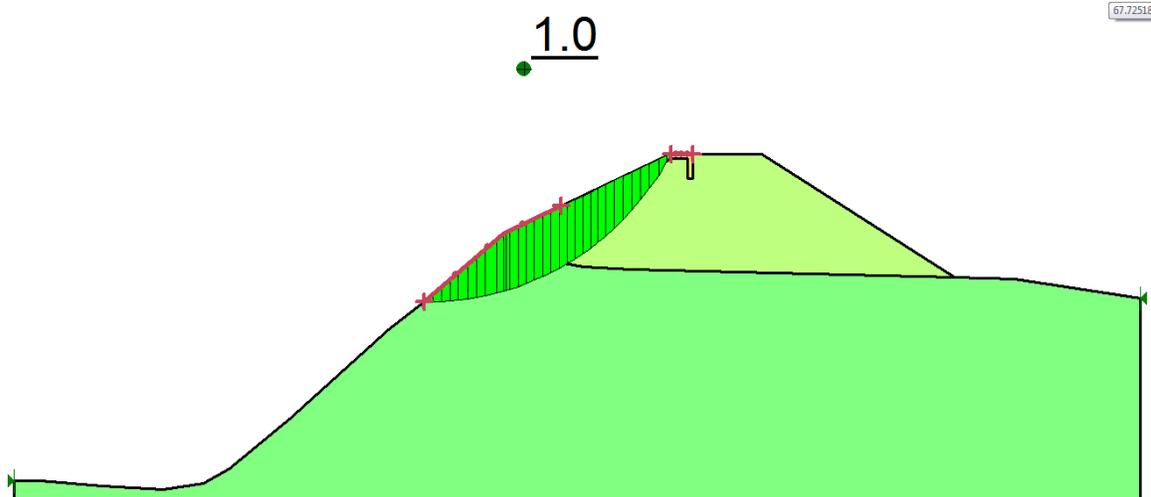


Figura 9.6. Factor de seguridad y circulo de falla de un bordo construido con material limoso, calculados con Geostudio.

Puede concluirse que colocar la colcha sobrepuesta en el cauce favorece la estabilidad de talud pero afecta de manera interna a la estructura y en caso que se deba colocar sobrepuesta se

recomienda que se haga solamente que el bordo este construido de materiales muy plásticos y que el material sobre el que se construya tienda a ser cohesivo para evitar fallas por tubificación.

Bordo en cauce granular con material de transición en su talud mojado

Pudo notarse que para gastos mayores a $594 \text{ m}^3/\text{s}$ y velocidades de 2.4 m/s el anclaje se pierde por completo (de acuerdo con las velocidades permisibles según Maza, las gravas medias llegan a soportar velocidades de hasta 2.45 m/s y material granular más grande).

Las líneas de flujo y el gasto de filtrado observados en el comportamiento interno (ver figura 9.7), son muy parecidas a las obtenidas cuando no se tiene la capa de transición, por lo que colocar una capa de material cohesivo granular no favorece en nada el comportamiento del agua en el interior del bordo y por el contrario favorece al deslizamiento de mayor volumen de material ante la falla de talud inclusive en la condición de diseño.

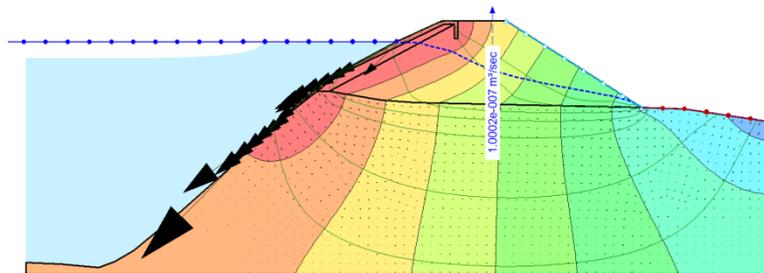


Figura 9.7. Red de flujo de un bordo con material de transición, obtenido con Geostudio.

Una vez que el anclaje en fondo del río ha fallado, las condiciones del flexocreto y su geotextil pueden ser variables, considerando que estos quedan dispuestos sobre el cauce o cubiertos ligeramente con sedimento, el comportamiento que se espera no resulta muy favorable ya que favorece el paso de agua y eleva el nivel de la línea de flujo superficial que a su vez aumenta el gasto interno de filtrado y puede verse reflejado en una falla por tubificación.

Con la socavación calculada por el paso de la avenida la estabilidad de talud se ve reducida dejando al bordo en las condiciones de falla. En el Factor de seguridad calculado para este estado, como se muestra en la figura 9.8, se observa que la colocación de un material con bajo contenido granular disminuye la estabilidad y aumenta el volumen de material deslizado.

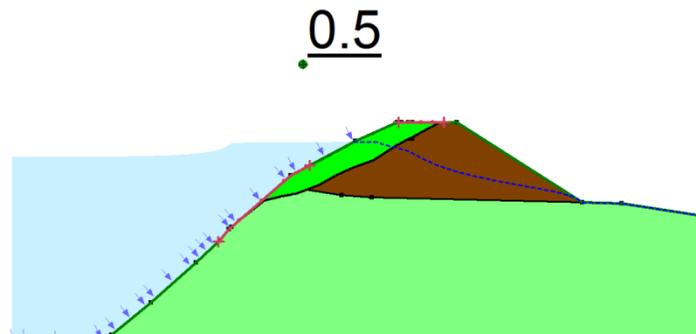


Figura 9.8. Factor de seguridad y círculo de falla de un bordo con material de transición en su talud mojado, obtenido con Geostudio.

9.1.2 EJEMPLO 2

Se analizará un bordo ubicado en el extradós en la zona de meandro de un cauce de material arcillo arenoso. El bordo fue construido con arcilla en su cuerpo y se colocó una capa pequeña de enrocamiento con un espesor de 0.7 m para evitar la socavación. Sus características se encuentran en la figura 9.10).

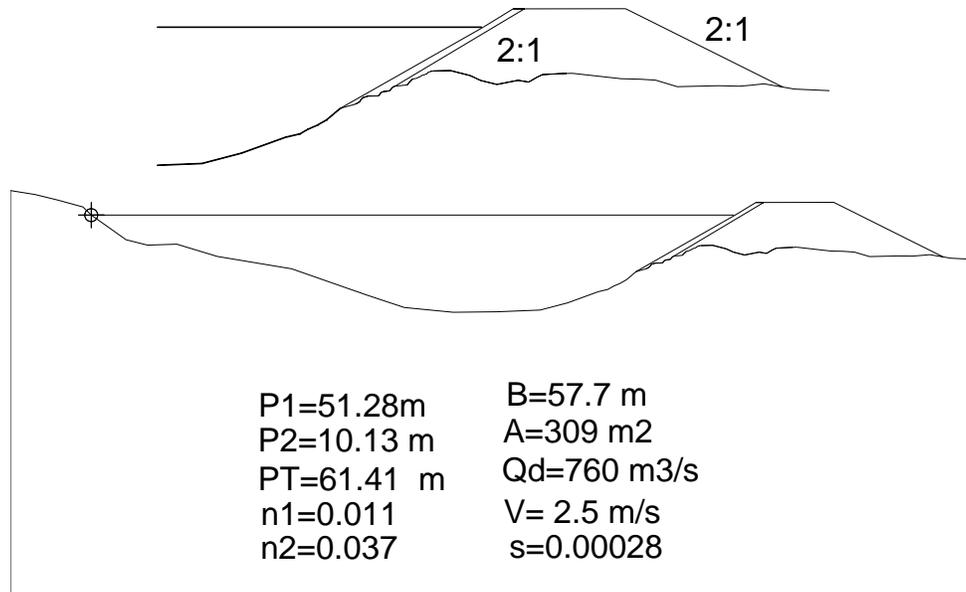


Figura 9.10. Características del bordo del ejemplo 2.

a) Comportamiento del recubrimiento

El enrocamiento en el talud del bordo no proporciona ninguna resistencia ante el paso del agua por lo que la línea de flujo superior comienza a descender a partir de que el agua tiene contacto con las arcillas, el gasto de filtrado en la zona más cercana a la corona fue menor que para el caso de recubrimiento de flexocreto (Ver ejemplo 2).

Al realizar en análisis con las rugosidades originales en cada perímetro mojado, no puede obtenerse un valor suficientemente confiable de la socavación calculada ya que la diferencia entre este y el análisis realizado para rugosidad equivalente varía significativamente presentando valores 7 metros más grandes; sin embargo resulta útil observar el comportamiento que se tiene; se puede notar por un lado que el enrocamiento impedirá que se arrastre el material en el cuerpo del bordo y por el otro que el material del cauce tienda a ser arrastrado produciendo el deslizamiento del enrocamiento por efecto de la gravedad, esto provocaría que el talud quedara desprotegido ante la socavación y a su vez favorecería una falla por deslizamiento de talud.

b) Estado del bordo posterior a la socavación

Haciendo el cálculo posterior a socavación y utilizando la rugosidad compuesta se tienen los siguientes resultados (ver figura 9.11).

El gasto de filtrado posterior a la socavación fue menor en el cuerpo del bordo y la línea superficial de flujo disminuyó ya que la socavación ayudó a que el flujo pudiera pasar más fácilmente por el material de la margen; de esta manera el bordo trabaja menos saturado pero el flujo en la base puede ocasionarle una falla por tubificación.

El factor de seguridad por deslizamiento de talud disminuyó a un valor de 1.1, por lo que se consideraría que el bordo seguiría trabajando en sus condiciones límite después de la socavación, pero con una clara tendencia a fallar. La estabilidad inicial del talud mostraba que el deslizamiento más desfavorable permitiría el deslizamiento de muy poco enrocamiento y esto sucedería para valores pequeños (13.32 kN en su momento activante), el estado posterior a la socavación reveló que se deslizaría un volumen semejante pero con un momento activante mayor (14.24 kN) esto nos muestra que la estabilidad del talud es semejante a la de diseño aún después de la socavación, sin embargo; el enrocamiento tenderá a deslizarse hacia el fondo del cauce y en el mejor de los casos quedará una pequeña capa cubriendo el terraplén, dejándolo más vulnerable ante la socavación.

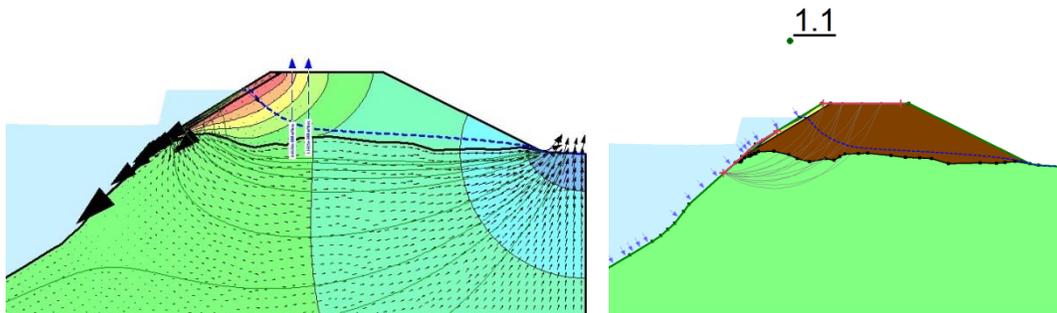


Figura 9.11. Red de flujo y círculo de falla para un bordo con recubrimiento de rocas, obtenido con Geostudio.

En cuanto al cálculo de la socavación para diferentes rugosidades, pudo notarse que un cálculo con la rugosidad correspondiente a cada perímetro mojado revela socavaciones excesivas que resultan poco confiables por lo que se recomienda utilizar la rugosidad compuesta de manera general en cauces angostos y definidos ya que la rugosidad compuesta en cauces anchos tiende a tomar el valor de la rugosidad del cauce (ver ejemplo 7).

9.1.3 EJEMPLO 3

Se tiene un bordo para el cual se desea colocar una cubierta vegetal como opción ecológica para evitar la socavación en un bordo de meandro y se desea analizar la estabilidad del bordo para estas condiciones.

La alternativa utilizada más comúnmente como recubrimiento vegetal ha sido el césped, sin embargo para la elección de la cubierta siempre es recomendable colocar un tipo de vegetación característica de la zona que permita el desarrollo de la planta. En este ejemplo por facilidad, se elegirá el césped y su colocación se hará como se muestra en la figura 9.12.

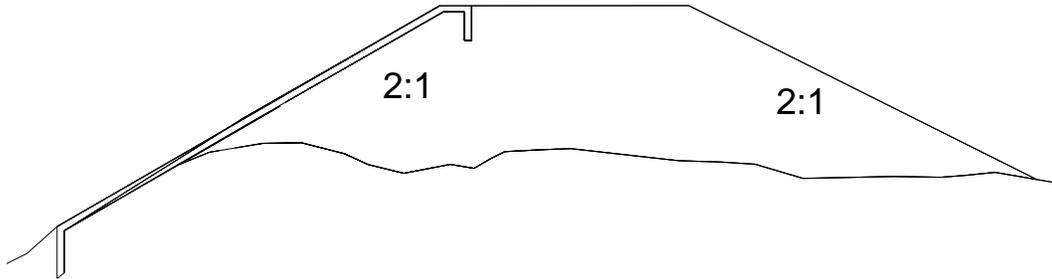


Figura 9.12. Características de colocación del ejemplo 3.

Las condiciones en que trabaja son las siguientes

$Q_d=700 \text{ m}^3/\text{S}$

$V=2.3 \text{ m/s}$

$S=0.00025$

$P_1= 51 \text{ m}$

$P_2=12.41 \text{ m}$

$n_1=0.02$, CAUCE ARCILLOSO

$n_2=0.075$, rugosidad seleccionada de acuerdo con las tablas para seleccionar la rugosidad proporcionadas por Chow

Rogger Mattos en su libro “pequeñas obras hidráulicas”, recomienda que la aplicación del césped se realice sobre una membrana geotextil alveolar en donde se tienen celdas que permiten la colocación de suelo vegetal y da flexibilidad al geotextil. Este filtro-membrana está construido de material semirrígido y permeable que favorece el paso de agua pero no del suelo. Este tipo de recubrimiento tiene como finalidad evitar la socavación con el crecimiento de pasto conociendo que este tiene una alta rugosidad y disminuiría la velocidad del flujo.

Los alveolos del filtro geotextil, son rellenados con suelo vegetal y semillas de césped como los mostrados en la figura 9.13. Se sugiere utilizar como base del filtro geotextil otra malla que brinde estabilidad mientras se produce el crecimiento de la vegetación.

En la zona andina de América este tipo de alveolos puede rellenarse de concreto obteniendo con ello una colcha como las vistas en este trabajo.

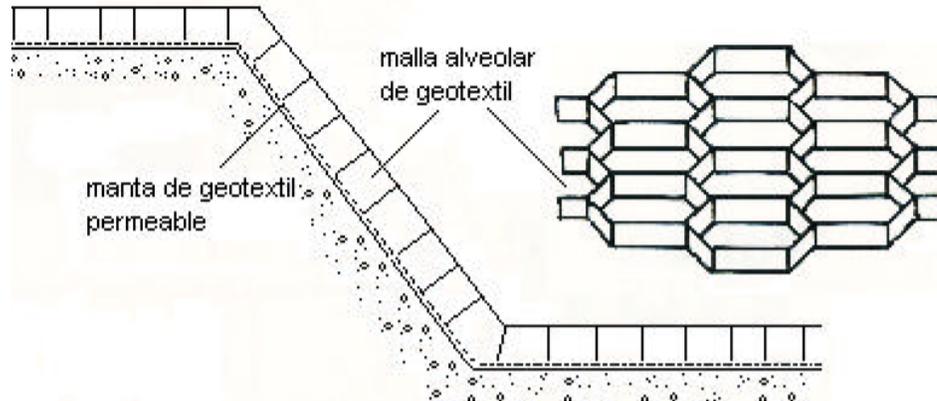


Figura 9.13. Protección superficial con malla alveolar Geotextil, (Maltos, 1999)

a) Análisis de flujo interno

Como se vio anteriormente las recomendaciones para la colocación de una cubierta vegetal, es que se coloque previamente una malla geotextil y sobre esta un filtro de material similar. De esta manera, el geotextil utilizado puede ser el mismo de ejemplos anteriores (Feltrex G-70) y el comportamiento de las líneas de flujo en el interior del bordo serían semejantes a las que se observan a lo largo de estos ejemplos; sin embargo, el gasto de filtrado que podría obtenerse quedaría en función de la conductividad hidráulica que se pudiera asociar al recubrimiento; este tipo de datos pueden ser obtenidos de pruebas de campo o estudios de laboratorio para diferentes tipos de vegetación, también debe analizarse el efecto que producen las raíces en el cuerpo del bordo donde a primer instancia podría pensarse que favorezcan la filtración de agua, y para casos de vegetación; con profundidad radicular grande se podría generar una falla por tubificación.

b) Estabilidad de talud

De la misma forma que para el análisis de flujo interno el comportamiento del talud en estos podría esperarse que fuera similar, ya que la protección que evita el movimiento del material es el geotextil, con la diferencia de que el peso volumétrico cambia, en este caso el peso volumétrico del suelo vegetal con el que son rellenados los alveolos corresponde a un material arcilloso de menor peso que favorecería a la estabilidad ante el posible deslizamiento del talud, sin embargo el análisis no puede ser realizado únicamente con estos datos ya que las condiciones de flujo interno influyen también en la estabilidad del talud.

A favor del recubrimiento con cubierta vegetal se podría esperar que las raíces proporcionaran un mejor agarre del suelo impidiendo un deslizamiento de material.

c) Comportamiento del recubrimiento

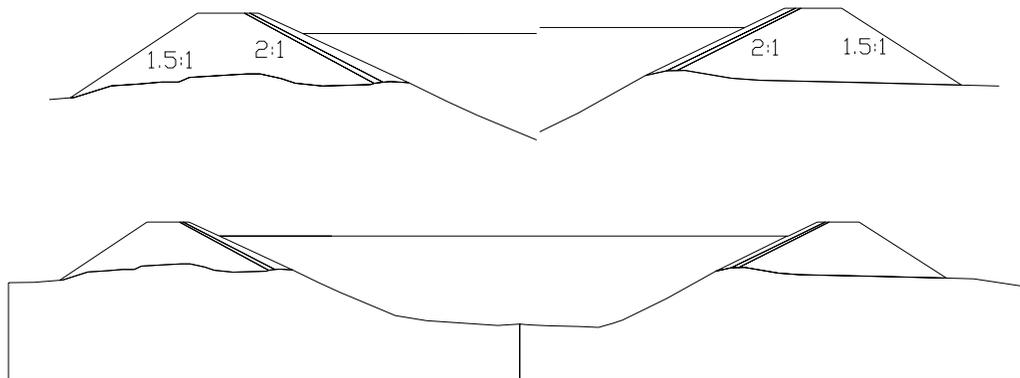
Como se mencionó anteriormente el comportamiento del recubrimiento presenta características similares a las de los ejemplos realizados en este trabajo que cuentan con un recubrimiento acompañado de geotextil.

d) Estado posterior a la socavación

Para el análisis de la socavación se utilizó una rugosidad equivalente, al hacer el cálculo de ésta pudo notarse que la rugosidad final resulto mucho mayor que la de cualquiera de los ejemplos que se muestran en este trabajo. Uno de los propósitos del uso de recubrimiento vegetal consiste precisamente en aumentar la rugosidad para disminuir las velocidades de flujo y evitar con esto que se produzca la socavación; y esto en un primer análisis podría considerarse favorable, sin embargo; debe tomarse en cuenta que los bordos son construidos para aumentar la capacidad de conducción del cauce ante un avenida, el aumentar la rugosidad de un tramo si disminuye la velocidad que lleva el flujo pero a consecuencia de esto también disminuye la capacidad de conducción que al ser lo suficientemente drástica ocasionaría un remanso aguas arriba elevando los niveles del agua produciendo un riesgo de falla por desbordamiento.

9.1.4 EJEMPLO 4

Se desea analizar los bordos ubicados en la zona recta de un cauce definido. Los bordos están construidos en su cuerpo con arcillas y cuentan con una capa de material de transición (arcillas y arenas) y una capa externa de enrocamiento para proteger al bordo de la socavación. No se tienen sondeos del río, por lo que se analizará para material compuesto de arcilla arenosa en el bordo derecho y de arcilla limosa en el lado izquierdo. Las características geométricas e hidráulicas se muestran en la figura 9.14.



$P1=6.87\text{m}$ $B=48.56\text{ m}$
 $P2=38.14\text{ m}$ $A=247\text{ m}^2$
 $P3=6.81\text{ m}$ $Qd=500\text{ m}^3/\text{s}$
 $n1=0.037$ $V= 2\text{ m/s}$
 $n2=0.011$ $s=0.00019$
 $n3=0.037$

Figura 9.14. Características del ejemplo 4.

a) Comportamiento del recubrimiento

Las líneas de flujo observadas, muestran que el trayecto del agua en los bordos cambia significativamente a pesar de que estos estén construidos con el mismo material en su cuerpo, el bordo izquierdo mantiene una línea de flujo baja ya que las arcillas limosas actúan plásticamente

impidiendo el libre paso del agua de la misma forma que en el cuerpo del bordo, es por eso que las líneas de corriente pasan por el bordo y siguen una trayectoria similar en el material de los márgenes, el gasto de filtrado también es mucho menor para este caso que para el de cauce arcillo arenoso. Las condiciones de diseño para la estabilidad de talud son muy parecidas, sin embargo para producir la falla del bordo izquierdo (cauce arcillo limoso) el momento activante debe ser mucho mayor que para el bordo desplantado en un cauce con contenido granular. En el bordo derecho, se observa que las líneas de flujo transitan más libremente en el material del cauce lo cual resulta poco favorable al aumentar el riesgo de falla por tubificación.

b) Estado del bordo posterior a la socavación

El gasto de filtrado obtenido para el bordo izquierdo fue prácticamente igual que al que se obtuvo en las condiciones de diseño, por otro lado el gasto que se filtra en el bordo derecho mostró un ligero aumento solo por estar ubicado en un bordo con contenido granular. La trayectoria de las líneas de flujo no tuvo gran diferencia en cuanto al comportamiento inicial, sin embargo en el bordo derecho se observó un descenso de la línea superior de flujo lo cual puede explicarse al observar que la socavación favorece al filtrado y a la expulsión del flujo en el talón del bordo. El comportamiento de éstas en el bordo izquierdo no presentó variación significativa.

En apariencia, el factor de seguridad obtenido después de la socavación resultó ser mayor en el bordo derecho, pero puede notarse que el material deslizado corresponde al ubicado en la transición, el volumen es poco, y requiere un momento activante menor que el requerido en el bordo izquierdo, la falla de este último sería más perjudicial pero es menos probable que ocurra debido a la magnitud del momento activante requerido. Por otra parte, la pequeña falla en el bordo derecho ocasionaría que este perdiera su protección contra la socavación y lo volvería más vulnerable ante ésta.

c) Posibles variantes

De ejemplos con pequeños cambios en sus características se observó lo siguiente

Bordo en zona de meandro con material del cauce predominantemente granular

Este bordo se diseñó con material arcilloso en su cuerpo y en su talud mojado con una transición de material arcillo arenoso y enrocamiento. Pudo observarse que el comportamiento de la línea de flujo superior fue similar al observado en ejemplos que tienen únicamente enrocamiento (ver figura 9.15), y el gasto de filtrado se observa un poco mayor que al de otros ejemplos, con lo cual podría esperarse que el material de transición ayudara a que el agua se infiltre en el cuerpo de éste. En cuanto al factor de seguridad de diseño del talud se nota que el deslizamiento más desfavorable se encuentra en la transición y enrocamiento; de esta forma se concluye que una transición en el recubrimiento lejos de favorecer la estabilidad del bordo lo perjudica, por lo que debe evitarse esta situación.

