

UCLV
Universidad Central
“Marta Abreu” de Las
Villas



FC
Facultad de
Construcciones

Departamento Ingeniería Hidráulica

TRABAJO DE DIPLOMA

**Título : Propuesta de predimensionamiento a partir del análisis
de las filtraciones y la estabilidad de taludes en presas
de tierra en Cuba.**

Autores : Anair Duarte Pereira

Tutores : Dr. Cs. Gilberto Quevedo Sotolongo

Este documento es Propiedad Patrimonial de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, y se encuentra depositado en los fondos de la Biblioteca Universitaria “Chiqui Gómez Lubian” subordinada a la Dirección de Información Científico Técnica de la mencionada casa de altos estudios.

Se autoriza su utilización bajo la licencia siguiente:

Atribución- No Comercial- Compartir Igual



Para cualquier información contacte con:

Dirección de Información Científico Técnica. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Carretera a Camajuaní. Km 5½. Santa Clara. Villa Clara. Cuba. CP. 54 830

Teléfonos.: +53 01 42281503-

Pensamiento

Los científicos estudian el mundo tal como es; los ingenieros crean el mundo que nunca ha sido.

Theodore von Karman.

Dedicatoria

A mis padres por ser quienes me han guiado toda mi vida de la mejor manera por los mejores caminos y por haberlo entregado todo a cambio de convertirme en una profesional.

A mi hermano por haberme apoyado en todos los momentos tanto de mi carrera como de mi vida.

A mi novio por ayudarme y acompañarme, por ser mi consejero en los momentos más difíciles y a su familia por estar siempre conmigo.

A mis abuelas por preocuparse siempre por mí.

A mi familia.

Y a todo aquel que de una forma u otra ha aportado a mi formación como profesional.

Agradecimientos

A mis padres, a mi hermano, a mi novio y su familia por admirarme como una hija más, a Lligui porque sin su ayuda no hubiese podido lograr mi sueño, a mis abuelas, a mis compañeras de cuarto por compartir conmigo estos cinco años, a mi familia, a mis amigos, a mi tutor por brindarme su experiencia, a mis profesores de la UCLV y del IPH por aportarme todos sus conocimientos, a todos los que me han ayudado a cumplir esta meta.

Resumen

En el presente trabajo se analiza las filtraciones y estabilidad de taludes en presas de tierra homogéneas para las condiciones de Cuba, a partir de un estudio de las características de 12 embalses del país y la selección de los principales parámetros de altura de la cortina, tipo de drenaje, pendientes de los taludes y propiedades de los suelos existentes en ellas. A partir de estos datos y con la ayuda del programa GeoStudio 2007 se analiza la influencia de estos parámetros para diferentes condiciones en el estado de carga explotación solucionando así 9 problemáticas cada una con 3 condiciones de suelos diferente. Se obtuvieron como resultados los valores de factores de seguridad y a partir de ellos se propone parámetros para el predimensionamiento de presas de tierra en Cuba.

Palabras claves: Predimensionamiento, Presas, Filtraciones, Estabilidad de taludes.

Abstract

In the present work the filtrations and stability of slopes in homogenous earth dams are analyzed for the conditions of Cuba, from a study of the characteristics of 12 dams of the country and the selection of the main parameters of height of the curtain, type of drainage, slopes of the slopes and properties of the existing soils in them. From these data and with the help of the GeoStudio 2007 program, the influence of these parameters is analyzed for different conditions in the exploitation load state, thus solving 9 problems each with 3 different soil conditions. The values of safety factors were obtained as a result and, from them, parameters for the pre-sizing of earth dams in Cuba are proposed.