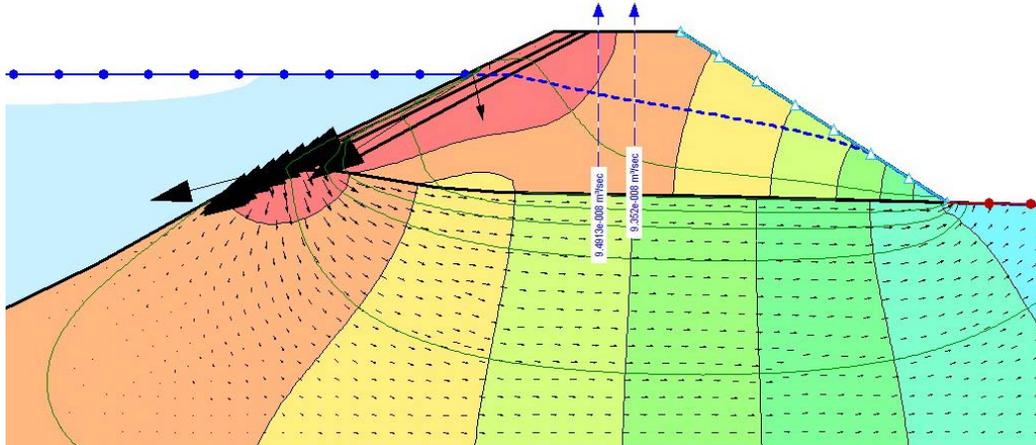


Figura 9.15. Red de flujo para un borde desplantado en un cauce granular.

Para una socavación máxima calculada de 3.16 m, el arrastre de material del enrocamiento fue poco, en parte porque se encuentra a poca profundidad y porque las condiciones de análisis no representaban un comportamiento agresivo. Las condiciones de flujo interno no variaron significativamente ya que el borde se mantuvo casi igual a sus condiciones de diseño. La estabilidad del talud posterior a la socavación disminuyó quedando en un valor de 1.1, lo cual puede indicar que el borde se mantiene en pie pero que estaría trabajando en condiciones límite y que al primer cambio podría fallar; el volumen de deslizamiento esperado corresponde a un volumen bajo que estaría conformado principalmente por el enrocamiento.

9.1.5 EJEMPLO 5

Se requiere analizar una sección recta de un río de material predominantemente cohesivo. En el margen derecha el cuerpo del borde se construyó de arcilla limosa, en el lado izquierdo se utilizaron arcillas simples además fue colocado un recubrimiento de flexocreto y geotextil G-70 (Feltrex) asegurados en la corona de ambos bordos, el flexocreto se diseñó para cubrir completamente el cauce como se observa en la figura 9.16.

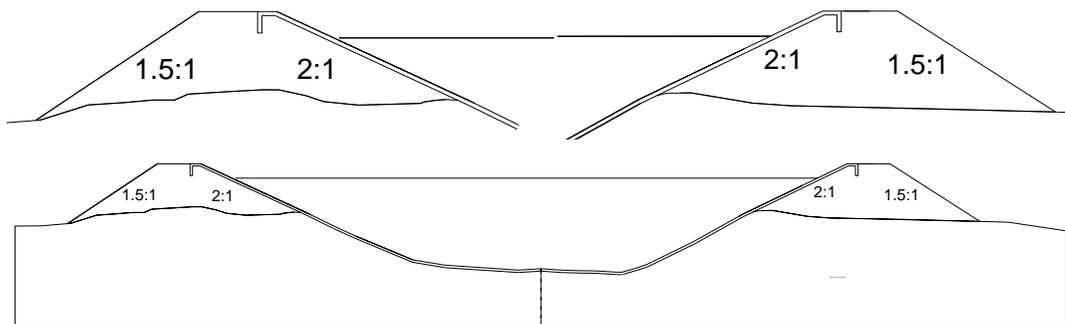


Figura 9.16. Características de los bordos del ejemplo 5

a) Socavación y comportamiento del recubrimiento

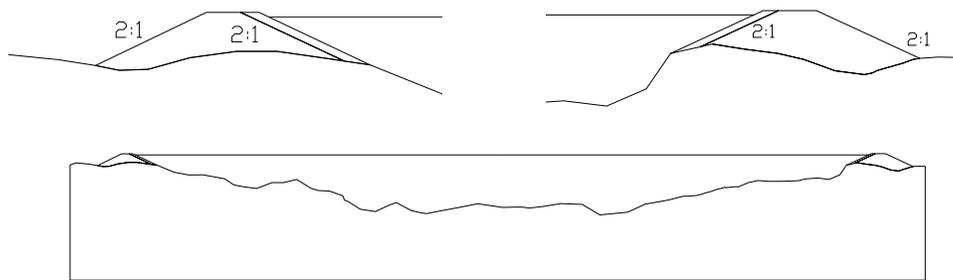
Como se sabe la socavación se presenta en cauces naturales que están expuestos bajo diversos factores, principalmente las características de la corriente y propiedades de los materiales. En este ejemplo en especial, se tiene que el cauce está recubierto con un flexocreto colocado sobre

un geotextil. Como se sabe la colocación de los recubrimientos tienen como finalidad evitar la socavación y mantener al material en su lugar. Bajo estas condiciones podría esperarse que el material que este protegido de esta manera no fuera arrastrado y no se esperaría socavación.

Algunos factores que podrían favorecer a la socavación sería el método de colocación del flexocreto y su colcha al inicio del tramo recubierto y al final de éste por ejemplo, supongamos que se está analizando la sección recta mostrada a continuación; si en la zona donde inicia el tramo recubierto el flexocreto y geotextil no son asegurados correctamente se permitiría el libre paso del agua entre éstos y el material del cauce provocando un arrastre de material que lograría salir al final del tramo, este fenómeno provocaría un hueco para el cual el flexocreto no está preparado por lo que podría romperse y provocar a su vez otro tipo de fallas. Por ello puede concluirse que se puede esperar un buen comportamiento del la colcha y geotextil al ser colocados en todo el cauce pero debe tenerse cuidado en la colocación de éste y en otros factores que pudieran afectar su correcto funcionamiento.

9.1.6 EJEMPLO 6

Se analizarán los bordos ubicados en la zona recta de un río compuesto principalmente por material granular. Los bordos se construyeron de material homogéneo y se cubrieron con enrocamiento como se observa en la figura 9.17.



$P1=4.23m$	$B=127.7 m$
$P2=126.12 m$	$A=835 m^2$
$P3=4.27 m$	$Qd=2555 m^3/s$
$n1=0.037$	$V= 3.1 m/s$
$n2=0.017$	$s=0.00028$
$n2=0.037$	

Figura 9.17. Características del ejemplo 6.

a) Comportamiento del recubrimiento

De la misma forma que en los casos anteriores se pudo observar en la línea superior de flujo que el enrocamiento permite en paso libre del agua hacia el cuerpo del bordo, sin embargo al ser este de arcillas de alta plasticidad el movimiento más marcado del flujo se localiza a través del material del río (Predominantemente granular). Este comportamiento es similar en ambos bordos.

b) Estado del bordo posterior a la socavación

La socavación máxima observada para este ejemplo fue de 7.70 m, y se presentó con una velocidad de 3.1 m/s, estas velocidades son soportadas por grava gruesa y material de mayores dimensiones.

Una vez analizadas las condiciones de trabajo posteriores a la socavación se observa que la línea de flujo superior en el bordo izquierdo descendió, por lo que el bordo trabajo con una menor saturación sin embargo podría esperarse que la diferencia de gasto se filtre en la base del bordo como describen los vectores, con esto el cuerpo del bordo trabajaría mejor pero sería aun más vulnerable ante una falla por tubificación en su base, por otra parte el factor de seguridad ante deslizamiento con el que fue diseñado el terraplén fue de 1.6, éste se vio disminuido en una decima después de la socavación por lo que aun cumpliría con la estabilidad, sin embargo resulta útil observar que el material perdido por la socavación fue el que se tenía en el pie del bordo y se consideró que el resto del material no se veía afectado y mantenía su posición inicial, la lógica nos indicaría que el material localizado por encima se desliza logrando cubrir el pie del bordo y disminuyendo su espesor, esto ayudaría a que el comportamiento fuera más parecido al de diseño. Si se compara el comportamiento de este bordo con el de otro similar se observa que la falla por deslizamiento se espera en el enrocamiento y con volúmenes pequeños (ver ejemplo 3), de esta manera podría creerse que la estabilidad de talud de este ejemplo es favorable aún después de la socavación.

Por otro lado el bordo derecho presenta un comportamiento interesante; mientras ambos bordos se diseñaron con el mismo tipo de material y taludes iguales, el bordo derecho cumplió y sobrepasó el factor de seguridad de diseño, mientras que el derecho con las mismas características no lo logró, la razón de esto es el cauce tenía una batimetría muy desfavorable en esta zona (talud casi vertical) y este disminuyó la estabilidad de diseño (este bordo en tierra firme estaría sobre diseñado), por esta razón resulta de suma importancia conocer la configuración del cauce y tenerla presente al momento del diseño. Para el diseño del bordo derecho debió considerarse primero la configuración esperada en el fondo del cauce para poder elegir la distancia a partir de la cual se debió construir el bordo. El análisis de estabilidad, al igual que en el ejemplo anterior, se llevó a cabo considerando que el material que no era arrastrado permanecía en su lugar, sin embargo las condiciones observadas después de la socavación muestran que este material se deslizaría al fondo del cauce dejando completamente descubierto al material arcilloso del bordo. El factor de seguridad ante deslizamiento posterior a la socavación aumentó debido a que se presentaron condiciones más favorables en la batimetría del cauce que contribuyeron a la estabilidad del bordo. Para concluir se puede decir que el diseño de los bordos debe efectuarse conociendo las características y comportamiento del cauce; con ello se reduciría el riesgo de falla y podría obtenerse un mejor funcionamiento en ellos.

9.1.7 EJEMPLO 7

Se necesita analizar los bordos de un cauce indefinido de material predominantemente granular en una zona recta. Los bordos se construyeron de arcilla y en su talud mojado se colocó un flexocreto y geotextil G-70 (feltrex). La colcha se colocó anclada a 1.8 metros de profundidad, en una zanja excavada metro y medio para el bordo derecho y excavada a una profundidad de 1 metro en el bordo izquierdo, la geometría y características hidráulicas se observan en la figura 9.18.

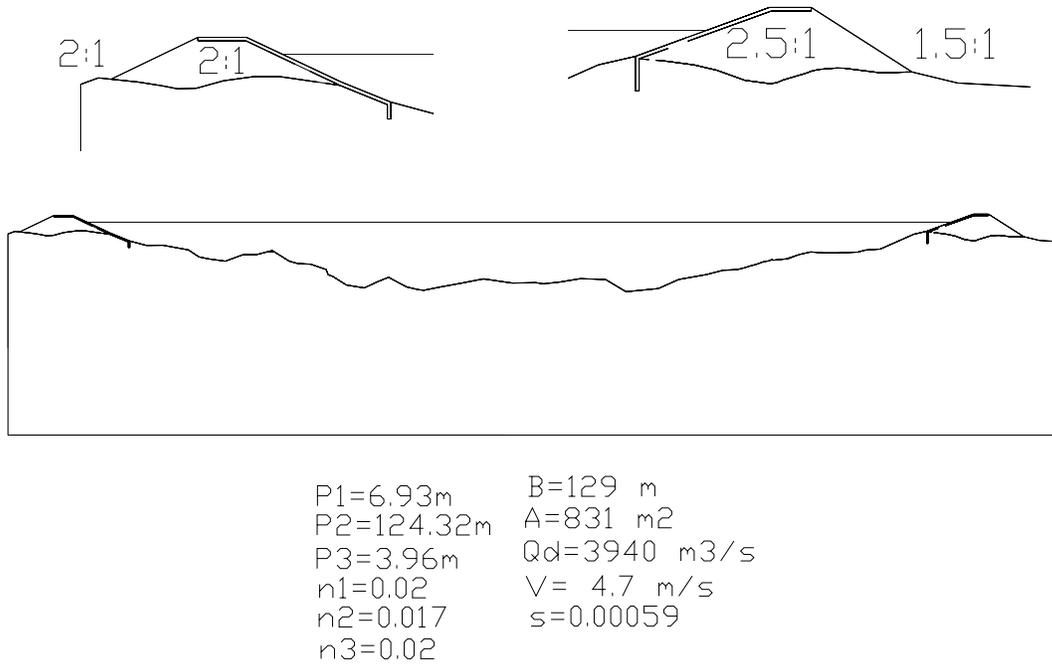


Figura 9.18. Características de los bordos del ejemplo 7.

a) Comportamiento del recubrimiento

Por tratarse de un cauce indefinido sumamente amplio, los bordos no son de gran altura, se analizaron para una velocidad bastante alta correspondiente 4.7 m/s. La socavación esperada para más de un metro de profundidad mostró resultados de hasta más de 14m de socavación en las zonas más profundas del cauce. Para velocidades tan altas y tratándose de un material granular el anclaje de los flexocretos no resulta suficiente pero en este tipo de cauces y debido a la velocidad tan alta podría esperarse que existiera un arrastre de sedimentos o movimiento del material de fondo que lograra cubrir a la colcha proporcionando un poco más de estabilidad. La condición más desfavorable es decir la socavación sin arrastre de material es la que se analiza a continuación.

Debe comentarse que la ecuación propuesta por Maza para el cálculo de la socavación en cauces, debido a sus características no permite calcular socavaciones para tirantes menores o iguales a 1 metro ya que los resultados indican una elevación del nivel del cauce en lugar de una socavación.

b) Estado del borde posterior a la socavación

La trayectoria de las líneas de corriente no cambian significativamente al perderse el anclaje del fexocreto, sin embargo el gasto de filtrado aumenta ligeramente, también puede observarse que el gasto de filtrado es mucho mayor en el borde de la derecha que en el de la izquierda, esto puede atribuirse a que en el primero el recubrimiento solamente cubre el cuerpo del borde y no está desviando el flujo lo suficientemente lejos de la base, como sucede en el borde izquierdo. La socavación puede ser menor si se espera un arrastre de sedimentos o movimiento del material en el fondo como se mencionó antes, sin embargo si no se considera esto el factor de seguridad y la estabilidad de los bordos se ve sumamente afectada.

c) Posibles variantes

De ejemplos con pequeños cambios en sus características se observó lo siguiente

Colcha colocada con zanja y relleno

A diferencia de los resultados obtenidos al colocar también zanja y relleno en el Ejemplo 1, este no disminuyo la elevación de la línea superior de flujo (ver figura 9.19), esto puede explicarse ya que el material del cauce es predominantemente granular. Si se compara el gasto de filtrado en el cuerpo del borde no varía en gran manera respecto al gasto de filtrado observado para el mismo ejemplo) la colocación del recubrimiento en zanja resulta favorable al desviar las líneas de corriente del cuerpo del borde y funcionar como barrera impermeable (semejante a las tablestacas).

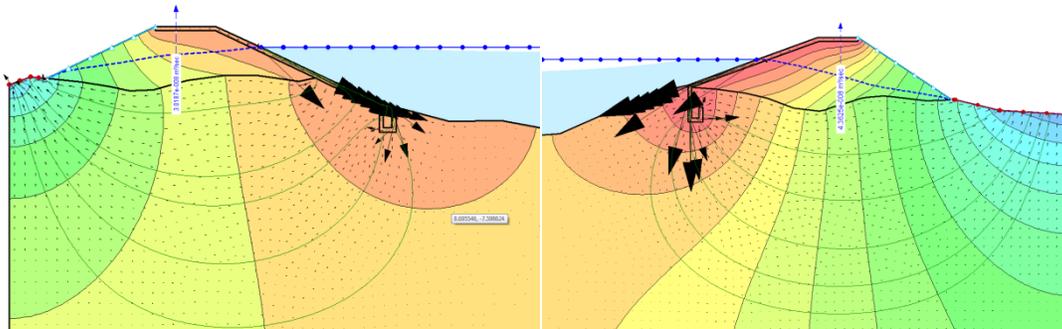


Figura 9.19. Redes de flujo para Bordos con zanja de anclaje en el cauce, obtenidos con Geostudio.

Los círculos de falla esperados para en el diseño de los bordos reflejan un deslizamiento interno a la colcha por lo que para esta situación se considera favorable que el recibimiento quede colocado a lo largo de la corona (ver figura 9.20).

Para un gasto de $2210 \text{ m}^3/\text{s}$ y sus respectivas velocidades de 2.7 m/s se obtuvo que la socavación calculada no afecta notablemente al borde derecho, esto puede deberse a que la zanja de apoyo se encuentra a poca profundidad del cauce en la zona donde no puede calcularse con certeza la socavación debido a las características de las ecuaciones utilizadas.

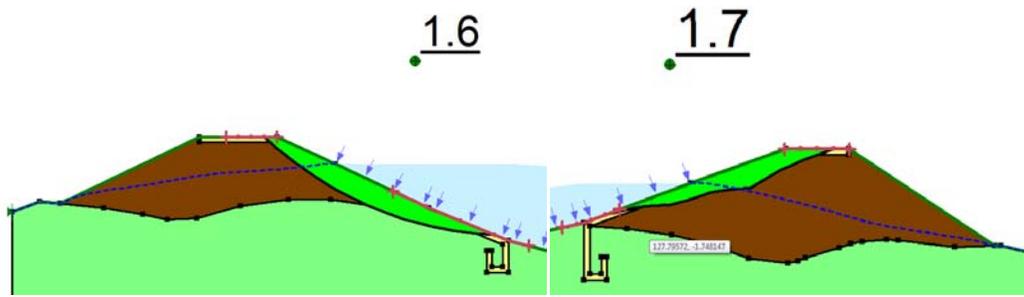


Figura 9.20. Factores de seguridad y círculos de falla para bordos con zanja de anclaje en el cauce, obtenidos con Geostudio.

Los factores de seguridad posteriores a la socavación que (ver figura 9.21), muestran que la seguridad del talud se reduce notablemente para ambos casos siendo el más severo el del lado derecho a pesar de haber sido diseñado con un talud menos pronunciado para el mismo material, el motivo de este comportamiento se puede atribuir a que el borde resulta más afectado por las condiciones de flujo interno que en el borde izquierdo. A manera de conclusión se puede decir que la colocación del recubrimiento determina en gran manera el comportamiento del borde y la estabilidad del mismo, una colocación deficiente, un mal método de colocación y una mala determinación de las magnitudes de los mismos puede perjudicar a la estructura.

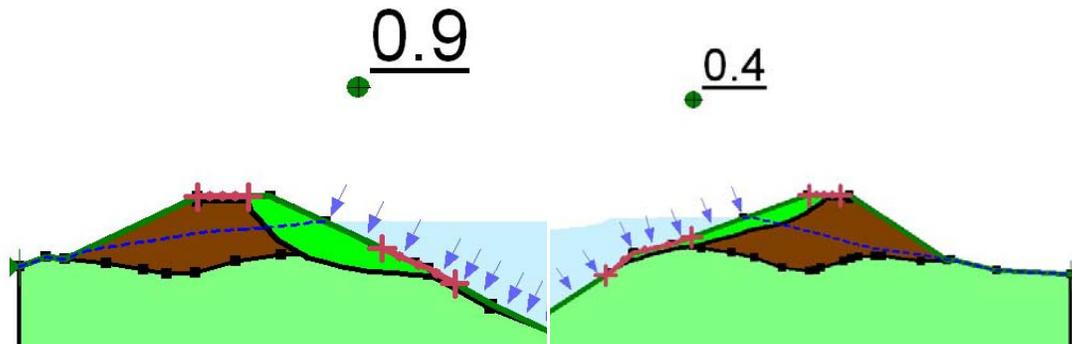


Figura 9.21. Factores de seguridad de bordos con zanja de anclaje obtenidos después de la socavación

10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las condiciones de funcionamiento de los bordos resultan infinitas, y los ejemplos que se presentan aquí son solamente algunos casos que se pueden presentar. Estos ejemplos se crearon para tener una idea del comportamiento de los recubrimientos y características de funcionalidad por lo que resultan útiles para proponer un tipo de colocación de recubrimientos y con base en esto iniciar el análisis bajo las condiciones particulares del proyecto.

Dentro de los ejemplos analizados se observó que es mucho más representativo el resultado obtenido del comportamiento de la socavación del cauce al utilizarse rugosidades equivalentes que el uso de las rugosidades de cada uno de los perímetros mojados y que la rugosidad equivalente se sugiere únicamente para los casos de cauces bien definidos (ríos de montaña), y de dimensiones pequeñas puesto que el cálculo de la rugosidad equivalente en cauces anchos tiende al valor de la rugosidad del cauce por necesitar bordos pequeños para aumentar su capacidad de conducción.

Los recubrimientos vegetales presentados como una opción ecológica, presentaron buenos resultados en la socavación pero se observa en ellos una disminución de la capacidad de conducción del río, lo que podría producir un remanso y desbordamiento aguas arriba de la estructura. No fue posible realizar un análisis más detallado del comportamiento del recubrimiento bajo condiciones de flujo interno y estabilidad de talud, puesto que para ello es necesario llevar a cabo estudios e investigaciones que ofrezcan las conductividades hidráulicas que se presentan en el material de la cubierta vegetal y en el cuerpo del bordo. También resulta importante realizar estudios que permitan conocer el efecto que tienen las raíces dentro del cuerpo del bordo puesto que éstas pueden ayudar a la estabilidad del talud pero favorecer la falla por tubificación. Por estos motivos puede pensarse que este tipo de recubrimientos sigue sin representar una posibilidad viable hasta que no se conozcan todas las condiciones que intervienen en él y por necesitar además de una colocación complicada y un costo alto al necesitar doble malla geotextil durante el crecimiento de la vegetación.

Los análisis realizados para bordos que incluían material de transición resultaron desfavorables, ya que se observó que los volúmenes de fallas y sus correspondientes círculos se ubicaban en la zona de éste material y deslizaban casi toda la transición dejando vulnerable al bordo ante la socavación.

La realización de levantamientos batimétricos resulta indispensable para realizar un buen diseño de los bordos ya que la realización de un diseño de bordo sin conocer las condiciones del cauce puede disminuir notablemente la estabilidad del bordo o producir su colapso aunque éste este sobre diseñado en sus taludes.

Las socavaciones calculadas en los márgenes de cauces anchos resultaron muy favorables, sin embargo se sugiere realizar estudios que permitan proponer una ecuación para calcular la socavación en tirantes pequeños y así tener resultados más confiables para este tipo de bordos.

Se recomienda también llevar a cabo análisis como los vistos en este trabajo y analizarlos bajo un régimen turbulento que correspondería a un comportamiento mucho más semejante al que se presenta en el caso de avenidas y podría proporcionar información sobre las fallas debidas a vaciados y llenados rápidos.

Las especificaciones proporcionadas por el fabricante muchas veces resultan ~~resultaron~~ insuficientes y poco precisas, depende mucho del criterio del proyectista, por lo que se concluye que tanto para tapetes y colchas, como para enrocamientos, es necesario llevar a cabo los estudios de hidráulica fluvial, así como de geotecnia que garanticen un buen funcionamiento y además permitan proponer la mejor colocación de sus recubrimientos.

La propuesta de la colocación de una parrilla de acero unida a los tapetes y rellena con concreto reforzado, sugiere una mejor estabilidad del recubrimiento, pero es indispensable analizar más detenidamente esta condición y llevar a cabo, para esto, un análisis semejante al utilizado en las pilas de puentes donde la socavación resulta más severa en los límites de las estructuras.

Los mejores resultados obtenidos para la estabilidad de talud fueron los correspondientes a bordos pequeños, y a los grandes con enrocamiento en su paramento mojado, por lo que se concluye que siempre es preferible la colocación de éstos; sin embargo, el uso de enrocamiento no siempre es posible debido principalmente a que su colocación implica altos costos, que inician desde la extracción del material, el transporte de éstos, hasta su colocación. Por otro lado no siempre es posible colocar enrocamiento puesto que las condiciones del cauce no siempre permite el paso de vehículos hasta el sitio de construcción del bordo; por eso en algunas ocasiones se prefiere la colocación de los flexocretos o tapetes flexibles que además de representar un fácil manejo, resultan de menor costo que los enrocamientos. Se sugiere que para condiciones donde en donde las colchas o tapetes no pudieran funcionar bien y no se pudiera transportar el material en camiones, se llevara a cabo un estudio de factibilidad en donde se analice el uso de enrocamiento colocado manualmente respecto a los beneficios que se pueden esperar ya que esta alternativa que presenta aún mejores ventajas que las obtenidas para enrocamientos colocados con camión de volteo.