Keywords: Predimensioning, Dams, Leaks, Stability of slopes

Contenido

Introducción:	1
Problema científico:	3
Hipótesis científica de investigación:	3
Objetivos general:	3
Objetivos específicos:	3
Tareas investigativas	4
Novedad Científica:	5
Aporte metodológico	6
Estructura del trabajo:	6
Capítulo 1: Estado del arte sobre la estabilidad de taludes y filtraciones de presas de tierra empleando técnicas computacionales.	7
1.1 Tipología de las presas en Cuba.	7
1.2 Bases generales para el diseño de la sección de la cortina	9
1.3 Criterios de predimensionamiento de presa de tierra.	12
1.4 Análisis de filtraciones en presas de tierra.	21
1.5 Análisis de estabilidad de taludes en presas de tierra.	23
1.6 Análisis del Software GeoStudio.	30
Capítulo 2 Análisis de los métodos teóricos de estabilidad de taludes y filtraciones en presas de tierra y sus particularidades.	32
2.1 Métodos de análisis de filtraciones en presas.	32
2.1.1 Método de las Dovelas.	32
2.1.2 Método de Fellenius	35
2.1.3 Método simplificado de Bishop	35
2.1.4 Método de Janbú:	37
2.1.5 Método de Spencer:	38
2.1.6 Método de Morgenstern-Price.	40
2.1.7 Determinación del centro y el radio crítico.	40
2.2 Métodos de análisis de filtraciones en presas.	41
2.2.1 Teoría de la línea de corriente superior. Condiciones de entrada y salida.	42
2.2.2 Teoría de Dupuit.	45
2.2.3 Solución de Schaffernak y Van Iterson para la LCS.	48
2.2.4 Solución de Kozeny para la línea de corriente superior	51
2.2.5 Solución de Casagrande para la línea de corriente superior.	53
2.2.6 Teoría de la sección transformada.	56

2.3 Características generales de los tipos de drenajes en las presas cubanas. ...	60
2.4 Características generales de los taludes y alturas en las presas cubanas.....	61
2.5 Características generales de los suelos en las presas cubanas.	63
2.6 Características principales del programa computacional GeoStudio 2007.	63
Capítulo 3 Implementación de los métodos teóricos en el programa computacional GeoStudio 2007 y sus soluciones.	66
3.1 Análisis de problemáticas de filtraciones y estabilidad de taludes en presas de tierra con alturas de 10 m.	66
3.1.1 Problemática N°1 Análisis de las filtraciones y estabilidad de taludes en cortina de presa de tierra.	66
3.1.2 Problemática N°2 Análisis de las filtraciones y estabilidad de taludes en cortina de presa de tierra.	68
3.1.3 Problemática N°3 Análisis de las filtraciones y estabilidad de taludes en cortina de presa de tierra.	70
3.2 Análisisde problemáticas de filtraciones y estabilidad de taludes en presas de tierra con alturas de 25 m.	72
3.2.1 Problemática N°4 Análisis de las filtraciones y estabilidad de taludes en cortina de presa de tierra.	72
3.2.2 Problemática N°5 Análisis de las filtraciones y estabilidad de taludes en cortina de presa de tierra.	74
3.2.3 Problemática N°6 Análisis de las filtraciones y estabilidad de taludes en cortina de presa de tierra.	76
3.3 Análisis de problemáticas de filtraciones y estabilidad de taludes en presas de tierra con alturas de 40 m.	78
3.3.1 Problemática N°7 Análisis de las filtraciones y estabilidad de taludes en cortina de presa de tierra.	78
3.3.2 Problemática N°8 Análisis de las filtraciones y estabilidad de taludes en cortina de presa de tierra.	80
3.3.3 Problemática N°9 Análisis de las filtraciones y estabilidad de taludes en cortina de presa de tierra.	82
3.4 Propuesta de parámetros de diseño.....	84
3.4.1 Representación gráfica de los resultados obtenidos.....	84
3.4.2 propuesta de Párametros de diseño	87
Conclusiones	89
Recomendaciones	90
Bibliografía.....	91

Introducción:

Las presas de tierras tienen una gran importancia para el desarrollo del país es por eso que al hablar de ellas no se puede dejar de mencionar el análisis de filtraciones y estabilidad de taludes. Con el desarrollo de la Mecánica de Suelos en el siglo pasado se comenzó a realizar estudios más reales de las filtraciones y estabilidad de taludes a través de los medios porosos con grandes aplicaciones en el diseño de presas de tierras, algo que con anterioridad se realizaba por métodos empíricos.

Con la aparición de novedosas técnicas computacionales en el mundo de la ingeniería existen programas capaces de modelar estos fenómenos reales y así lograr una mejor simulación de la influencia que puede tener en la estructura algunos de los factores que actúan sobre ella.