El programa Geostudio, representa una herramienta útil para el análisis de los bordos y se encuentra a disposición de todo el público en la versión de estudiante que puede ser descargada desde la página <http://www.geo-slope.com/products/>, su uso es relativamente sencillo, sin embargo debe tenerse cuidado de conocer bien los valores que se introducen para su análisis y de los análisis mismos ya que los resultados son muy sensibles. Aunque este programa es capaz de calcular la estabilidad de los taludes y redes de flujo, debe utilizarse un criterio propio para la ubicación de la zona donde se desea conocer la falla, por lo que el programa por sí mismo no puede proporcionar resultados y éstos pueden variar de un proyectista a otro.

Finalmente debe resaltarse la importancia analizar todos los factores que intervienen en los bordos y en todo tipo de proyecto, muchas veces el proyectista se enfoca únicamente en un área para realizar un análisis y descuida el resto sin tomar en cuenta que las estructuras pueden quedar expuestas a otras fuerzas que deben considerarse dentro del diseño, por eso se concluye que una obra de ingeniería civil debe realizarse de manera íntegra, para poder garantizar un correcto diseño y funcionamiento de las mismas.

11. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aldama A., et al, (2000); **Protección y Control de Cauces**, Manual, CNA-IMTA , UNAM. México DF.
- Biedenharn D., et al, (1997). **“The WES Stream Investigation and Stream bank Stabilization Handbook”** U.S. Army Engineer, Waterways Experiment Station (WES) Vicksburg, Mississippi.
- CNA-IMTA. (2000). **“Protección y Control de Cauces”**. Subdirección General de Operación Gerencia de Estudios y Proyectos de Infraestructura Hidroagrícola, Subgerencia de Operación, Editores: Moisés Berezowsky Verduzco, Reynaldo Vilchis Vilchis. México.
- Chow, V.T. (1994). **Hidráulica de canales abiertos**. McGraw Hill, Santa Fé de Bogotá, Colombia.
- CONAGUA (2002), **Inventario Nacional de Obras de Protección Contra Inundaciones en Cauces Naturales**, Inventario CONAGUA por encargo a SEMARNAT, México DF.
- Franco V et al, (2009) **Estudio Inundaciones en México**. Estudio, IINGEN por encargo de Fundación Gonzalo Río Arronte, México DF.
- Fuentes M. O., Franco, V. **Estudio Hidrológico para Obras de Protección**, UNAM, 1999, Series del Instituto de Ingeniería, Publicación 613. México DF.
- García M., Maza J. (1997), **Inicio de Movimiento y Acorazamiento**, Capítulo 8 del Manual de Ingeniería de Ríos, Serie IINGEN, UNAM, México DF.
- Garde R. J. Ranga Raju K. G., (2006). **Mechanics of sediment Transportation and alluvial stream problems**. New Age International Publishers. Third Edition. New Delhi.
- Gilberto Sotelo Ávila.(2009) **Hidráulica de canales**. División de Ingenierías Civil y Geomática. Departamento de Hidráulica. México DF.
- Juárez E., Rico A. (1997). **Mecánica de suelos, teoría y aplicaciones**. Tomo II y III, Ed. Limusa, México 1979. México.
- Marsal R., Resendiz D. (1975). **Presas de tierra y enrocamiento**, editorial Limusa, México.
- Maza J., Franco V., (1997), **Obras de protección para el control de inundaciones**, Capítulo 15 del Manual de Ingeniería de Ríos, Serie IINGEN por encargo de CONAGUA, UNAM, México DF.
- Maza J.A. (1968). **Socavación en Cauces Naturales**. Publicación 117, Serie azul del Instituto de Ingeniería UNAM. México.
- Ramachandra A.R., Hamed K. H. (2000). **Flood Frequency Analysis** CRC Press, Estados Unidos.
- Ramirez A. et al, (2004), **Fascículo Inundaciones**, CENAPRED, México DF.
- Solís J. (2007). **“Análisis beneficio/costo de obras de protección contra inundación, tramo del río Alseseca en la colonia Hacienda”** Tesis de Maestría en Gerencia de Proyectos de Construcción. Universidad de las Américas Puebla. Cholula Puebla, México.

Sowers G. y G.F. Sowers. (1994). **Introducción a la Mecánica de los Suelos y Cimentaciones**. Limusa. México.

Téllez C, Franco V. (2010). **Nociones de Estabilidad de Cortinas**. Tesis de Licenciatura, FI, UNAM, México DF.

Vide M. (1984). **Ingeniería de Ríos**. AlfaOmega, Ediciones UPC, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.

Páginas electrónicas

Diario Hoy, Noticias del Ecuador y el mundo (2008), **Lluvias afectan Orellana, Napo y Pastaza**. Ecuador. Disponible en: <http://www.hoy.com.ec/noticias-ecuador/lluvias-afectan-orellana-napo-y-pastaza-2-307715.html>.

EPS, Erosion Protection Systems. (2011) **Grout Filled Mattress Specialists. Design. Supply. Installation**. Australia. Disponible en: http://www.erosionps.com.au/images/stories/eps_brochure-2.pdf

Geomatrix, Soluciones de alta tenacidad, Bogotá Colombia, Formaleta Textil, Colchreco FP.Colombia. Disponible en: <http://www.geomatrix.com.co/content/view/full/248>

Hydrotex (2001). **Construction & Quality Control Manual. Manufactured by Geostar Corporation**. Hydrotex, Hydrocast, Filter Band, and Enviromat are trademarks of Geostar Corporation. Atlanta Georgia, USA. Disponible en: <http://www.hydrotex.com/hyqcman.pdf>

Ingeniería civil. Proyectos y apuntes Teórico-prácticos de ingeniería civil. (2010). **Construcción de la red de flujo cuadrada**. Disponible en: http://www.ingenierocivilinfo.com/2010_09_01_archive.html

Lemac Gaviones (1997), **Manual de Gavion, Parte 4**, México. Disponible en: <http://www.lemac.com.mx/manualgavion/manual-parte3.PDF>

Lewis W. (1988). **Análisis de contaminación de las aguas subterráneas por sistemas de saneamiento básico**. Disponible en: <http://www.bvsde.paho.org/eswww/fulltext/repind46/analisis/analisis.html>.

Mattos, R. (1999). **Pequeñas obras hidráulicas**. Ed. Internet , Uruguay. Disponible en: <http://www.unesco.org.uy/phi/biblioteca/handle/123456789/486>

Suarez J. (2008). **Suelo residual de dunita el cual conformaba el talud fallado**. Colombia. Disponible en: <http://rainfallandslidescolombia.blogspot.com/2008/11/parte-ii.html>.

Sub Marelher, S. DE R.L. DE C.V. (2001). **Tapetes de concreto flexibles**. México. Disponible en: <http://www.grupoelher.com>.

TravelPod (1998). **More Jetty Jacks**. Disponible en: <http://blog.travelpod.com/travel-photo/ktkingunc/1/1247774738/more-jetty-jacks.jpg/tpod.html>

UIS, Universidad Industrial de Santander. Open Course Ware.(2001) **Estabilidad de taludes**. Bucaramanga, Colombia. Disponible en: http://ocw.uis.edu.co/ingenieria-civil/estabilidad-de-taludes/clase-4/Factores_de_seguridad_Equilibrio_limite.PDF

UPC, Universidad Politécnica de Cataluña (2002-2004). **Stability Analysis**. Cataluña España.. Disponible en: <http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/6444/6/05.pdf>

APENDICE A. RESULTADOS DE LOS EJEMPLOS NUMÉRICOS

EJEMPLO 1

Análisis de flujo interno para diseño del bordo

Para conocer la trayectoria de flujo a través de los terraplenes se utiliza el programa SEEP/W de Geostudio.

Como se conoce la geometría y características de los materiales puede conocerse el factor de seguridad más desfavorable utilizando el programa GeoStudio con el análisis de SLOPE/W, sin embargo como se mencionó anteriormente en el subcapítulo 5.3 para el análisis de taludes en el programa se necesitan conocer las líneas de flujo. Para comenzar con el análisis se definen las regiones en el programa AutoCad manteniéndolas en una sola capa, y depurando los elementos que no interesen con la intención de guardar el archivo en formato dxf y poder abrirlo desde el programa Geostudio.

Para realizar lo mencionado anteriormente se abre un nuevo proyecto generado en SEEP/W con un análisis estacionario (steady state) y se selecciona la opción file -> import regions se elige la ruta del archivo de AutoCad generado anteriormente y se abre; así aparecerá una ventana donde se encontraran las capas identificadas de AutoCad, ahí se selecciona la capa deseada, las dimensiones y escala (también es posible simplemente seleccionar la capa y dejar las dimensiones propuestas por el programa), al aceptar la capa de análisis se tendrá ya la sección en Geostudio disponible para asignar las características correspondientes.

Se recomienda colocar la figura centrada y sus ejes de referencia como ese explicó en el subcapítulo 6.5.2.

Una vez importada la región, se definen los materiales. Para conocer las características de los materiales se pueden hacer muestreos en sitios y las correspondientes pruebas de laboratorio que permitan conocer los siguientes datos:

- Modelo del material (Saturado, no saturado o ambos)
- Propiedades hidráulicas (Función de conductividad hidráulica)

En la opción Key In-> materials -> add se selecciona el material agregado para asignar sus propiedades, se da nombre y se elige la opción saturated/unsaturated para el caso de los materiales del bordo, y saturated only para el material del cauce.

Para colocar las funciones de conductividad hidráulica se ocupan los estudios realizados en laboratorio, para este ejemplo se utilizarán los valores más comunes para los tipos de materiales como se muestra en la tabla 9.1.

De esta manera es posible designar la función de conductividad hidráulica introduciendo dato por dato. Para el caso del material que trabaja todo el tiempo saturado solo se introduce el valor de saturación.

Cabe destacar que para la condición de flujo estacionario no es necesario incluir la función de contenido de agua.

En este ejemplo se presentan los siguientes tipos de materiales por lo que se generó cada uno de ellos, y se le asignó una función de conductividad o coeficiente de saturación de acuerdo al tipo de material que se trataba como se muestra a continuación

- Cuerpo del bordo (Arcilla limosa)
- Recubrimiento (colcha)
- Material del cauce del bordo (Arcilla arenosa)

Cada material es asignado en su región del proyecto. Una vez asignados los materiales se definen las condiciones del flujo draw -> Boundary conditions-> keyIn, se selecciona potential seepage Face y se clona una nueva condición a la que se le da nombre de Tirante de avenida.

Las características que se dieron a cada condición son las siguientes

- Zero pressure, (presión atmosférica) Tipo: Press Head
- Potential Seepage Face (línea de posibles filtraciones) Tipo: Total Flux (Q)
- Tirante de avenida (Tirante de gasto de diseño) Tipo: Head. En la opción: action, debe colocarse el valor de la elevación del eje coordenado asignado en GeoStudio que coincide con la línea del tirante de diseño.

Para colocar estas condiciones es necesario contar con una línea base en el caso de las dos últimas, por lo que se debe dibujar una línea auxiliar después, se asignan las condiciones de frontera a cada una de estas líneas.

Para conocer los gastos en una zona en específico, se coloca una sección de control (o las que sean necesarias), en el menú Draw -> Flux Section.

Asignando lo anterior se procede a establecer las dimensiones de mallado Draw -> Mesh Properties y se corre el programa pulsando el ícono de la calculadora.

La trayectoria que sigue el flujo y sus líneas equipotenciales se observan en las imágenes siguientes.

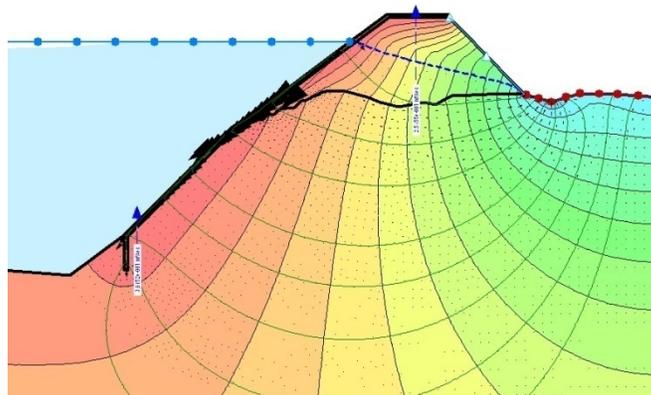


Figura A.1. Red de flujo del ejemplo 1 para condiciones de diseño.

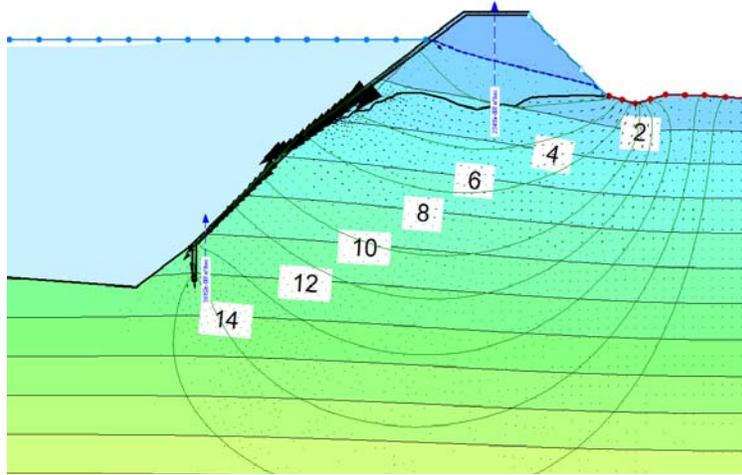


Figura A.2. Caídas de presión del ejemplo 1 para condiciones de diseño.

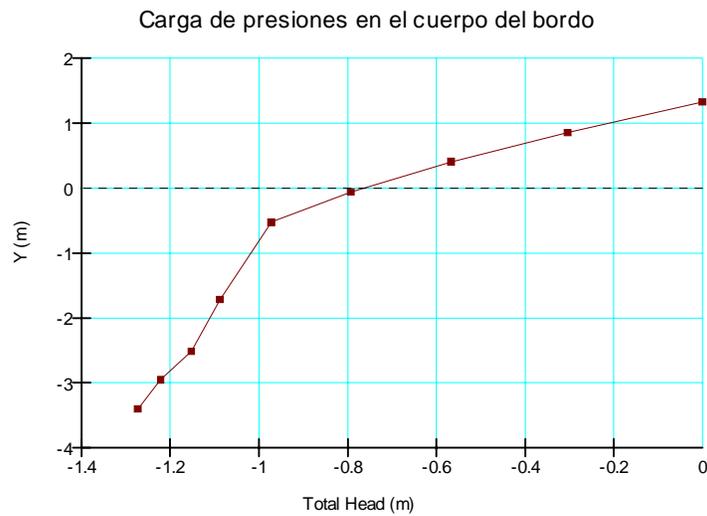


Figura A.3. Grafica Carga de presiones en el cuerpo del borde del ejemplo 1 para condiciones de diseño.

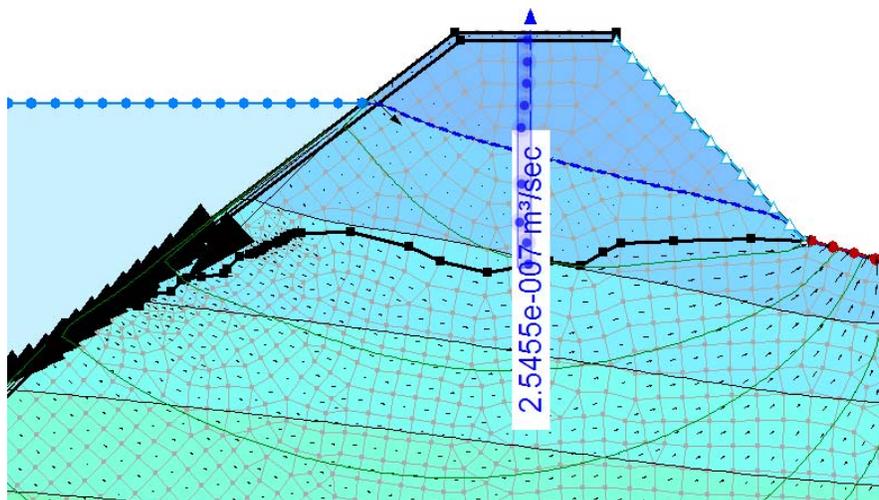


Figura A.4. Gasto de filtrado en el cuerpo del borde del ejemplo 1 para condiciones de diseño.

Análisis de Estabilidad de talud para el diseño del bordo

Con el análisis realizado anteriormente se conoce ya la trayectoria del flujo. Para realizar el análisis de estabilidad de talud en el programa GeoStudio dentro del menú KeyIn Análisis, se selecciona en el lado izquierdo el análisis del flujo realizado anteriormente y se selecciona la opción add-> SLOPE/W analysis -> limit equilibrium. Del lado derecho en la pestaña slip surface, se coloca la condición de deslizamiento de cada sección (left to right o right to left) y se selecciona la opción de entry and exit de la opción de deslizamiento y el tipo de análisis Bishop, Ordinary and Jambu.

Automáticamente aparecerá la geometría de la sección vinculada al análisis anterior por lo que resta colocar las características del material y definir las zonas donde se espera que entre y salga la falla en el menú, draw -> slip surface -> entry and exit como se muestra en la figura A.5.

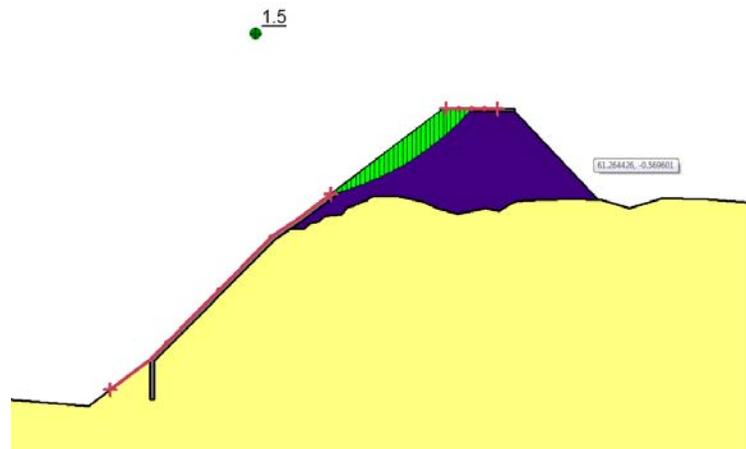


Figura A.5. Círculo de falla y factor de seguridad de bordo del ejemplo 1 para la condición de diseño.

Los resultados obtenidos para el factor de seguridad más desfavorable se muestran a continuación:

Método de análisis:	Bishop
Factor de seguridad:	1.456
Volumen total:	6.0346 m ³
Peso total:	108.61 kN
Momento resistente:	1081.9 kN-m
Momento activante:	743.09 kN-m

Si se desea conocer las fuerzas actuantes en cada una de las dovelas en el menú view -> slice information aparecen cada una de ellas y es posible copiar tanto los diagramas como sus datos como por ejemplo, para la falla mostrada anteriormente en la dovela 24 mostrada en la figura A.6.

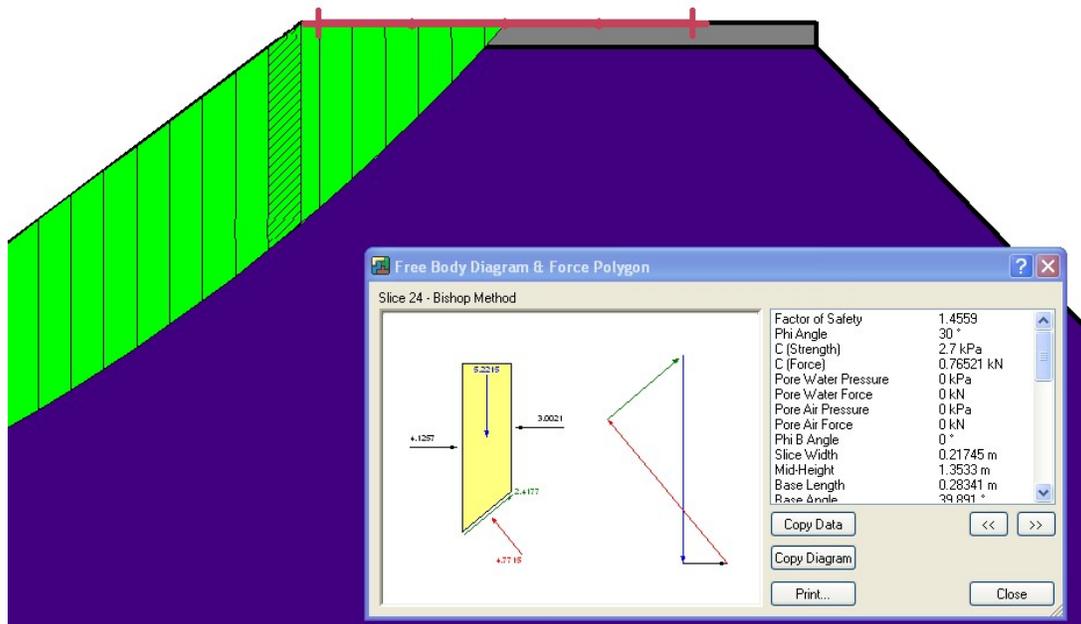


Figura A.6 Diagrama de cuerpo libre de una dovela del borde del Ejemplo 1.

Dovela 24 – Método de Bishop

Factor de seguridad:	1.4559
Angulo phi :	30 °
C (Presión):	2.7 kPa
C (Fuerza):	0.76521 kN
Ancho de la dovela:	0.21745 m
Altura media:	1.3533 m
Longitud de la base:	0.28341 m
Angulo en la base:	39.891 °
Peso:	5.2215 kN
Fuerza normal a la base:	4.7715 kN
Tensiones normales a la base:	16.836 kPa
Fuerza cortante en la base:	3.52 kN
Fuerza normal en el lado izquierdo:	4.1257 kN
Fuerza normal del lado derecho:	3.0021 kN

Socavación

Para iniciar el análisis se dividió el cauce secciones con diferentes rugosidades, para cada zona se obtuvo su perímetro P_m , ancho de superficie libre B_e , área hidráulica, los tirantes medios antes de la socavación y se buscó el valor de n en las tablas del subtema 3.3.2 de acuerdo con su material, para el caso de recubrimientos el valor de n se propuso $n=0.02$ (semejante a fondos de grava con lados de concreto encofrado) y para la arcilla $n= 0.011$

De acuerdo con lo visto en la sección 7.1, el cálculo de la rugosidad equivalente se hace utilizando la expresión de Horton

$$n_e = \left[\frac{\sum(P_i n_i^{1.5})}{P} \right]^{2/3}$$

donde

- n_e Rugosidad equivalente
- n_i Rugosidad de la sección i
- P_i Perímetro mojado de la sección i
- P Perímetro total de la sección

Tomando en cuenta que se tiene una zona de meandros, el valor de n debe aumentar 0.001 por cada 20° de deflexión y proponiendo la sección del meandro de la figura A.7 para los ejemplos desarrollados en este trabajo:

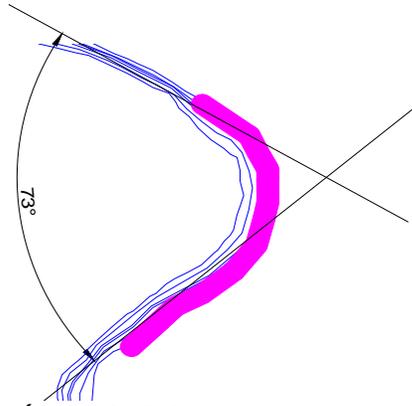


Figura A.7 Ángulo de deflexión en un meandro

$$\frac{0.001}{20} = \frac{x}{73} \quad ; \quad x = 0.0036$$

Los resultados obtenidos para el cálculo de la “ n ” equivalente son los mostrados en la tabla A.1

Tabla A.1 Cálculo de la rugosidad equivalente del ejemplo 1

EJEMPLO 1 MEANDRO			n
P1	46	m	0.011
P2	19	m	0.02
PT	65	m	
n_e	0.014	$n_e + \text{Scobey}$	0.018

Para conocer la profundidad de socavación esperada las secciones mostradas, se utiliza la ecuación para cauces cohesivos homogéneos en secciones rectas como se vio en el subcapítulo 7.5 ya que se trata de considerar la condición más desfavorable, es decir para la presencia de una avenida.

$$H_s = \left(\frac{\alpha H_0^{5/3}}{0.60 \gamma_s^{1.18} \beta} \right)^{\frac{1}{1+x}} \quad \text{Cauces cohesivos}$$

De cada una de las secciones elegidas se extrajeron sus coordenadas, se tabularon y se graficaron en Excel como se muestra en la tabla A.2.

Tabla A.2 Resultados de la socavación del ejemplo 1.

x	y	Ho	Hs	Socavación neta
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.61	-0.19	0.19	-0.10	0.09
4.13	-2.61	2.61	-2.47	0.14
11.40	-4.80	4.80	-5.24	0.44
24.49	-11.80	11.80	-15.90	4.10
37.39	-12.80	12.80	-17.58	4.78
40.32	-10.58	10.58	-13.90	3.32
46.18	-4.63	4.63	-5.02	0.39
47.31	-3.91	3.91	-4.07	0.16
52.45	0.00	0.00	0.00	0.00

Una vez calculada la socavación puede compararse el cauce original y el cauce después de la socavación como se muestra en las figura A.8.

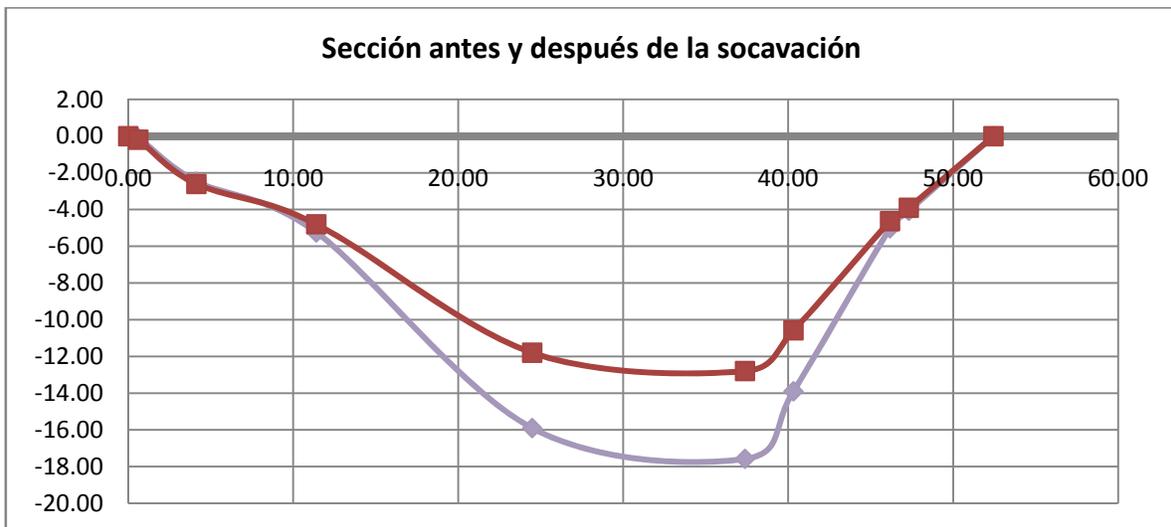


Figura A.8. Comparación de la sección antes y después de la socavación.

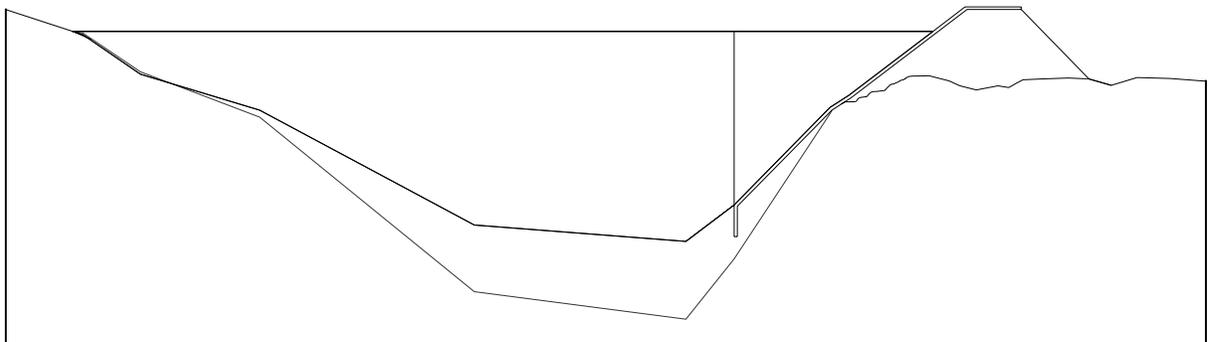


Figura A.9. Comparación de la socavación con respecto a la zanja de anclaje.

Si se efectúa el cálculo con las rugosidades correspondientes a cada perímetro mojado se tiene lo siguiente (ver tabla A.3).

Tabla A.3. Resultados del cálculo de la socavación con la rugosidad correspondiente a cada perímetro.

x	y	Ho=Hm	Hs	Socavación neta
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.61	-0.19	0.19	-0.14	0.05
4.13	-2.61	2.61	-3.56	0.95
11.40	-4.80	4.80	-7.55	2.75
24.49	-11.80	11.80	-22.89	11.09
37.39	-12.80	12.80	-25.31	12.51
40.32	-10.58	10.58	-12.86	2.28
46.18	-4.63	4.63	-4.64	0.01
47.31	-3.91	3.91	-3.76	0.14
52.45	0.00	0.00	0.00	0.00

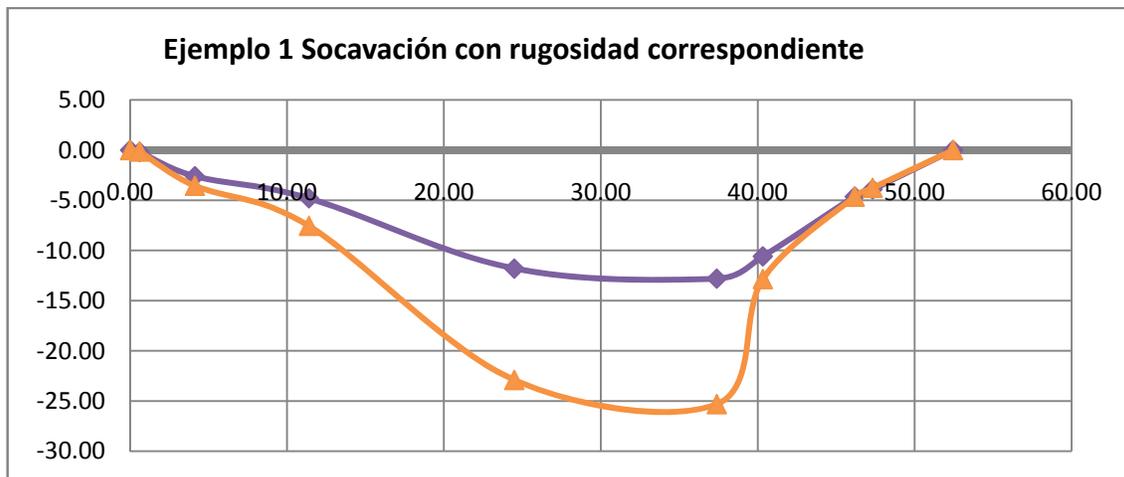


Figura A.9 Comparación de la sección antes y después de la socavación.

La comparación del estado final respecto al inicial se muestra en la figura A.10.

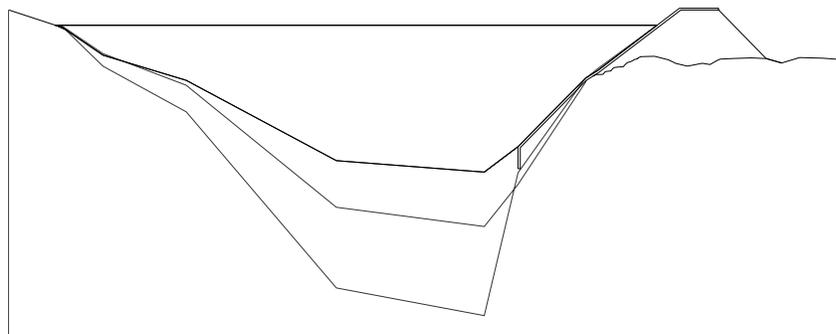


Figura A.10. Comparación de las 2 socavaciones y la condición inicial.

Análisis de flujo interno posterior a la socavación

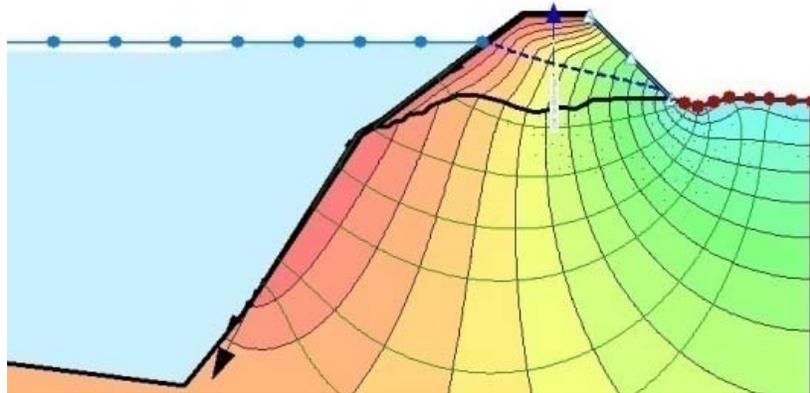


Figura A.11 Red de flujo en el cuerpo del bordo del ejemplo 1 posterior a la socavación.

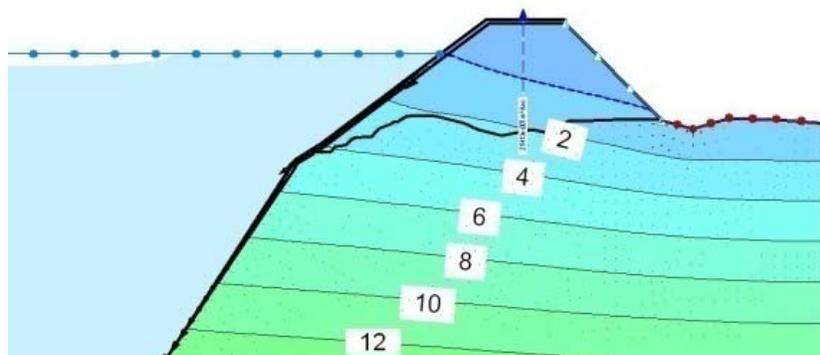


Figura A.12 Caída de presiones en el cuerpo del bordo del ejemplo 1 posterior a la socavación.

carga de presiones en el cuerpo del bordo

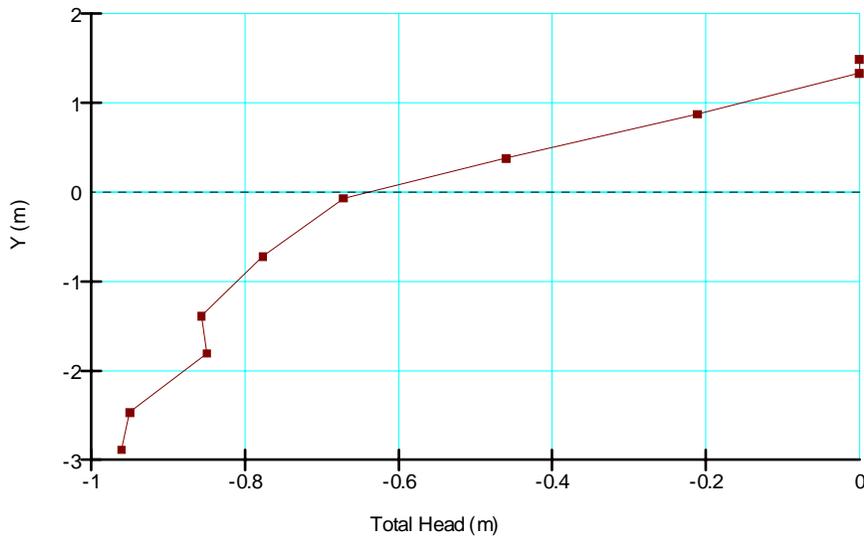


Figura A.13. Grafica de Carga de presiones en el cuerpo del bordo del ejemplo 1 posterior a la socavación.

El Gasto de filtrado en el cuerpo del bordo posterior a la socavación fue de $2.54 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$

Análisis de estabilidad de talud posterior a la socavación

En la revisión de la estabilidad de talud se obtuvo lo siguiente

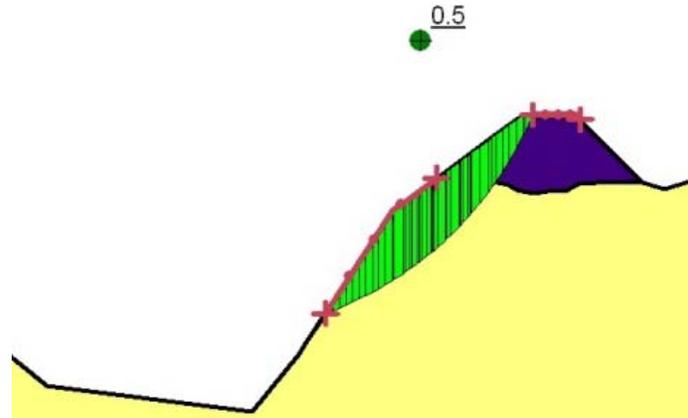


Figura A.14 Círculo de falla y factor de seguridad posterior a la socavación

Método : Bishop
Factor de seguridad : 0.47
Volumen total deslizado: 41.259 m³
Peso total: 685.95 kN
Momento resistente: 4740.9 kN-m
Momento actuante: 10093 kN-m

EJEMPLO 2

Análisis de flujo interno para diseño del bordo

Las trayectorias del flujo obtenidas de SEEP/W son las siguientes

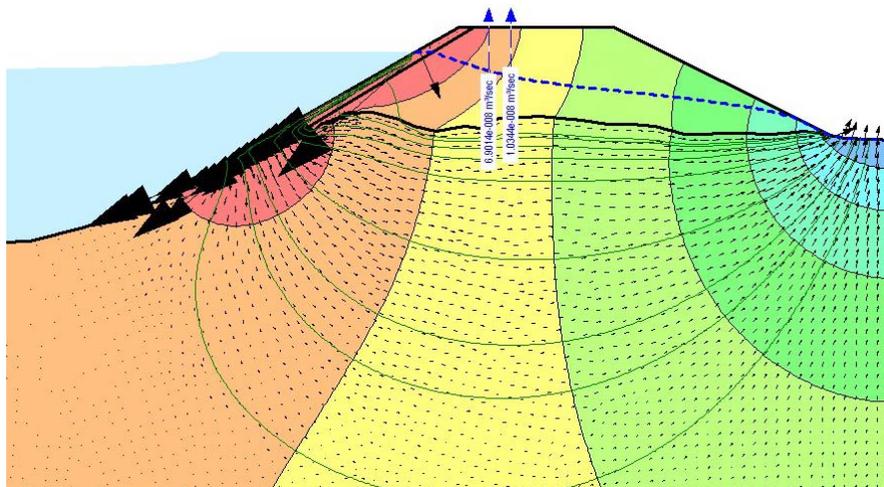


Figura A.15. Red de flujo del bordo del ejemplo 2 en la condición de diseño.

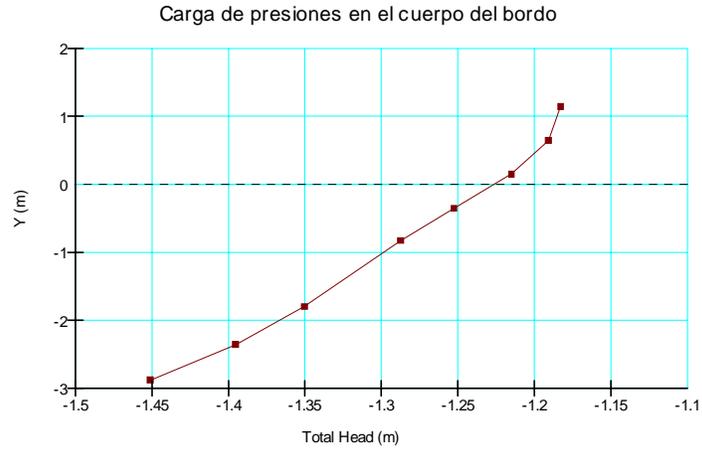


Figura A.16. Gráfica de carga de presiones en el cuerpo del bordo

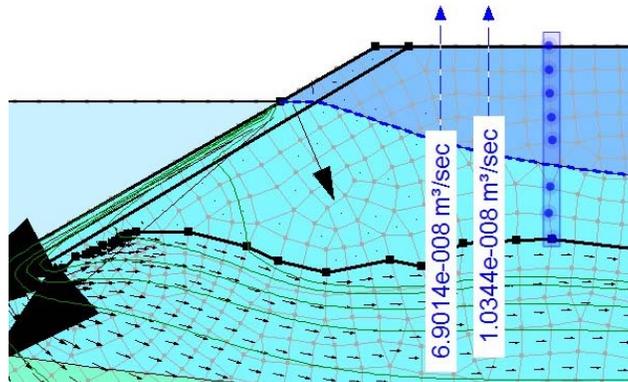


Figura A.17. Ubicación de los puntos de la gráfica anterior y gasto de filtrado.

Análisis de Estabilidad de talud para el diseño del bordo

El círculo de falla más desfavorable obtenido con SLOPE/W se muestra a continuación

1.5

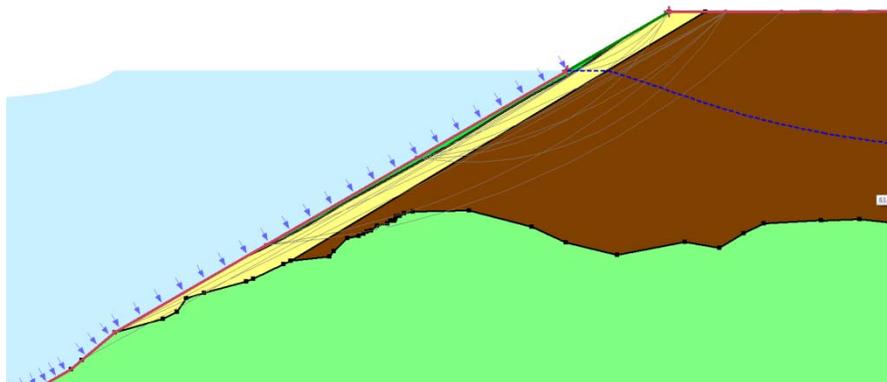


Figura A.18. Falla de talud para el ejemplo 2 en la condición de diseño.

Método de análisis: Bishop
 Factor de seguridad: 1.456
 Volumen deslizado: 0.56312 m³
 Peso total: 11.262 kN
 Momento resistente: 19.402 kN-m
 Momento activante: 13.322 kN-m

Socavación

Para los perímetros y rugosidades mostradas a continuación se obtuvieron con la rugosidad equivalente.

Tabla A.4 Cálculo del a rugosidad equivalente del ejemplo 2

EJEMPLO 2 MEANDRO			n
P1	51.28	m	0.011
P2	10.13	m	0.037
PT	61.41	m	
ne	0.017	ne +Scobey	0.020

Cálculos de la socavación en zona de meandro con recubrimiento de enrocamiento en el bordo y material cohesivo en el cauce.

Tabla A.5. Cálculo de la socavación del ejemplo 2 con rugosidad equivalente.

x	y	Ho	Hs	Socavación neta
0.00	0.00	0.00	0.00	
3.12	-2.21	2.21	-2.45	0.24
5.06	-2.69	2.69	-3.12	0.43
7.68	-2.61	2.61	-3.00	0.39
11.31	-3.70	3.70	-4.63	0.92
18.00	-4.82	4.82	-6.40	1.58
24.74	-7.17	7.17	-10.45	3.28
28.10	-8.29	8.29	-12.50	4.21
32.49	-8.72	8.72	-13.30	4.58
36.39	-8.66	8.66	-13.20	4.53
40.29	-8.50	8.50	-12.90	4.39
42.75	-7.86	7.86	-11.71	3.85
45.49	-6.87	6.87	-9.91	3.04
46.37	-6.66	6.66	-9.54	2.88
46.87	-6.38	6.38	-9.05	2.67
47.48	-6.11	6.11	-8.57	2.47
48.05	-5.78	5.78	-8.01	2.23
48.90	-5.06	5.06	-6.81	1.74
48.90	-5.06	5.06	-6.81	1.74
57.79	0.00	0.00	0.00	0.00

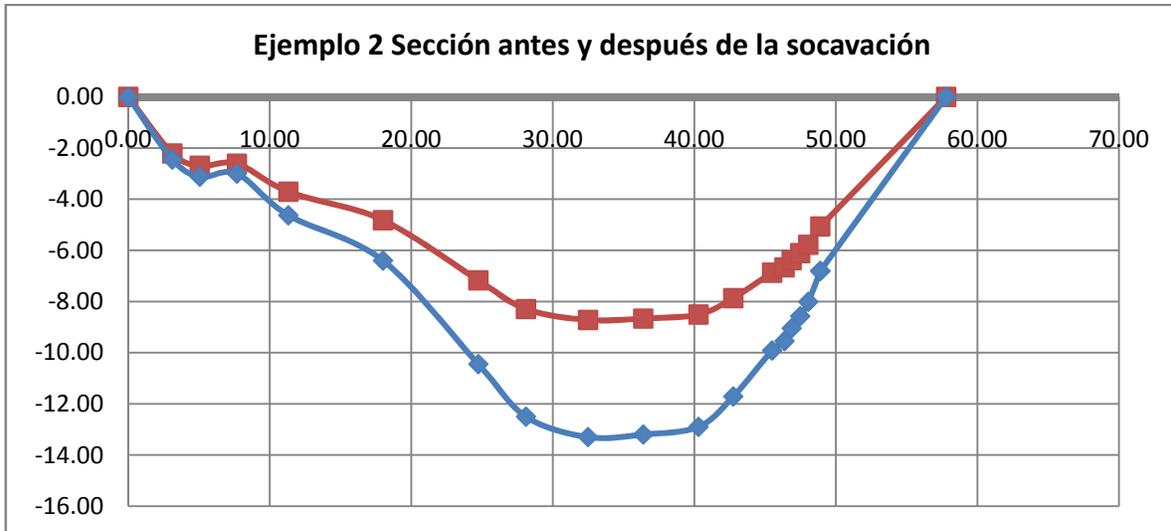


Figura A.19 Sección antes y después de la socavación en el cauce.

Haciendo el cálculo con las rugosidades correspondientes en cada perímetro mojado se obtiene lo siguiente

Tabla A.6. Cálculo de la socavación utilizando la rugosidad correspondiente a cada perímetro mojado.

x	y	Ho=Hm	Hs	Socavación neta
0.00	0.00	0.00		
3.12	-2.21	2.21	-3.81	1.60
5.06	-2.69	2.69	-4.86	2.17
7.68	-2.61	2.61	-4.67	2.06
11.31	-3.70	3.70	-7.20	3.50
18.00	-4.82	4.82	-9.96	5.14
24.74	-7.17	7.17	-16.26	9.09
28.10	-8.29	8.29	-19.45	11.16
32.49	-8.72	8.72	-20.70	11.98
36.39	-8.66	8.66	-20.54	11.88
40.29	-8.50	8.50	-20.07	11.57
42.75	-7.86	7.86	-18.22	10.36
45.49	-6.87	6.87	-15.43	8.56
46.37	-6.66	6.66	-14.86	8.19
46.87	-6.38	6.38	-14.08	7.70
47.48	-6.11	6.11	-13.34	7.24
48.05	-5.78	5.78	-12.47	6.69
48.90	-5.06	5.06	-10.59	5.53
48.90	-5.06	5.06	-4.32	0.75
57.79	0.00	0.00	0.00	0.00

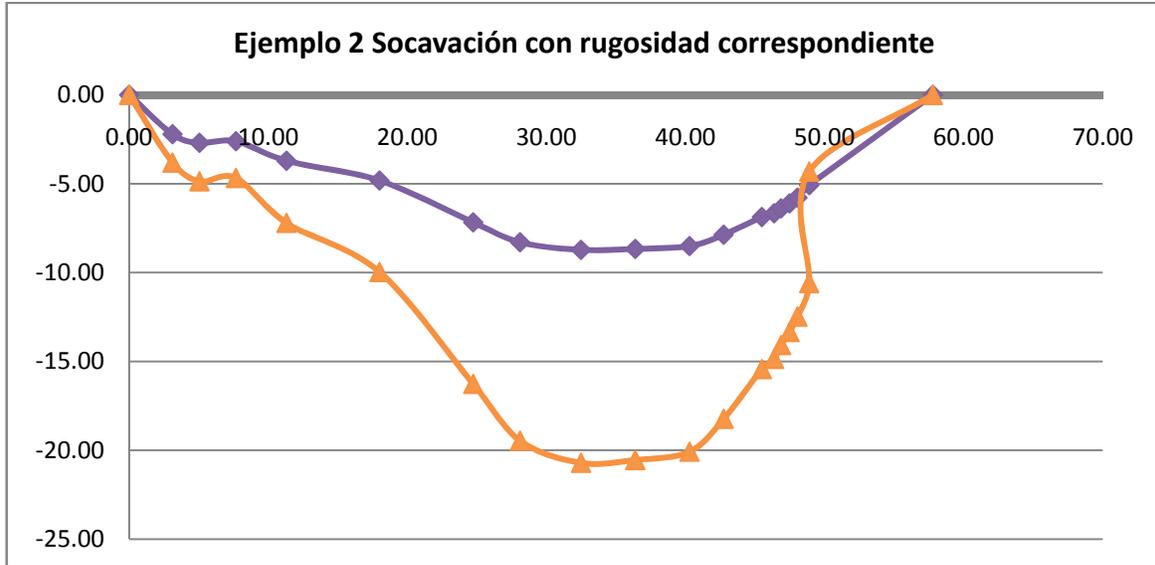


Figura A.20. Socavación calculada con la rugosidad correspondiente a cada perímetro mojado.

Análisis de flujo interno posterior a la socavación

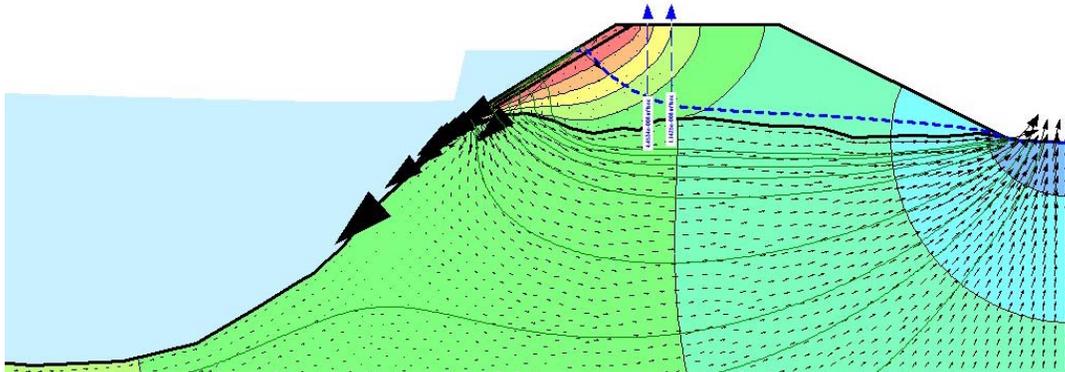


Figura A.21. Red de flujo del ejemplo 2 posterior a la socavación.

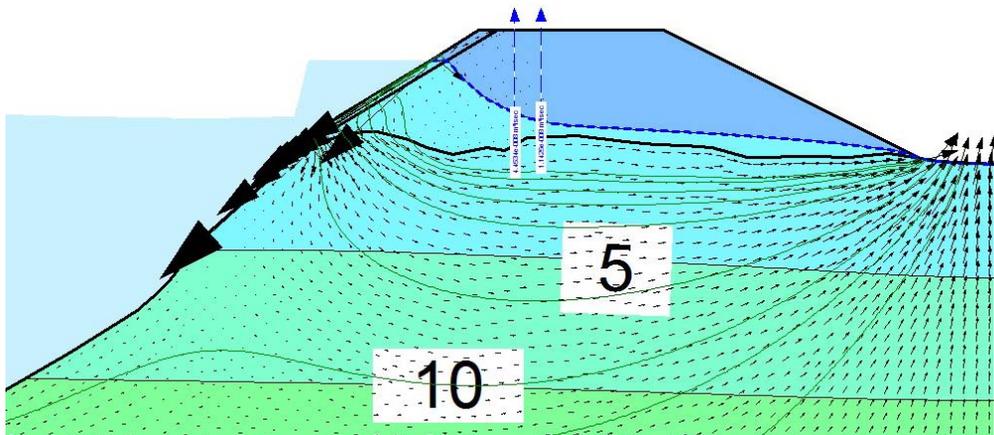


Figura A.22. Caída de presiones en el cuerpo del bordo del ejemplo 2 posterior a la socavación.

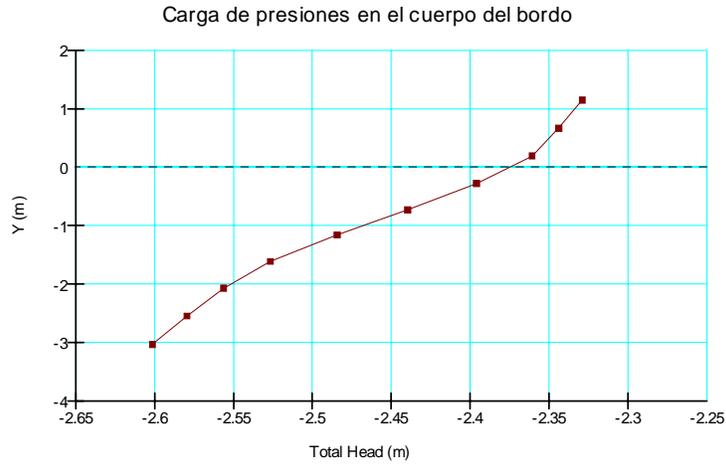


Figura A.23. Gráfica de Carga de presiones en el cuerpo del bordo del ejemplo 2 posterior a la socavación.

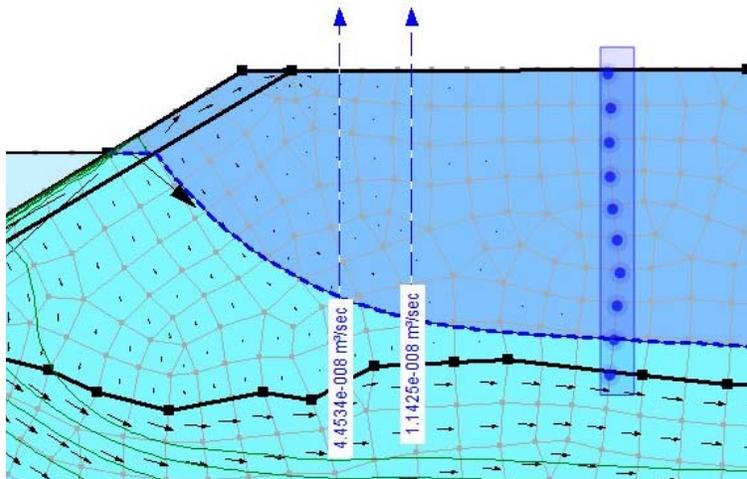


Figura A.24. Ubicación de la carga de presiones en el cuerpo del bordo del ejemplo 2 posterior a la socavación

Análisis de estabilidad de talud posterior a la socavación

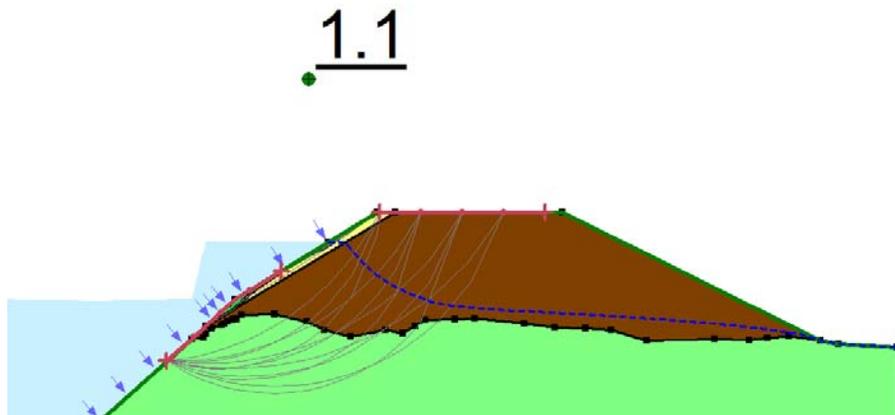


Figura A.25. Análisis de estabilidad de talud posterior a la socavación

Método de análisis: Bishop
 Factor de seguridad: 1.1
 Volumen: 0.56052 m³
 Peso total: 11.21 kN
 Momento resistente: 16.366 kN-m
 Momento activante: 14.243 kN-m

EJEMPLO 3

Socavación

Para realizar este análisis se eligió la rugosidad para tramos con mucha hierba, estancamientos profundos, cauces de inundación con raíces y plantas subacuáticas cuyo valor mínimo para n es de 0.075 de acuerdo con la tabla 7.1.

La rugosidad equivalente obtenida es la mostrada en la tabla A.7.

Tabla A.7 Cálculo de la rugosidad equivalente del ejemplo 3

EJEMPLO 3 MEANDRO			n
P1	51.3	m	0.02
P2	12.41	m	0.075
PT	63.71	m	
ne	0.029	ne +Scobey	0.032

Tabla A.8. El cálculo de la socavación del ejemplo 3

x	y	Ho	Hs	Socavación neta
0.00	0.00	0.00	0.00	
3.12	-2.21	2.21	-2.35	0.14
5.06	-2.69	2.69	-2.99	0.30
7.68	-2.61	2.61	-2.88	0.27
11.31	-3.70	3.70	-4.43	0.73
18.00	-4.82	4.82	-6.13	1.31
28.10	-8.29	8.29	-11.98	3.69
32.49	-8.72	8.72	-12.74	4.02
36.39	-8.66	8.66	-12.65	3.98
40.29	-8.50	8.50	-12.36	3.85
42.88	-7.86	7.86	-11.22	3.36
45.49	-6.87	6.87	-9.50	2.63
46.37	-6.66	6.66	-9.15	2.48
47.48	-6.11	6.11	-8.21	2.11
48.05	-5.82	5.82	-7.74	1.92
48.90	-5.06	5.06	-6.52	1.46
54.10	-2.06	2.06	-2.15	0.09
54.13	-2.02	2.02	-2.10	0.08
57.65	0.00	0.00	0.00	0.00

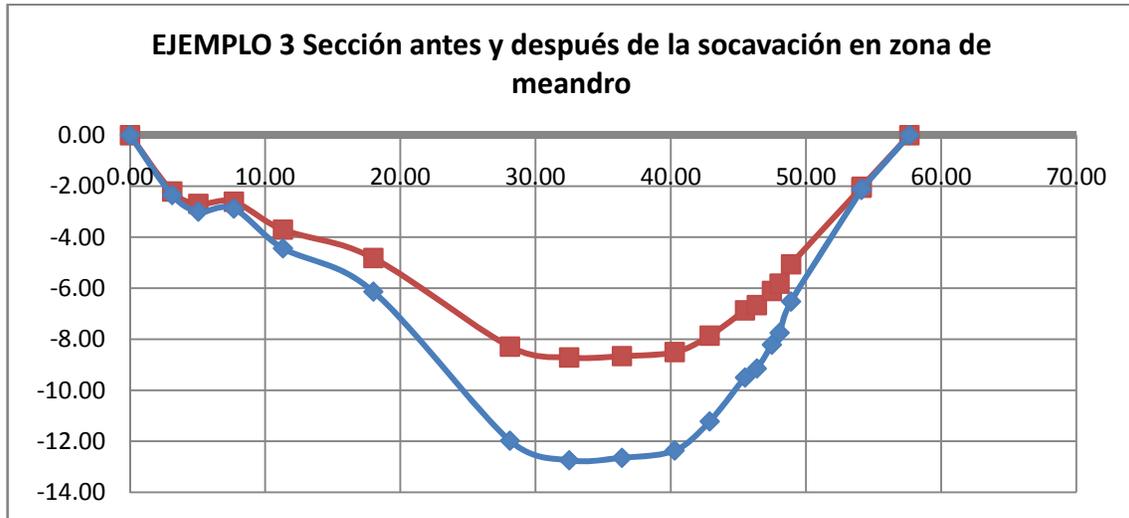


Figura A.26. Sección antes y después de la socavación, en el ejemplo 3

La socavación calculada no resultó alarmante al presentar socavaciones máximas de 4m en zonas profundas.

EJEMPLO 4

Análisis de flujo interno para el diseño del bordo

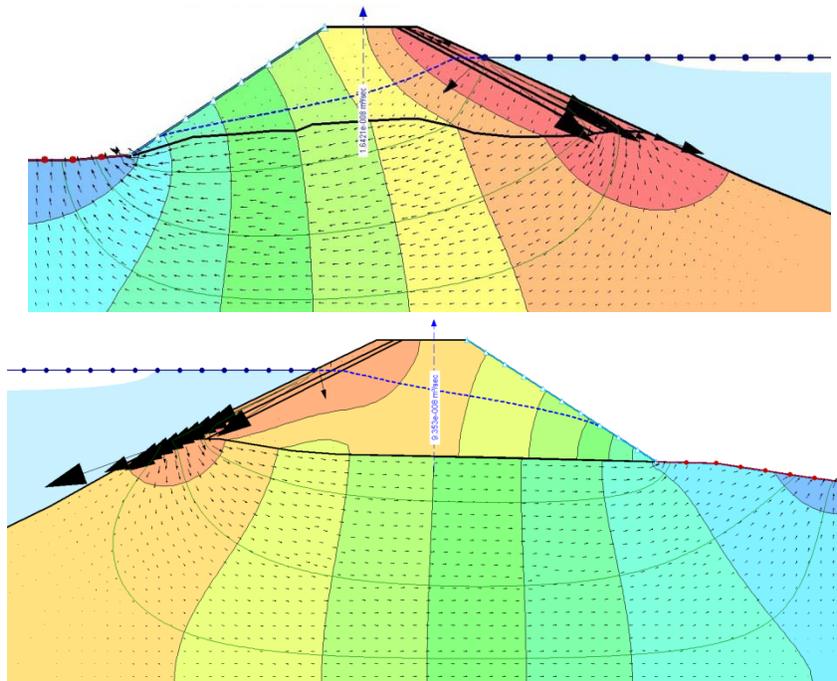


Figura A.27. Redes de flujo para los bordos del ejemplo 4 en la condición de diseño

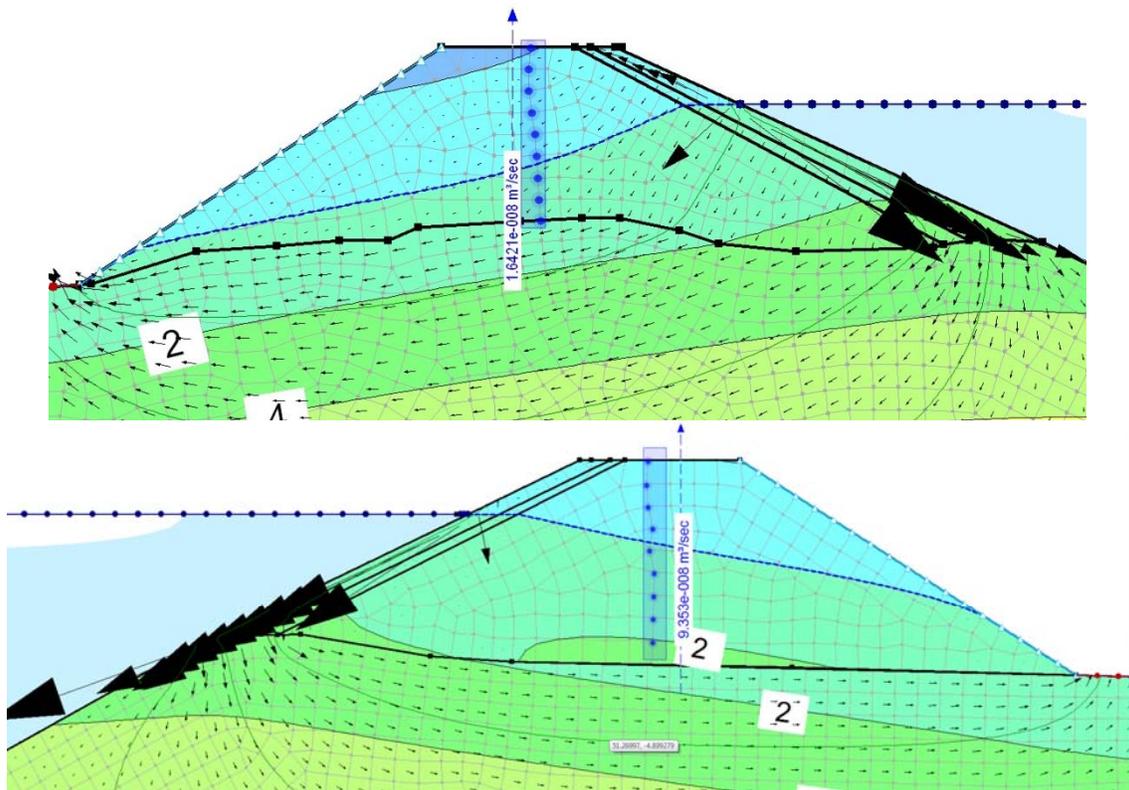


Figura A.28. Caidas de presiones y gasto de filtrado en el cuerpo del bordo para la condición de diseño.

Análisis de Estabilidad de talud para el diseño del bordo

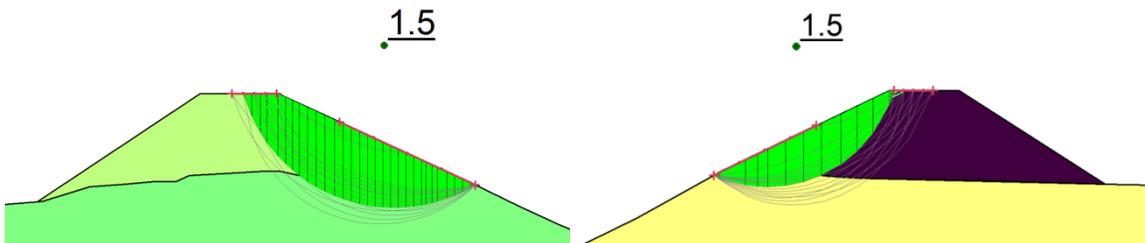


Figura A.29. Círculos de falla y factor de seguridad del ejemplo 4 en la condición de diseño.

Bordo izquierdo

Método de análisis: Bishop
 Factor de seguridad: 1.5
 Volumen total: 26.015 m³
 Peso total: 446.46 kN
 Momento resistente: 1383.7 kN-m
 Momento actuante: 947.89 kN-m

Bordo derecho

Método de análisis: Bishop
 Factor de seguridad: 1.5
 Volumen total: 16.926 m³
 Peso total: 290.78 kN
 Momento resistente: 983.44 kN-m
 Momento actuante: 672.29 kN-m

Socavación

El cálculo de la socavación para cualquiera de los bordos puede realizarse con el procedimiento las formulas propuestas en el subcapítulo 7.3 cambiando de ecuación de acuerdo con el material que se tenga en el río. Para este ejemplo se calcula la rugosidad equivalente que puede observarse en la tabla A.9.

Tabla A.9 Cálculo de la rugosidad equivalente para un cauce cohesivo

P1	6.87	m	0.037
P2	38.14	m	0.011
P3	6.81	m	0.037
PT	51.82	m	
ne	0.020		

Tabla A.10. Cálculo de la socavación del ejemplo 4 para un cauce cohesivo

x	y	Ho	Hs	Socavación neta
0.00	0.00	0.00	0.00	
6.24	-2.89	2.89	-3.02	0.14
8.50	-4.00	4.00	-4.52	0.52
10.26	-4.80	4.80	-5.66	0.86
15.02	-6.79	6.79	-8.68	1.90
17.70	-7.23	7.23	-9.39	2.16
23.78	-7.63	7.63	-10.03	2.40
25.63	-7.52	7.52	-9.85	2.33
27.31	-7.63	7.63	-10.03	2.40
29.10	-7.69	7.69	-10.13	2.44
29.61	-7.69	7.69	-10.13	2.44
30.43	-7.72	7.72	-10.17	2.46
31.91	-7.80	7.80	-10.31	2.51
32.37	-7.80	7.80	-10.31	2.51
33.56	-7.46	7.46	-9.76	2.30
34.41	-7.18	7.18	-9.30	2.13
38.19	-5.33	5.33	-6.44	1.11
42.36	-3.00	3.00	-3.17	0.17
42.36	-3.00	3.00	-3.17	0.17
48.48	0.00	0.00	0.00	0.00

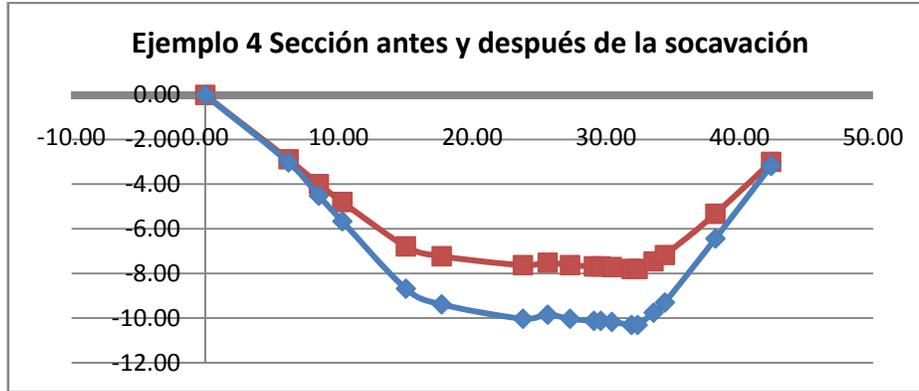


Figura A.30. Sección antes y después de la socavación en cauce cohesivo.

Tabla A.11. Cálculo de la rugosidad equivalente para un cauce granular

EJEMPLO 5			n
P1	6.87	m	0.037
P2	38.14	m	0.017
P3	6.81	m	0.037
PT	51.82	m	
ne	0.023		

Tabla A.12. Cálculo de la socavación del ejemplo 4 para un cauce granular.

x	y	Ho	Hs	Socavación neta
0.00	0.00	0.00	0.00	
6.24	-2.89	2.89	-3.29	0.40
8.50	-4.00	4.00	-4.86	0.87
10.26	-4.80	4.80	-6.06	1.26
15.02	-6.79	6.79	-9.18	2.39
17.70	-7.23	7.23	-9.90	2.67
23.78	-7.63	7.63	-10.56	2.93
25.63	-7.52	7.52	-10.38	2.86
27.31	-7.63	7.63	-10.57	2.93
29.10	-7.69	7.69	-10.66	2.97
29.61	-7.69	7.69	-10.66	2.97
30.43	-7.72	7.72	-10.71	2.99
31.91	-7.80	7.80	-10.85	3.05
32.37	-7.80	7.80	-10.85	3.05
33.56	-7.46	7.46	-10.28	2.82
34.41	-7.18	7.18	-9.81	2.64
38.19	-5.33	5.33	-6.86	1.54
42.36	-3.00	3.00	-3.45	0.45
42.36	-3.00	3.00	-3.45	0.45
48.48	0.00	0.00	0.00	0.00

Análisis del flujo interno posterior a la socavación

Para el análisis posterior a la socavación se eligió la opción de cauce cohesivo.

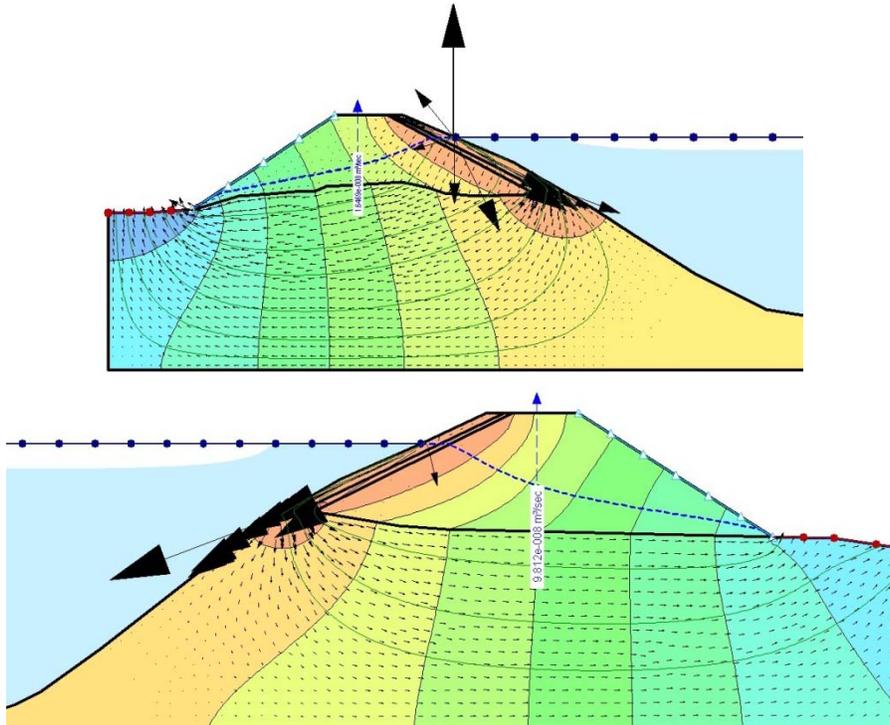


Figura A.31. Redes de flujo para los bordos del ejemplo 4 posterior a la socavación

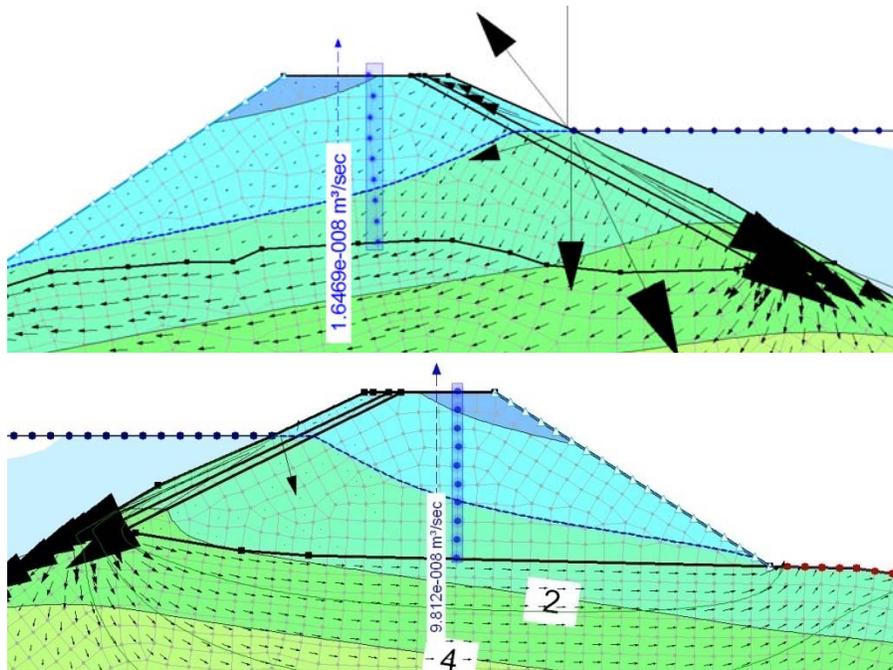


Figura A.32. Caídas de presiones y gasto de filtrado en el cuerpo del bordo posterior a la socavación

Análisis de estabilidad de talud posterior a la socavación

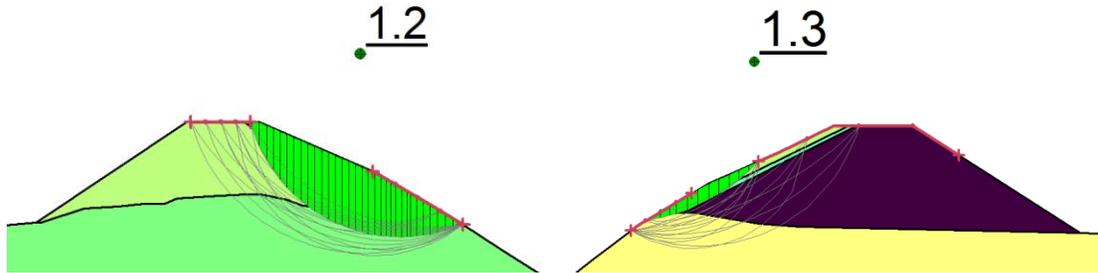


Figura A.33. Círculos de falla y factor de seguridad del ejemplo 4 posterior a la socavación.

Bordo izquierdo

Método de análisis: Bishop
Factor de seguridad: 1.2
Volumen total: 24.475 m³
Peso total: 418.9 kN
Momento resistente: 1382.4 kN-m
Momento activante: 1122.2 kN-m

Bordo derecho

Método de análisis: Bishop
Factor de seguridad: 1.3
Volumen total: 2.2647 m³
Peso total: 42.74 kN
Momento resistente: 214.5 kN-m
Momento actuante: 169.66 kN-m

EJEMPLO 5

Análisis de flujo interno para diseño del bordo

En el bordo derecho con material arcillo limoso en su cuerpo se obtuvo lo siguiente

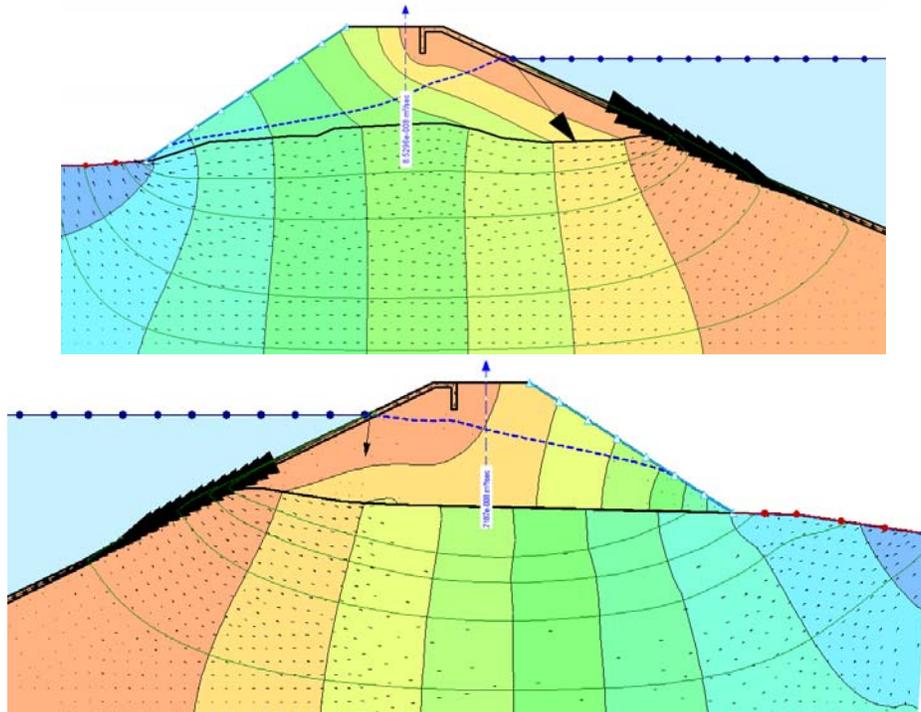


Figura A.34. Redes de flujo de los bordos del ejemplo 5 para la condición de diseño

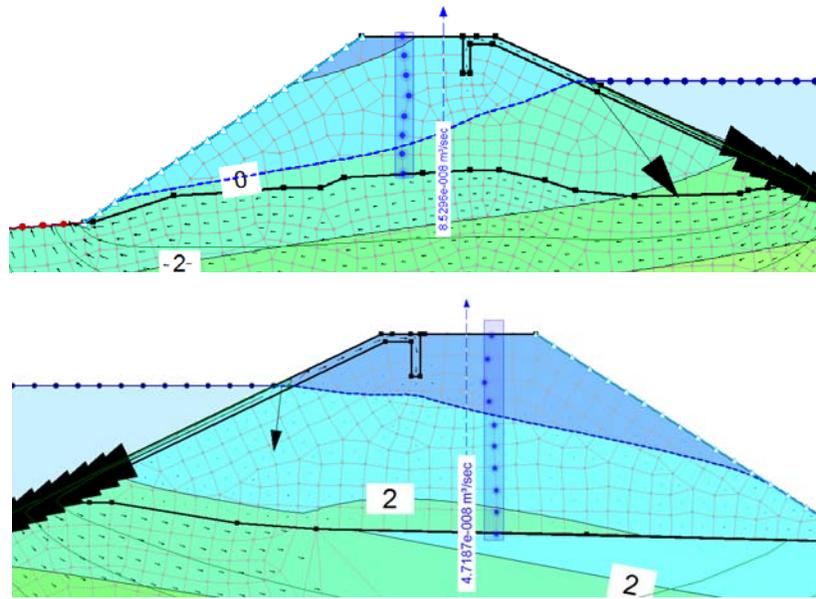


Figura A.35. Caidas de presiones y gasto de filtrado en el cuerpo del bordo para la condición de diseño.

Análisis de Estabilidad de talud para el diseño del bordo

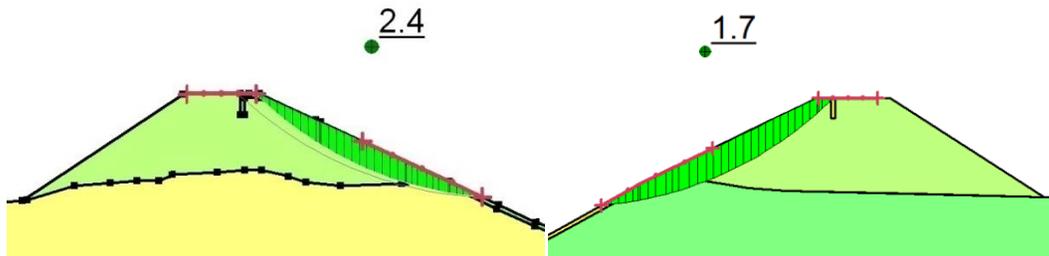


Figura A.36. Círculos de falla y factor de seguridad del ejemplo 5 para la condición de diseño.

Bordo izquierdo

Método de análisis: Bishop
Factor de seguridad: 2.4
Volumen total: 8.5018 m³
Peso total: 152.64 kN
Momento resistente: 2474.1 kN-m
Momento activante: 1043.8 kN-m

Bordo derecho

Método de análisis: Bishop
Factor de seguridad: 1.7
Volumen total: 11.747 m³
Peso total: 207.2 kN
Momento resistente: 2586.5 kN-m
Momento activante: 1558.9 kN-m

EJEMPLO 6

Análisis de flujo interno para diseño del bordo

Las trayectorias obtenidas con SEEP/W se muestran a continuación

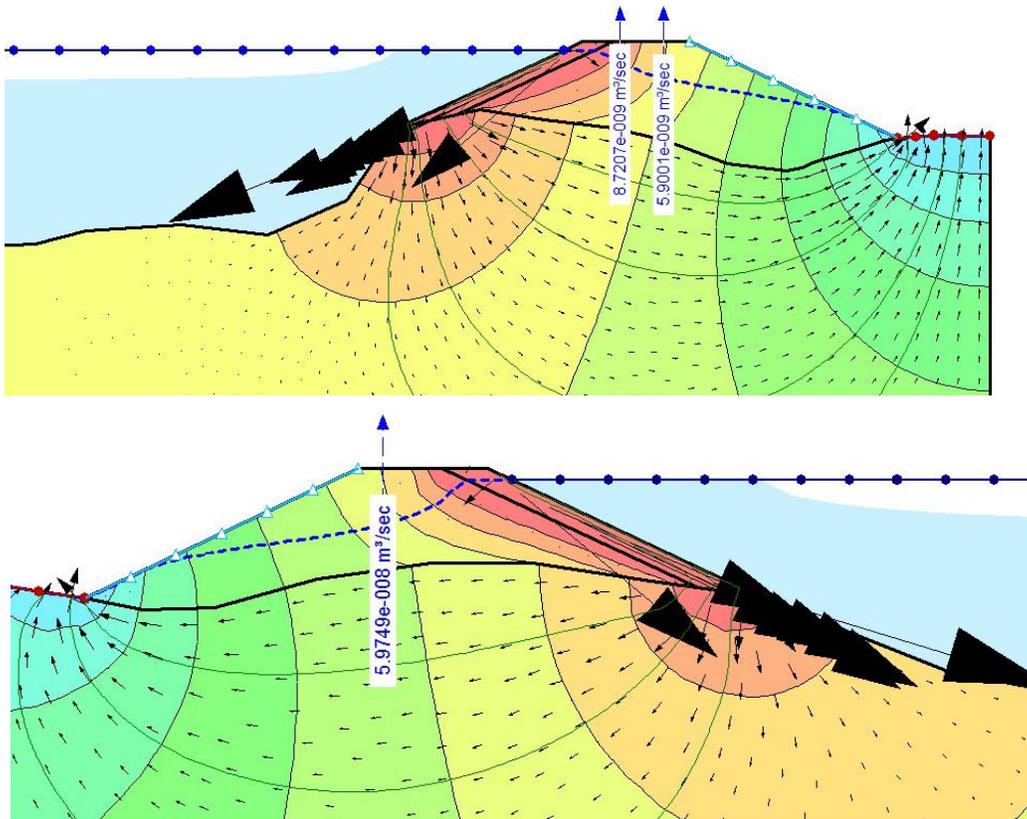


Figura A.37. Redes de flujo de los bordos del ejemplo 6 para la condición de diseño.

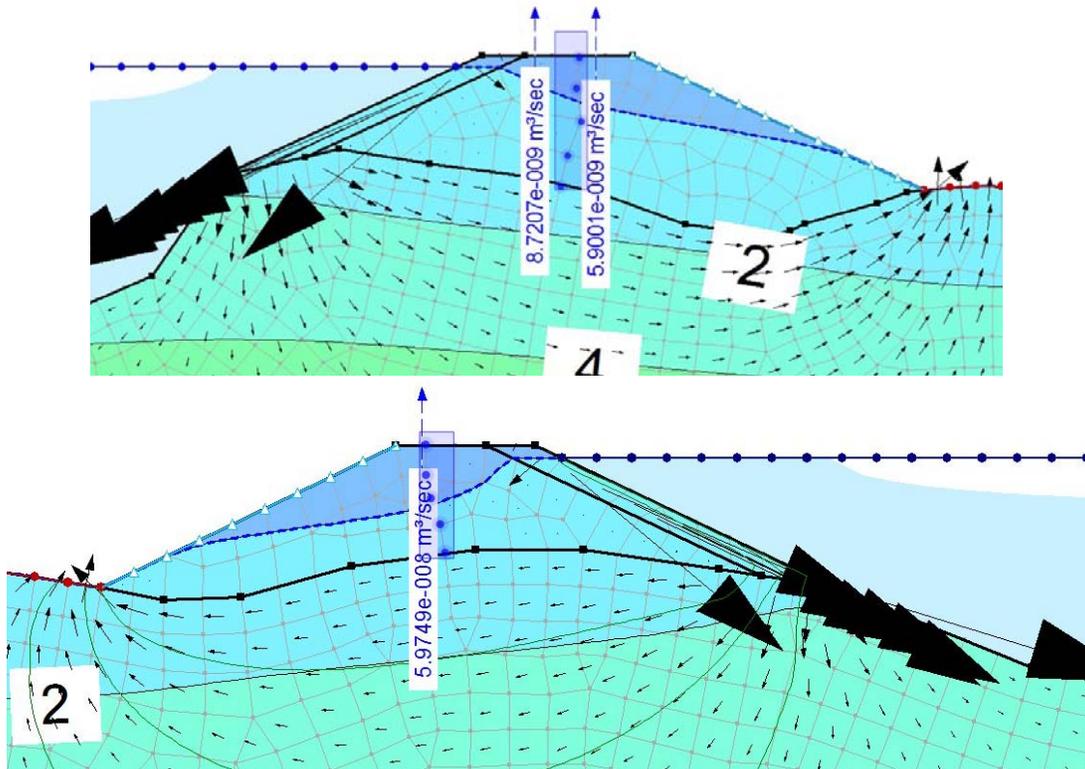


Figura A.38. Caidas de presiones y gasto de filtrado en el cuerpo del bordo para la condición de diseño.

Análisis de Estabilidad de talud para diseño del bordo

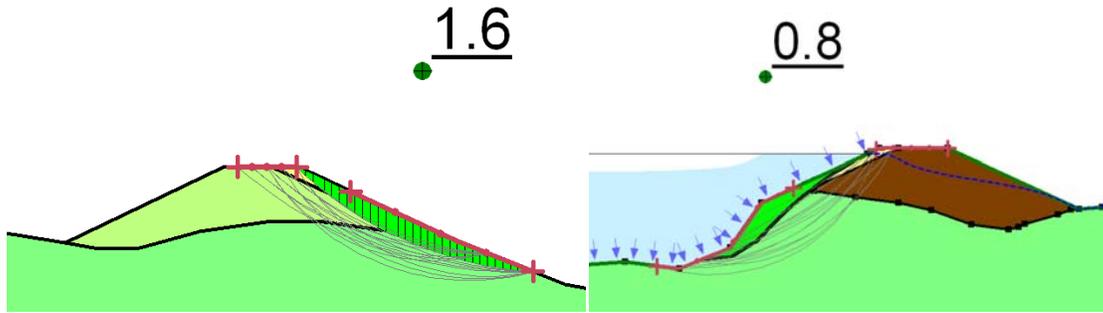


Figura A.39. Círculos de falla y factor de seguridad del ejemplo 6 para la condición de diseño.

Bordo izquierdo

Método de análisis: Bishop
Factor de seguridad: 1.6
Volumen total: 2.6176 m³
Peso total: 49.979 kN
Momento resistente: 323.05 kN-m
Momento activante: 200.52 kN-m

Bordo derecho

Método de análisis: Bishop
Factor de seguridad: 0.75
Volumen total: 2.794 m³
Peso total: 53.7 kN
Momento resistente: 57.733 kN-m
Momento activante: 76.8 kN-m

Socavación

Tabla A.13. Cálculo de la rugosidad equivalente para el ejemplo 6.

EJEMPLO 12		n	
P1	4.23	m	0.037
P2	126.12	m	0.017
P3	4.27	m	0.037
P	134.62	m	
ne	0.019		

Tabla A.13. Cálculo de la socavación del ejemplo 6.

x	y	Ho	Hs	Socavación neta
0.00	0.00	0.00	0.00	
3.82	-1.81	1.81	-2.24	0.42
6.70	-2.98	2.98	-4.06	1.08
9.30	-3.47	3.47	-4.87	1.40
11.79	-3.45	3.45	-4.84	1.39
15.57	-4.14	4.14	-6.02	1.88
17.13	-5.18	5.18	-7.89	2.70
18.65	-5.49	5.49	-8.45	2.96
21.11	-5.82	5.82	-9.06	3.24
22.31	-5.38	5.38	-8.24	2.86
23.82	-4.82	4.82	-7.23	2.41
25.82	-4.82	4.82	-7.23	2.41
28.10	-4.24	4.24	-6.19	1.96

30.63	-5.82	5.82	-9.06	3.24
31.92	-6.19	6.19	-9.77	3.57
33.82	-6.28	6.28	-9.93	3.65
36.13	-7.08	7.08	-11.47	4.39
36.44	-7.86	7.86	-13.01	5.14
37.08	-8.09	8.09	-13.46	5.37
39.15	-9.40	9.40	-16.10	6.71
41.82	-9.82	9.82	-16.98	7.16
43.82	-8.89	8.89	-15.07	6.18
44.52	-8.58	8.58	-14.44	5.86
45.47	-8.24	8.24	-13.76	5.52
45.98	-8.54	8.54	-14.36	5.82
48.13	-9.68	9.68	-16.69	7.01
49.76	-10.06	10.06	-17.47	7.42
50.70	-10.18	10.18	-17.72	7.54
53.39	-9.65	9.65	-16.62	6.97
54.77	-9.40	9.40	-16.12	6.72
56.37	-9.10	9.10	-15.50	6.40
59.63	-8.47	8.47	-14.22	5.75
62.85	-8.94	8.94	-15.18	6.23
63.94	-9.10	9.10	-15.50	6.40
66.15	-9.06	9.06	-15.42	6.36
67.45	-9.04	9.04	-15.38	6.34
68.49	-9.21	9.21	-15.71	6.51
69.32	-9.13	9.13	-15.57	6.43
71.02	-8.95	8.95	-15.18	6.24
74.07	-8.44	8.44	-14.17	5.72
77.82	-8.58	8.58	-14.43	5.86
80.88	-10.40	10.40	-18.19	7.79
85.72	-9.93	9.93	-17.20	7.27
88.76	-8.55	8.55	-14.39	5.83
92.92	-7.82	7.82	-12.92	5.10
95.38	-7.18	7.18	-11.66	4.48
96.77	-7.11	7.11	-11.53	4.42
97.72	-7.04	7.04	-11.39	4.35
97.73	-7.04	7.04	-11.39	4.35
97.73	-7.04	7.04	-11.39	4.35
98.62	-6.82	6.82	-10.96	4.14
99.30	-6.56	6.56	-10.46	3.90
99.89	-6.42	6.42	-10.20	3.78
100.03	-6.39	6.39	-10.14	3.75
100.56	-6.24	6.24	-9.85	3.61
101.03	-6.04	6.04	-9.47	3.43
101.49	-5.90	5.90	-9.22	3.32

101.89	-5.83	5.83	-9.09	3.25
102.22	-5.78	5.78	-8.98	3.21
102.45	-5.68	5.68	-8.80	3.12
102.56	-5.60	5.60	-8.65	3.05
102.70	-5.60	5.60	-8.66	3.05
102.80	-5.69	5.69	-8.82	3.13
104.73	-5.49	5.49	-8.46	2.96
104.81	-5.52	5.52	-8.50	2.98
104.94	-5.58	5.58	-8.61	3.03
106.76	-4.82	4.82	-7.23	2.41
108.44	-4.44	4.44	-6.55	2.11
110.34	-4.59	4.59	-6.81	2.22
112.58	-4.59	4.59	-6.81	2.22
115.48	-4.47	4.47	-6.60	2.13
116.64	-4.16	4.16	-6.05	1.90
118.84	-4.01	4.01	-5.80	1.79
120.84	-4.26	4.26	-6.23	1.97
122.69	-3.46	3.46	-4.85	1.39
123.82	-1.80	1.80	-2.22	0.42
127.70	0.00	0.00	0.00	0.00

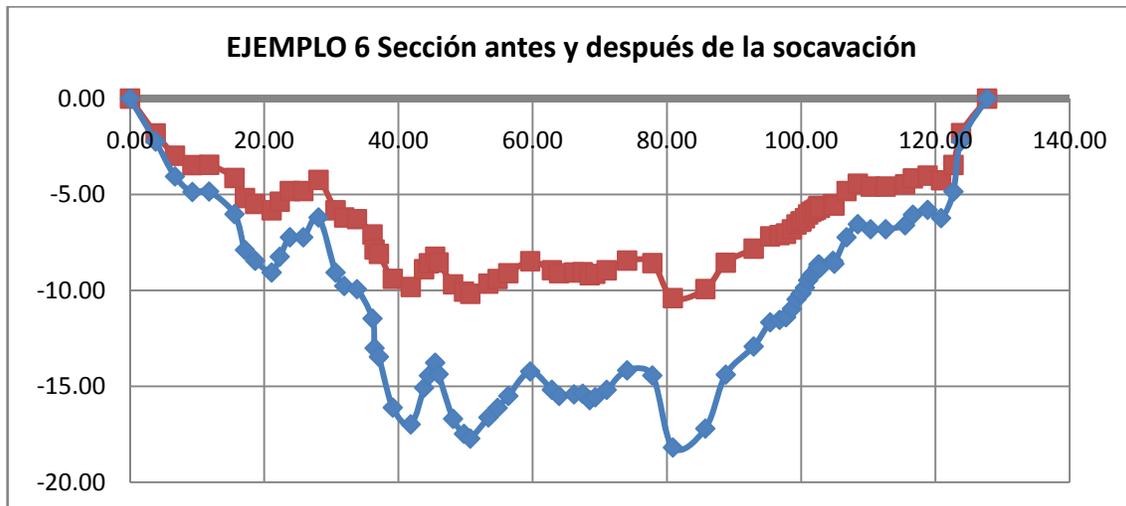


Figura A.40. Sección antes y después de la socavación del ejemplo 6.

Análisis de flujo interno posterior a la socavación

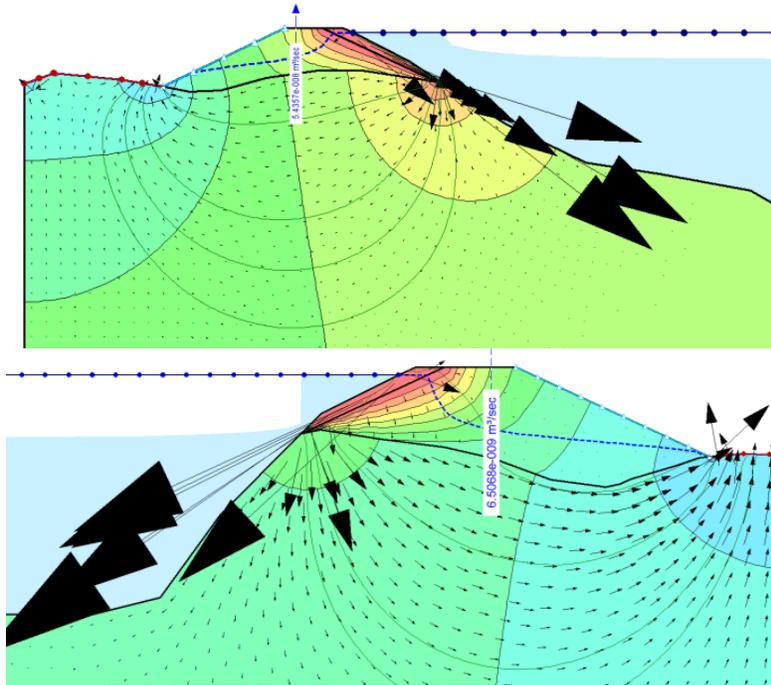


Figura A.41. Redes de flujo de los bordos del ejemplo 6 posterior a la socavación.

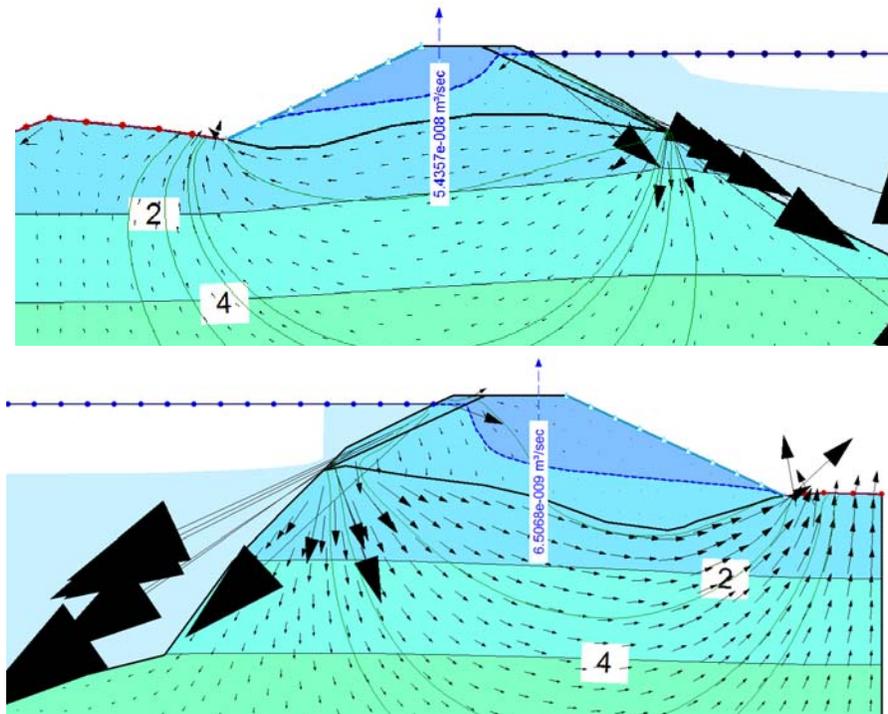


Figura A.42. Caídas de presiones y gastos de filtrado en el cuerpo del bordo posterior a la socavación.

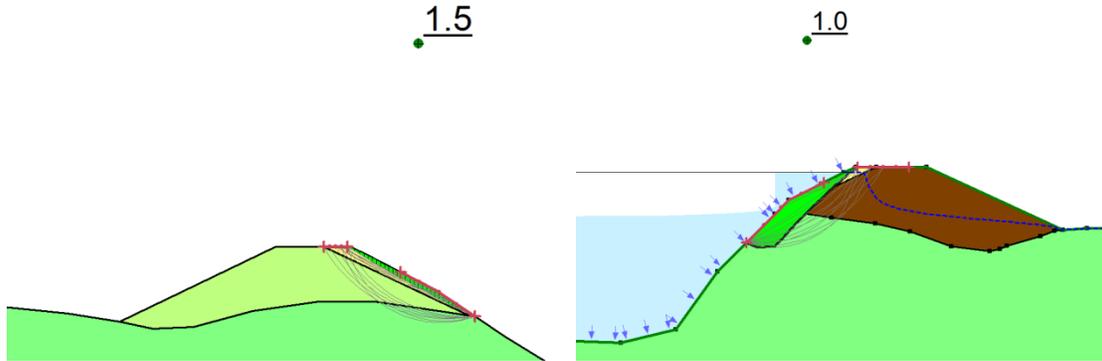


Figura A.43. Círculos de falla y factor de seguridad del ejemplo 6 posterior a la socavación

Bordo izquierdo

Método de análisis: Bishop
 Factor de seguridad: 1.5
 Volumen total: 0.4183 m³
 Peso total: 8.366 kN
 Momento resistente: 203.63 kN-m
 Momento actuante: 131.86 kN-m

Bordo derecho

Método de análisis: Bishop
 Factor de seguridad: 1
 Volumen total: 2.4568 m³
 Peso total: 46.395 kN
 Momento resistente: 71.358 kN-m
 Momento actuante: 67.996 kN-m

EJEMPLO 7

Análisis de flujo interno para diseño del bordo

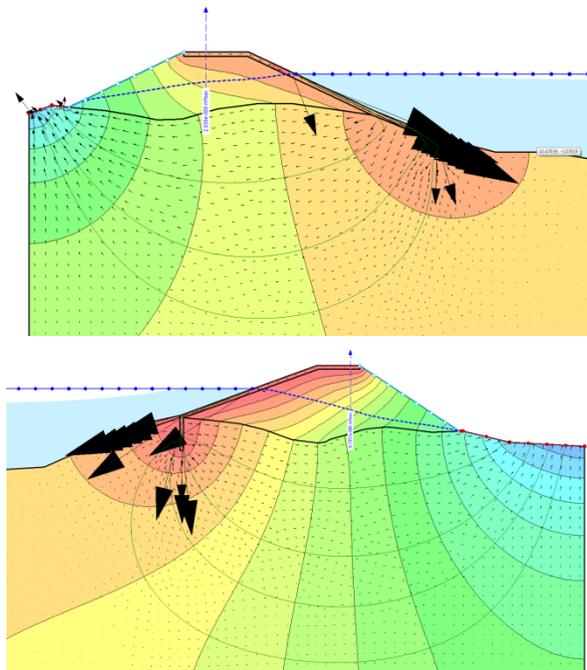


Figura A.44. Redes de flujo de los bordos del ejemplo 7 para la condición de diseño.

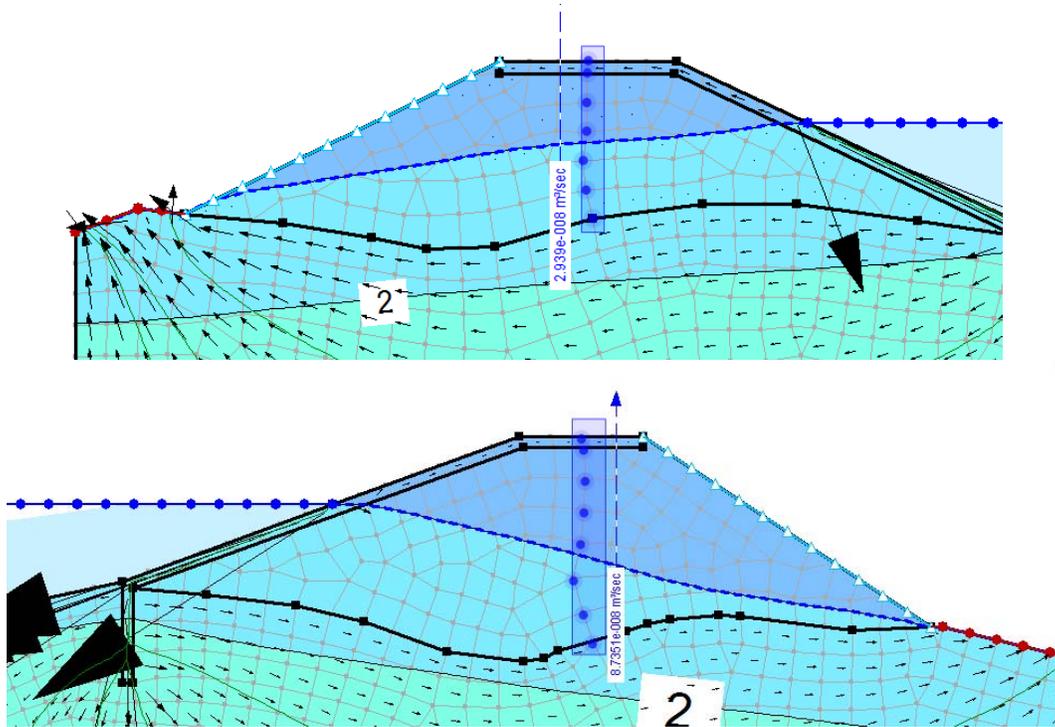


Figura A.45. Caídas de presiones y gastos de filtrado en el cuerpo del bordo del ejemplo 7 para la condición de diseño.

Análisis de Estabilidad de talud para diseño del bordo

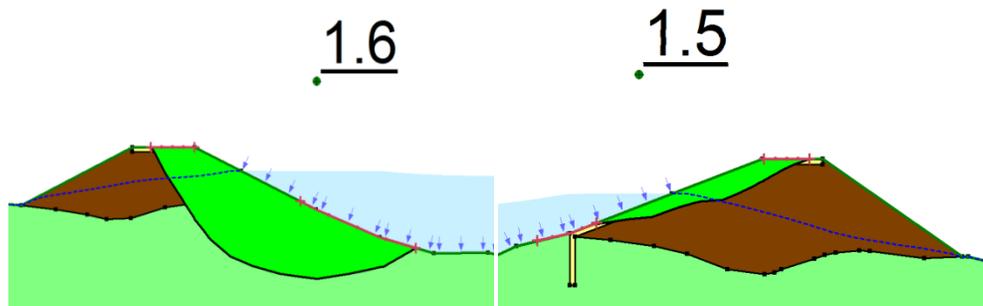


Figura A.46. Círculos de falla y factores de seguridad de los bordos del ejemplo 7 para la condición de diseño.

Bordo izquierdo

Método de análisis: Bishop
Factor de seguridad: 1.6
Volumen total: 29.883 m³
Peso total: 498.25 kN
Momento resistente: 828.6 kN-m
Momento actuante: 531.27 kN-m

Bordo derecho

Método de análisis: Bishop
Factor de seguridad: 1.5
Volumen total: 3.9939 m³
Peso total: 73.963 kN
Momento resistente: 64 kN-m
Momento actuante: 41.976 kN-m

Socavación

Tabla A.14. Cálculo de la rugosidad compuesta del ejemplo 7.

EJEMPLO 7		n	
P1	6.93	m	0.02
P2	124.32	m	0.017
P3	3.96	m	0.02
P	135.21	m	
ne	0.017		

Tabla A.15. Cálculo de la socavación del ejemplo 7.

x	y	Ho	Hs	Socavación neta
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3.44	-1.62	1.62	-2.68	1.06
6.34	-2.80	2.80	-5.17	2.37
8.82	-3.47	3.47	-6.69	3.22
11.32	-3.45	3.45	-6.65	3.20
15.10	-4.14	4.14	-8.28	4.14
16.66	-5.18	5.18	-10.84	5.66
18.17	-5.49	5.49	-11.61	6.12
20.63	-5.82	5.82	-12.46	6.64
21.84	-5.38	5.38	-11.33	5.95
23.35	-4.82	4.82	-9.93	5.11
25.35	-4.82	4.82	-9.93	5.11
27.62	-4.24	4.24	-8.51	4.28
30.16	-5.82	5.82	-12.46	6.64
31.45	-6.19	6.19	-13.42	7.23
33.34	-6.28	6.28	-13.65	7.37
35.66	-7.08	7.08	-15.76	8.68
35.97	-7.86	7.86	-17.88	10.01
36.61	-8.09	8.09	-18.50	10.41
38.68	-9.40	9.40	-22.13	12.74
41.35	-9.82	9.82	-23.34	13.52
43.35	-8.89	8.89	-20.71	11.82
44.99	-8.24	8.24	-18.92	10.67
45.51	-8.54	8.54	-19.74	11.20
47.66	-9.68	9.68	-22.94	13.26
49.29	-10.06	10.06	-24.02	13.96
50.23	-10.18	10.18	-24.35	14.18
52.92	-9.65	9.65	-22.84	13.19
54.30	-9.40	9.40	-22.15	12.75
55.90	-9.10	9.10	-21.30	12.20
59.16	-8.47	8.47	-19.55	11.08

62.18	-8.91	8.91	-20.78	11.86
63.47	-9.10	9.10	-21.30	12.20
65.68	-9.06	9.06	-21.19	12.13
67.07	-9.04	9.04	-21.14	12.09
67.07	-9.06	9.06	-21.18	12.12
68.01	-9.21	9.21	-21.60	12.39
68.85	-9.13	9.13	-21.39	12.26
70.55	-8.95	8.95	-20.86	11.92
73.60	-8.44	8.44	-19.47	11.03
77.35	-8.58	8.58	-19.84	11.26
80.41	-10.40	10.40	-25.00	14.60
85.25	-9.93	9.93	-23.64	13.71
88.29	-8.55	8.55	-19.77	11.22
92.45	-7.82	7.82	-17.76	9.94
94.91	-7.18	7.18	-16.03	8.85
96.30	-7.11	7.11	-15.85	8.74
97.25	-7.04	7.04	-15.65	8.61
98.15	-6.82	6.82	-15.06	8.24
98.82	-6.56	6.56	-14.38	7.82
99.42	-6.42	6.42	-14.01	7.59
99.56	-6.39	6.39	-13.94	7.55
100.09	-6.24	6.24	-13.54	7.30
100.56	-6.04	6.04	-13.01	6.98
101.01	-5.90	5.90	-12.67	6.77
101.42	-5.83	5.83	-12.49	6.66
101.75	-5.78	5.78	-12.35	6.57
101.98	-5.68	5.68	-12.10	6.42
102.09	-5.60	5.60	-11.88	6.29
102.23	-5.60	5.60	-11.90	6.30
102.33	-5.69	5.69	-12.12	6.43
104.26	-5.49	5.49	-11.62	6.13
106.28	-4.82	4.82	-9.93	5.11
107.97	-4.44	4.44	-9.00	4.56
109.86	-4.59	4.59	-9.36	4.77
112.11	-4.59	4.59	-9.36	4.77
115.01	-4.47	4.47	-9.07	4.60
116.17	-4.16	4.16	-8.32	4.16
118.37	-4.01	4.01	-7.97	3.96
123.35	-1.80	1.80	-3.05	1.25
125.29	-1.36	1.36	-2.18	0.82
129.00	0.00	0.00	0.00	0.00

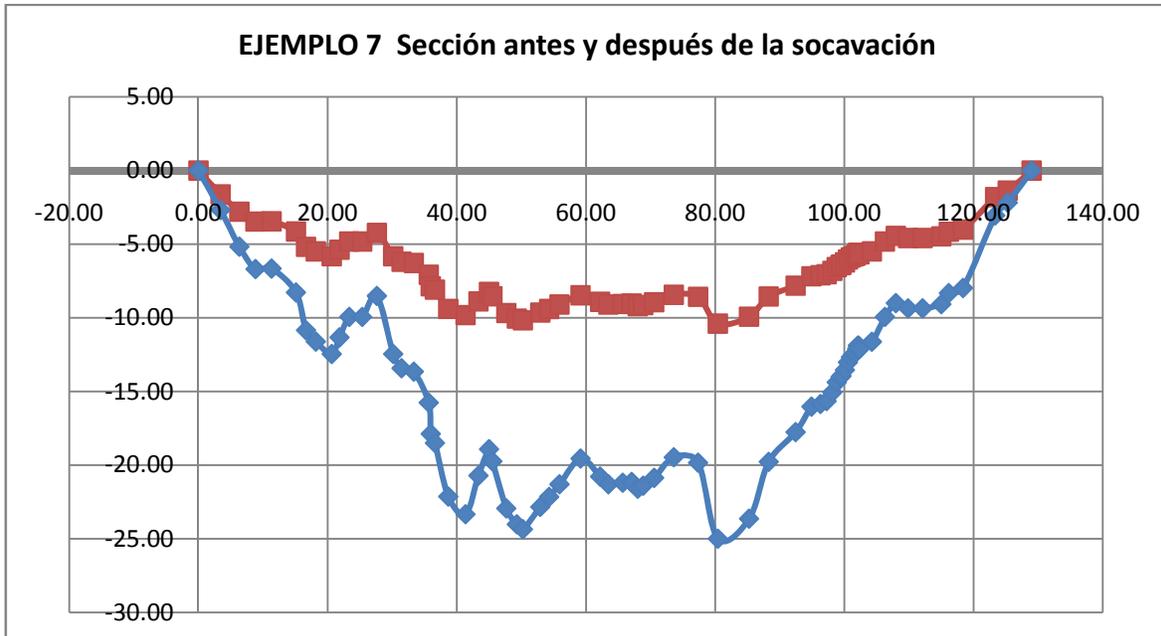


Figura A.47. Sección antes y después de la socavación del ejemplo 7.

Análisis de flujo interno posterior a la socavación

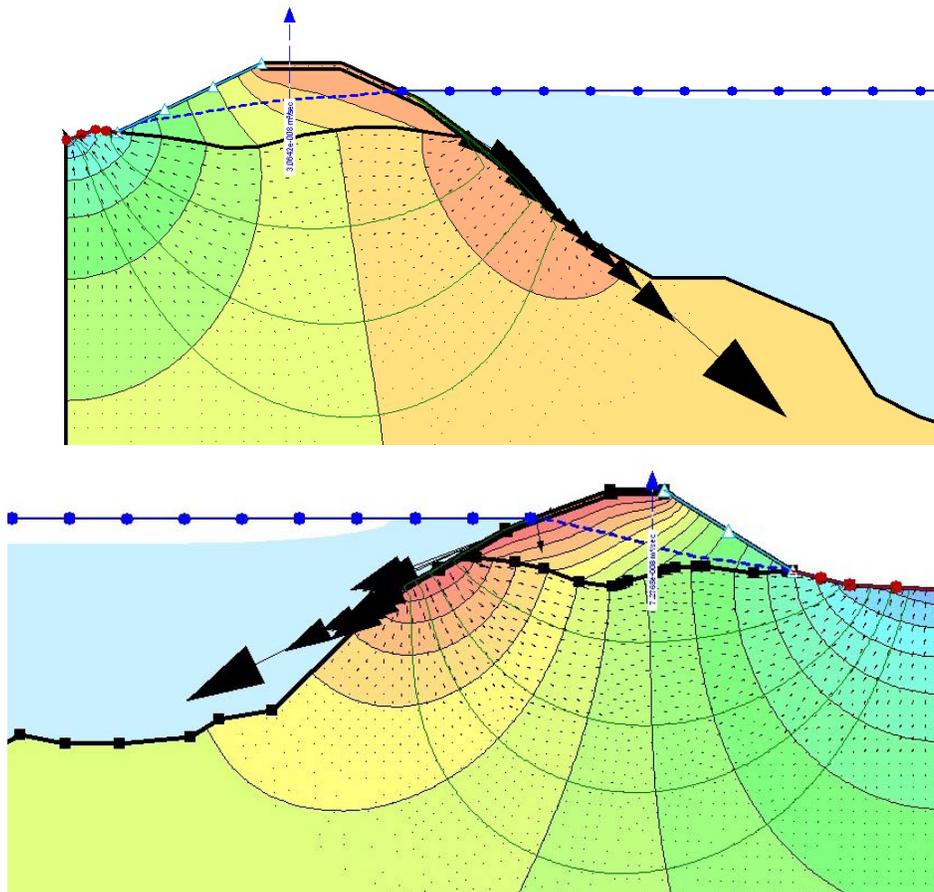


Figura A.48. Red de flujo de los bordos del ejemplo 7 después de la socavación.

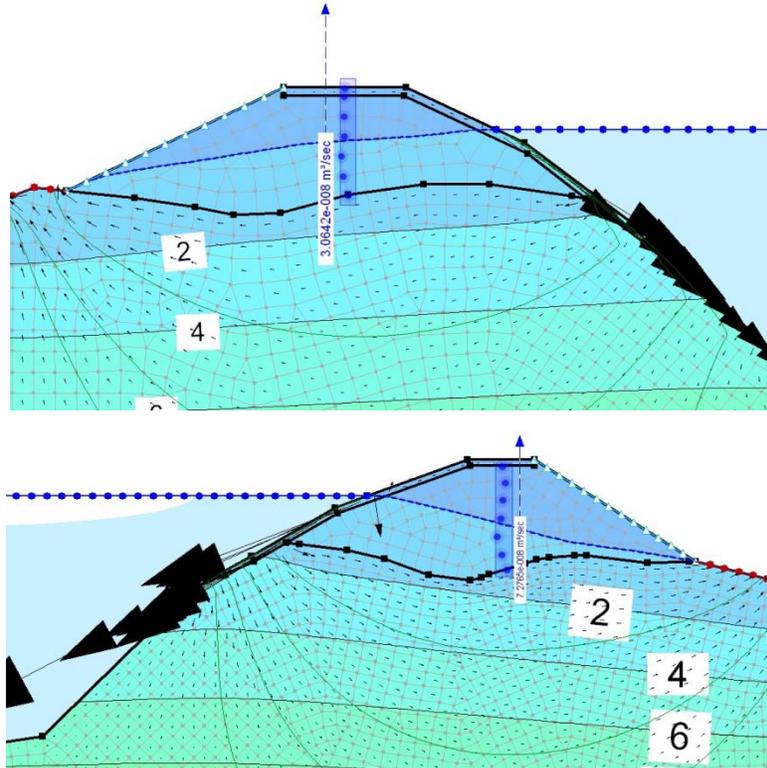
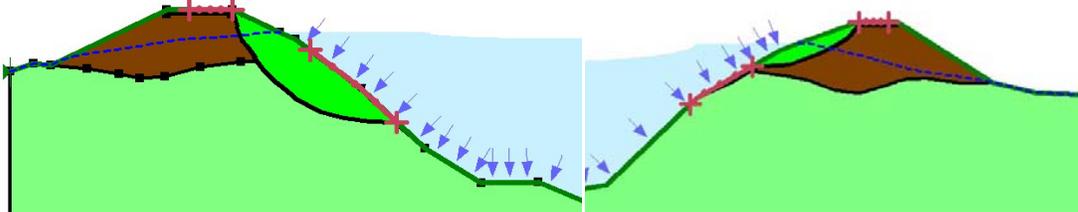


Figura A.49. Caídas de presiones y gastos de filtrado del ejemplo 7 después de la socavación.

0.4 0.5



Bordo izquierdo

Método de análisis: Bishop
 Factor de seguridad: 0.42
 Volumen total: 12.265 m³
 Peso total: 207.62 kN
 Momento resistente: 128 kN-m
 Momento activante: 307.13 kN-m

Bordo derecho

Método de análisis: Bishop
 Factor de seguridad: 0.47
 Volumen total: 4.4395 m³
 Peso total: 80.572 kN
 Momento resistente: 32 kN-m
 Momento actuante: 68.548 kN-m

ANEXO A. HOJAS TÉCNICAS DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS GEOTEXILES Y COLCHACRETOS



HYDROTEX™
Specification Guideline
Fabric-formed Concrete
Erosion Control Systems

Uniform Section
Lining

Table 1.0 Typical Dimensions and Weights

Uniform Section	US300	US400	US600	US800	US1000
Average Thickness, mm	76	102	152	203	254
Mass Per Unit Area, kg/m ²	165	220	330	440	550
Drop Point Spacing, mm	76 x 76	76 x 102	76 x 152	114 x 191	114 x 229
Concrete Coverage, m ² /m ³	12.1	9.1	6.1	4.6	3.6
Shear Resistance, kg/m ²	68	88	137	181	224

Note: Values shown are typical and will vary with weight of concrete and field conditions.

Product Description

Uniform Section Linings are similar to traditional concrete slope paving. They create a solid, high quality concrete lining with a relatively low hydraulic resistance and a uniform cross section. These linings are used to reduce the infiltration or exfiltration of aggressive waste and chemical fluids into or out of open channels and basins. They are also used to reduce exfiltration in arid regions where open channels and basins require watertight linings.

Uniform Section Linings are resistant to leachate and most chemicals. They protect geosynthetic liners from mechanical damage, exposure to UV light, and freeze-thaw cycles. These self-supporting, high strength, linings permit construction on steep side slopes and replace the conventional use of clay or sand as liner protection. Concrete filling of the forms can be performed with a minimum of traffic on the liner, and the tensile strength and abrasion resistance of the fabric protect the liner from the pumped concrete.

Uniform Section forms are woven from multifilament and textured yarns. The double-layer fabric is joined at closely spaced centers by interwoven drop cords to form a lining of the specified thickness and weight.

1.0 GENERAL

1.1 Scope of Work: The Contractor shall furnish all labor, materials, equipment, and incidentals required to perform all operations in connection with the installation of the proposed Uniform Section (US) Lining in accordance with the lines, grades, design, and dimensions shown on the Contract Drawings and as specified herein.

1.2 Description: The work shall consist of installing an unreinforced concrete lining by positioning specially woven, double-layer synthetic forms on the surface to be protected and filling them with a pumpable, fine aggregate concrete (structural grout) in such a way as to form a stable lining of required thickness, weight and configuration.

2.0 MATERIALS REQUIREMENTS

2.1 Fine Aggregate Concrete: Fine aggregate concrete shall consist of a proportioned mixture of Portland cement, fine aggregate (sand) and water. The consistency of the fine aggregate concrete delivered to the concrete pump shall be proportioned and mixed as to have an efflux time of 9-12 seconds when passed through the 19 mm orifice of the standard flow cone that is described in ASTM C 939. Pozzolan, fluidifier or pumping aid conforming to this Specification may be used at the option of the Contractor. The mix shall exhibit a compressive strength of 13.8 MPa at 28 days, when made and tested in accordance with ASTM C 31 and C 39.

2.1.1 Portland cement shall conform to ASTM C 150, Type I or Type II.

2.1.2 Fine aggregate shall conform to ASTM C 33, except as to grading. Aggregate grading shall be reasonably consistent and shall not exceed the maximum size which can be conveniently handled with available pumping equipment.

PROPERTY REQUIREMENTS - UNIFORM SECTION FABRIC ^{1, 2}			
Property	Test Method	Units	Values
Physical:			
Composition of Yarns			Nylon or polyester
Mass Per Unit Area (double-layer)	ASTM D 5261	g/m ²	403
Thickness	ASTM D 5199	mm	0.6
Mill Width		m	1.92
Mechanical:			
Wide-Width Strip Tensile Strength	- Machine	ASTM D 4595	kN/m
	- Cross		kN/m
Elongation at Break	- Machine	ASTM D 4595	%
	- Cross		%
Trapezoidal Tear Strength	- Machine	ASTM D 4533	N
	- Cross		N
Hydraulic:			
Apparent Opening Size (AOS)	ASTM D 4751	mm	0.425
Flow Rate	ASTM D 4491	l/min/m ²	3665

Notes:

1. Conformance of fabric to specification property requirements shall be based on ASTM D 4759, "Practice for Determining the Specification Conformance of Geotextiles."
2. All numerical values represent minimum average roll values (i.e., average of test results from any sample roll in a lot shall meet or exceed the minimum values). Lots shall be sampled according to ASTM D 4354, "Practice for Sampling of Geosynthetics for Testing."

2.1.3 Water for mixing shall be clean and free from injurious amounts of oil, acid, salt, alkali, organic matter or other deleterious substances.

2.1.4 Pozzolan, if used, shall conform to ASTM C 618, Class C, F or N.

2.1.5 Plasticizing and air entraining admixtures, if used, shall conform to ASTM C 494 and ASTM C 260, respectively.

2.2 **Fabric Forms:** The fabric forms shall be as specified, HYDROTEX™ Uniform Section (*see Note A*) forms as manufactured by Geostar Corporation; 74 Perimeter Center East, Suite 7420; Atlanta, Georgia 30346-1803, Tel: 800.253.0561 (770.399.5051); or approved equal. The fabric forms shall be composed of synthetic yarns formed into a woven fabric. Yarns used in the manufacture of the fabric shall be composed of nylon and/or polyester. Forms shall be woven with a minimum of 50% textured yarns (by weight) to improve adhesion to fine aggregate concrete and to improve filtration. Partially-oriented (POY), draw-textured, and/or staple yarns shall not be used in the manufacture of the fabric. Each layer of fabric shall conform to the physical, mechanical and hydraulic requirements referenced herein. The fabric forms shall be free of defects or flaws which significantly affect their physical, mechanical, or hydraulic properties.

Note A: The engineer shall indicate the Uniform Section Lining size required (see Table 1.0). Example: US400.

2.2.1 Fabric forms shall consist of double-layer woven fabric joined together by spaced, interwoven cords of uniform length to form a concrete lining with a finished average thickness of (*see Table 1.0*) mm and a nomi-

nal mass per unit area of (*see Table 1.0*) kg/m². The cords shall be interwoven in pairs and each cord shall have a minimum breaking strength of 710 N when tested in accordance with ASTM D 2256. After the form has been filled with fine aggregate concrete, the cords' drop points shall be on approximately ____ mm x ____ mm (*see Table 1.0*) spacings. The cords shall connect the two layers of fabric to form a comparatively uniform surface appearance.

2.2.2 Mill widths of fabric shall be a minimum of 1.92 meters. Each selvage edge of the top and bottom layers of fabric shall be reinforced for a width of not less than 35 mm by adding a minimum of 6 warp yarns to each selvage construction. Mill width rolls shall be cut to the length required, and the double-layer fabric separately joined, bottom layer to bottom layer and top layer to top layer, by means of sewing thread, to form multiple mill width panels with sewn seams on not less than 182 cm centers.

2.2.3 All factory-sewn seams shall be downward facing as shown on the Contract Drawings. All seams sewn in the factory shall be not less than 15.7 kN/m when tested in accordance with ASTM D 4884. All sewn seams and zipper attachments shall be made using a double line of U.S. Federal Standard Type 401 stitch. All stitches shall be sewn simultaneously and be parallel to each other, spaced between 6 and 19 mm apart. Each row of stitching shall consist of 4 to 7 stitches per 25.4 mm. Thread used for seaming shall be nylon and/or polyester.

2.2.4 Baffles shall be installed at predetermined mill width intervals to regulate the distance of lateral flow of fine

aggregate concrete. The baffle material shall be non-woven filter fabric. The grab tensile strength of the filter fabric shall be not less than 400 N when tested in accordance with ASTM D 4632.

2.2.5 Whenever plastic weep tubes for the relief of hydrostatic uplift pressure are required, they shall be inserted through the fabric forms at locations specified in the Contract Drawings. The lower ends of the weep tubes shall be securely covered by filter fabric, or the fabric forms shall be placed over filter fabric as specified elsewhere in this Specification.

2.2.6 The fabric forms shall be kept dry and wrapped such that they are protected from the elements during shipping and storage. If stored outdoors, they shall be elevated and protected with a waterproof cover that is opaque to ultraviolet light. The fabric forms shall be labeled as per ASTM D 4873, "Guide for Identification, Storage and Handling of Geosynthetic Rolls."

2.2.7 The Contractor shall submit a manufacturer's certificate that the supplied fabric forms meet the criteria of these Specifications, as measured in full accordance with the test methods and standards referenced herein. The certificates shall include the following information about each fabric form delivered:

- Manufacturer's name and current address;
- full product name;
- style and product code number;
- form number(s);
- composition of yarns; and
- manufacturer's certification statement.

2.3 Filter Fabrics: The filter fabrics shall be composed of synthetic fibers or yarns formed into a nonwoven or woven fabric. Fibers and yarns used in the manufacture of filter fabrics shall be composed of at least 85% by weight of polypropylene, polyester or polyethylene. They shall be formed into a network such that the filaments or yarns retain dimensional stability relative to each other, including selvages. These materials shall conform to the physical requirements shown below. The filter fabric shall be free of defects or flaws which significantly affect its mechanical or hydraulic properties.

PROPERTY REQUIREMENTS - FILTER FABRIC 1, 2			
Property	Test Method	Units	Values
Grab Tensile Strength	ASTM D 4632	N	400
Elongation at Break	ASTM D 4632	%	15
Trapezoidal Tear Strength	ASTM D 4533	N	130
Permittivity	ASTM D 4491	sec ⁻¹	0.5

Notes:

1. Conformance of filter fabrics to specification property requirements shall be based on ASTM D 4759, "Practice for Determining the Specification Conformance of Geotextiles."
2. All numerical values represent minimum average roll values (i.e., average of test results from any sample roll in a lot shall meet or exceed the minimum values). Lots shall be sampled according to ASTM D 4354, "Practice for Sampling of Geosynthetics for Testing."

3.0 DESIGN REQUIREMENTS

Note B: Select the appropriate pair of paragraphs for the final specification based upon the type of hydraulic application.

The average thickness, mass per unit area and hydraulic resistance of each concrete lining shall withstand the hydraulic loadings (velocity, depth, duration, shear stress, pressure, and frequency of immersion) for the design discharges along the structure(s). The stability analysis for each concrete lining shall be accomplished using a factor-of-safety methodology. A minimum factor of safety of 1.5 shall be required.

The Contractor shall provide to the Engineer calculations and design details, provided by the manufacturer or a professional engineer, attesting to the suitability of each fabric formed concrete lining for the purpose contemplated. Each concrete lining shall be accepted only when accompanied by the documented hydraulic performance characteristics derived from tests performed under controlled flow conditions. Test conditions shall conform to test protocol as documented in "Hydraulic Stability of Fabric Formed Concrete Lining and Mat Systems During Overtopping Flow."

or

The average thickness, mass per unit area and hydraulic resistance of each concrete lining shall withstand the hydraulic loadings (depth, duration, type of wave, wave height and period, and pressure distribution) for the design wave. The stability analysis for the concrete lining shall be accomplished using the factor-of-safety methodology. A minimum factor of safety of 1.5 shall be required.

The Contractor shall provide to the Engineer calculations and design details, provided by the manufacturer or a professional engineer, attesting to the suitability of each fabric formed concrete lining for the purpose contemplated. Each concrete lining shall be accepted only when accompanied by hydraulic stability calculations derived from mathematical models developed specifically for fabric formed concrete linings and for this purpose.

4.0 CONSTRUCTION AND INSTALLATION REQUIREMENTS

4.1 Site Preparation

4.1.1 Areas on which fabric forms are to be placed shall be constructed to the lines, grades, contours, and dimensions shown on the Contract Drawings. All obstructions such as roots and projecting stones shall be removed. Where such areas are below the allowable grades, they shall be brought to grade by placing compacted layers of select material. The thickness of layers and the amount of compaction shall be as specified by the Engineer. Where required by the Contract Specifications, soft and otherwise unsuitable subgrade soils shall be identified, excavated and replaced with select materials in accordance with the Contract Specifications.

4.1.2 Excavation and preparation of aprons as well as anchor, terminal or toe trenches shall be done in accordance with the lines, grades, contours, and dimensions shown on the Contract Drawings.

4.1.3 Immediately prior to placing the fabric forms, the prepared area shall be inspected by the Engineer, and no

forms shall be placed thereon until the area has been approved.

4.2 Fabric Form Placement

- 4.2.1 Whenever specified, a filter fabric shall be placed on the graded surface or ends of weep tubes approved by the Engineer. If a filter fabric is not required, fabric forms shall be placed directly on the prepared sub-grade.
- 4.2.2 Fabric forms shall be placed within the limits shown on the Contract Drawings. Anchoring of the fabric forms shall be accomplished through the use of anchor, terminal and toe trenches.
- 4.2.3 Adjacent fabric forms shall be joined before filling with fine aggregate concrete by field sewing or zippering the two bottom layers of fabric together and the two top layers of fabric together. All field seams shall be made using two lines of U.S. Federal Standard Type 101 stitches. All sewn seams shall be downward facing, and all zipper seams shall be fastened as shown on the Contract Drawings, except with the approval of the Engineer.
- 4.2.4 When conventional joining of fabric forms is impractical or where called for in the Contract Drawings, adjacent forms may be overlapped a minimum of one meter to form a lap joint, pending approval by the Engineer. Based on the predominant flow direction, the downstream edge of the form shall overlap the upstream edge of the next form. In no case shall simple butt joints between forms be permitted.
- 4.2.5 Expansion joints shall be provided as shown on the Contract Drawings, or as specified by the Engineer.
- 4.2.6 Immediately prior to filling with fine aggregate concrete, the assembled fabric forms shall be inspected by the Engineer, and no fine aggregate concrete shall be pumped therein until the fabric form placement has been approved. At no time shall the fabric forms be

exposed to ultraviolet light (including direct sunlight) for a period exceeding five days.

4.3 Fine Aggregate Concrete Placement

- 4.3.1 Following the placement of the fabric forms, small sills shall be cut in the top layer of the fabric form to allow the insertion of the filling pipe at the end of the fine aggregate concrete pump hose. These sills shall be of the minimum length to allow proper insertion of the filling pipe. Fine aggregate concrete shall be pumped between the top and bottom layers of fabric, filling the forms to the recommended thickness and configuration.
- 4.3.2 Fine aggregate concrete shall be pumped in such a way that excessive pressure on the fabric forms and cold joints are avoided. A cold joint is defined as one in which the pumping of the fine aggregate concrete into a given form is discontinued or interrupted for an interval of forty-five or more minutes.
- 4.3.3 Holes in the fabric forms left by the removal of the filling pipe shall be temporarily closed by inserting a piece of nonwoven fabric or similar material. The nonwoven fabric shall be removed when the concrete is no longer fluid and the concrete surface at the hole shall be cleaned and smoothed by hand. Foot traffic on the filled form shall be restricted to an absolute minimum for one hour after filling.
- 4.3.4 After the fine aggregate concrete has set, all anchor, terminal and toe trenches shall be backfilled and compacted, as specified by the Engineer.
- 4.3.5 The Uniform Section Lining shall be measured by the number of square meters computed from the payment lines shown on the Contract Drawings or from payment lines established in writing by the Engineer. This includes Uniform Section fabric forms, fine aggregate concrete, and filter fabric used in the aprons, overlaps, and anchor, terminal, or toe trenches. Slope preparation, excavation and backfilling, and bedding are separate pay items.

Spec: US (siu)
Revised December 2001

Hydrotex products are manufactured by:

Geostar Corporation
74 Perimeter Center East, Suite 7420
Atlanta, Georgia 30346-1803
Tel: 1.800.253.0561 or 770.399.5051 Fax: 770.394.5999
www.geostarcorporation.com • e-mail: info@geostarcorporation.com

Hydrotex and Hydrocast are trademarks of Geostar Corporation.

© 2001 Geostar Corporation • Printed in U.S.A.

The information contained herein is furnished without charge or obligation, and the recipient assumes all responsibility for its use. Because conditions of use and handling may vary and are beyond our control, we make no representation about, and are not responsible for, the accuracy or reliability of said information or the performance of any product. Any specifications, properties or applications listed are provided as information only and in no way modify, enlarge or create any warranty. Nothing contained herein is to be construed as permission or as a recommendation to infringe any patent.

Call or write for your complete set of HYDROTEX™ and HYDROCAST™ Specification Guidelines. Available as printed specifications, in Adobe® Acrobat® (pdf) format, or in an editable text format. PDF specifications are available for download from our web site at www.geostarcorporation.com.

HOJA DE ESPECIFICACIONES DE GEOTEXILES FELTRET

► DESCRIPCIÓN

Los Geotextiles Feltret son telas no tejidas compuestas de fibras de poliéster, ligadas mecánicamente por punzonado de agujas, las telas tienen un espesor que fluctúa entre 1,8 y 4,0 mm.de espesor

► TIPOS DE GEOTEXILES FELTRET

G - 10 , G - 20 , G - 40 , G - 50 G - 60 , G - 70 , G - 80

► ESPECIFICACIONES TECNICAS

Se fabrican en 2,50 m de ancho y 100 m de largo. Casos especiales son el G10 que también se fabrica en rollos de 100 mts de largo por 1,45 mts de ancho (145 mt2), y el G20 que también esta en formato de 100 mts de largo por 1,50 mts de ancho (150 mt2).

► COMERCIALIZACIÓN

Poseen distribución con cobertura exclusiva, por tener características técnicas precisas, las que determinan necesidades específicas. Se entregan en rollos envueltos en plástico transparente, el cual lleva el logotipo de la Empresa.

► CARACTERISTICAS MAS IMPORTANTES

Las características más importantes de los Geotextiles Feltret, es su permeabilidad al agua , su resistencia a los agentes químicos y a la humedad, su resistencia a los rayos ultravioleta

► VENTAJAS

- Permeable.
- Durable.
- Resistente a la pudrición.
- Resistente al moho.
- Alta absorción, constituyéndose en el alma de las geomembranas Impermeables.
- Resistente a la temperatura (funde a 250 °C).
- Se auto extingue (quema sin llama).
- No requiere mantención.

► GARANTÍAS

Feltret cuenta con laboratorio propio, practica Ensayos bajo normas ASTM. Los ensayos de Permeabilidad y Abertura Aparente fueron practicados por el DICTUC

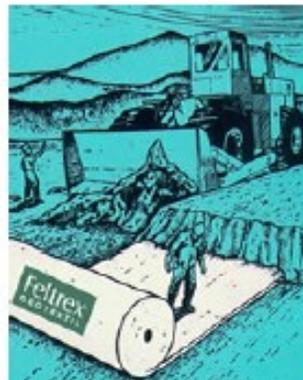
► DURACIÓN

Duración Indefinida.

► PRINCIPALES APLICACIONES

Las aplicación de los geotextiles en Carretera se subdividen en:

- Estabilización de suelos
- Función separadora entre capas de diferente granulometría
- Función de filtro en sistemas de drenaje.
- Refuerzo de subsuelos débiles
- Control de erosión



- Prevención de reflexión de grietas.

▶ OTRAS APLICACIONES

- Jardinería, construcción de vías fluviales y canales.
- Protecciones costeras y construcciones marinas.
- Muros de contención de tranques, canales de regadío y de desagüe.
- Construcción de líneas de ferrocarril.
- Captación de aguas subterráneas.
- Geomembranas.
- Impermeabilizaciones. Para Impermeabilizar, se fabrican geotextiles de 75 grs/ m² que hacen más fácil su instalación
- Protección superficial de taludes contra la erosión.

▶ INSTALACIÓN

La colocación de los geotextiles depende de las distintas aplicaciones y necesidades requeridas.

▶ MANTENCIÓN

No requiere ningún tipo de mantención.

▶ ASESORIA TÉCNICA

Asesoría técnica en instalación, propiedades, elección del tipo apropiado.

▶ EMBALAJE

Los geotextiles se expenden en rollos de 100 metros de largo y 2,50 metros de ancho.

▶ EXPERIENCIAS

- Obra: Camino de acceso a Planta de Canutiliar, Endesa (30.000 m lineales)
- Obra: Mall La Serena Endesa (30.000 m lineales) Estacionamiento Parque Arauco
- Remodelación Palacio Riesco
- Fundaciones y base estacionamiento. Centro de Eventos CASAPIEDRA
- Canchas de tenis San Carlos de Apoquindo
- Estabilización terreno, cancha Est.Monumental

Características Físicas									
ENSAYO	UNIDADES	G-10	G-20	G-40	G-50	G-60	G-70	G-80	NORMA ASTM
Masa por unidad de Superficie	g/m ²	105	140	200	230	280	330	385	D 5251
Espesor	mm	1,8	2,2	2,7	2,9	3,4	3,8	4,0	D 5199
Características Hidraulicas									
Coefficiente de Permeabilidad	cm/s	0,35	0,35	0,27	0,22	0,22	0,20	0,24	D 4491
Permitividad	s ⁻¹	1,9	1,6	1,0	0,76	0,66	0,52	0,61	D 4491
Abertura aparente	mm	0,15	0,125	0,106	0,106	0,090	0,075	0,075	D 4751
Permeabilidad al aire	cm ³ /cm ² /s	205	160	130	115	73	68	64	D 737

Características Mecánicas									
Resistencia a la Tracción (Grab)	N	210	310	480	630	800	1.000	1.200	D 4632
Resistencia al Costurado	N	190	280	430	570	720	900	1080	D 4884
Elongación a La ruptura	%	100	98	96	94	92	91	90	D 4632
Resistencia al rasgado (corte trapezoidal)	N	75	120	180	200	260	300	350	D 4533
Resistencia al Reventado	kpa	500	650	1400	1500	1900	2300	2600	D 3786
Resistencia al Punzonamiento	N	185	195	295	360	460	645	715	D 4833
Estabilidad UV 500 horas	%	95	95	95	95	95	95	95	D 4355
Nota: El peso específico del Poliéster usado en la fabricación de todos los geotextiles es de 1,38									
Embalaje	Todos los geotextiles Feltrex se expenden en rollos								
Longitud del rollo	m	100	100	100	100	100	100	100	
Ancho del geotextil	m	1,45-2,5	1,50-2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	
Superficie	m2	145-250	150-250	250	250	250	250	250	