Para el diseño de presas de tierra homogéneas es imprescindible conocer la influencia de los principales factores en la estabilidad de taludes y análisis de filtraciones de acuerdo con la zona donde se realizará el proyecto, es por ello que se hace necesario un análisis minucioso de las propiedades de los suelos, tipos de drenajes y alturas a emplear en el diseño, y chequear esto para los distintos estados de cargas como pueden ser: Final de construcción y explotación, y su comprobación analítica a través de programas computacionales.

Este tema tiene ya sus antecedentes en la Facultad de Construcciones de la Universidad Central Marta Abreu de las Villas donde se han realizado estudios como:

- 1) Trabajo para obtener el grado científico de doctor en ciencias técnicas “La estabilidad de cortinas de presas de tierra mediante la solución de los estados tenso-deformacionales y la aplicación de la teoría de seguridad” del autor Dr. Lamberto Alvares Gil, año 1998.
- 2) Trabajo de Diploma “Análisis de estabilidad de taludes mediante técnicas de modelación en 3D utilizando Plaxis 3d Foundation” del autor Ing. Reinier Azorín Cruz. Tutores Dr. Lamberto Álvarez Gil. Ing. Michael Álvarez, Santa Clara 2014.

- 3) Trabajo de Diploma “Metodología para el análisis de estabilidad de taludes” de la autora Ing. Anaibys Hernández Julián. Tutores Dr. Lamberto Álvarez Gil e Ing. Michael Álvarez, Santa Clara 2014.
- 4) Trabajo de Diploma “Análisis de las filtraciones y la estabilidad de taludes en presas de tierra ” del autor Ing. Armando Velázquez Sentmanat. Tutor Dr. Cs. Gilberto Quevedo Sotolongo, Santa Clara 2016.
- 5) Trabajo de Diploma “Análisis de filtraciones y estabilidad de taludes en presas de tierra para suelos parcialmente saturados”del autor Ing. Lismary Cordero Mejias.Tutores:Dr. Cs.Gilberto Julio Quevedo Sotolongo Ing. Claudia María Rodríguez Rodríguez, Santa Clara 2017.
- 6) Trabajo de Diploma “Modelación tenso-deformacional de presas de tierra” del autor Ing. Lisvany García Valdés.Tutores:Dr. Cs. Gilberto Julio Quevedo Sotolongo Dr. Lamberto Álvarez Gil.Santa Clara2017

Como se puede comprobar, los ingenieros han elaborado una serie de métodos con los que se pueden obtener el factor de seguridad de los taludes pero debido a la gran variedad de casos presentes en la vida real no es posible concretar un método único y general para resolver esta problemática por lo que es necesario hacer un análisis de la diferentes opciones y ver la que se aproxima mejor al modelo real. En el presente estudio se emplearán recomendaciones para el predimensionamiento de presas de tierras bajo la influencia de parámetros como propiedades del suelo, tipos de drenaje y alturas para las condiciones de Cuba. Por último se procederá a la implementación del programa GeoStudio 2007 que permitirá la comprobación de los resultados obtenidos y servirá de base para tomar decisiones con respecto al diseño.

Es por ello que podemos fundamentar la investigación debido a la importancia del análisis de filtraciones y estabilidad de taludes en presas de tierra en Cuba mediante el siguiente problema de investigación:

Problema científico:

A partir de la influencia de los diferentes parámetros como las propiedades de los suelos, tipos de drenajes y alturas, en las condiciones de Cuba, ¿cómo variaría el análisis de filtraciones y estabilidad de taludes en presas de tierra?

Hipótesis científica de investigación:

Si se incorporan parámetros determinantes como propiedades de los suelos, tipos de drenajes y alturas al análisis de filtraciones y estabilidad de taludes es posible obtener un cambio del factor de seguridad en presas de tierra para las condiciones de Cuba, y sobre ello proponer criterios de predimensionamiento.

Objetivos general:

Determinar mediante el programa GeoStudio 2007 como se comporta las filtraciones y estabilidad de taludes en Cuba bajo la influencia de parámetros como propiedades de los suelos, tipos de drenajes y altura de la cortina.

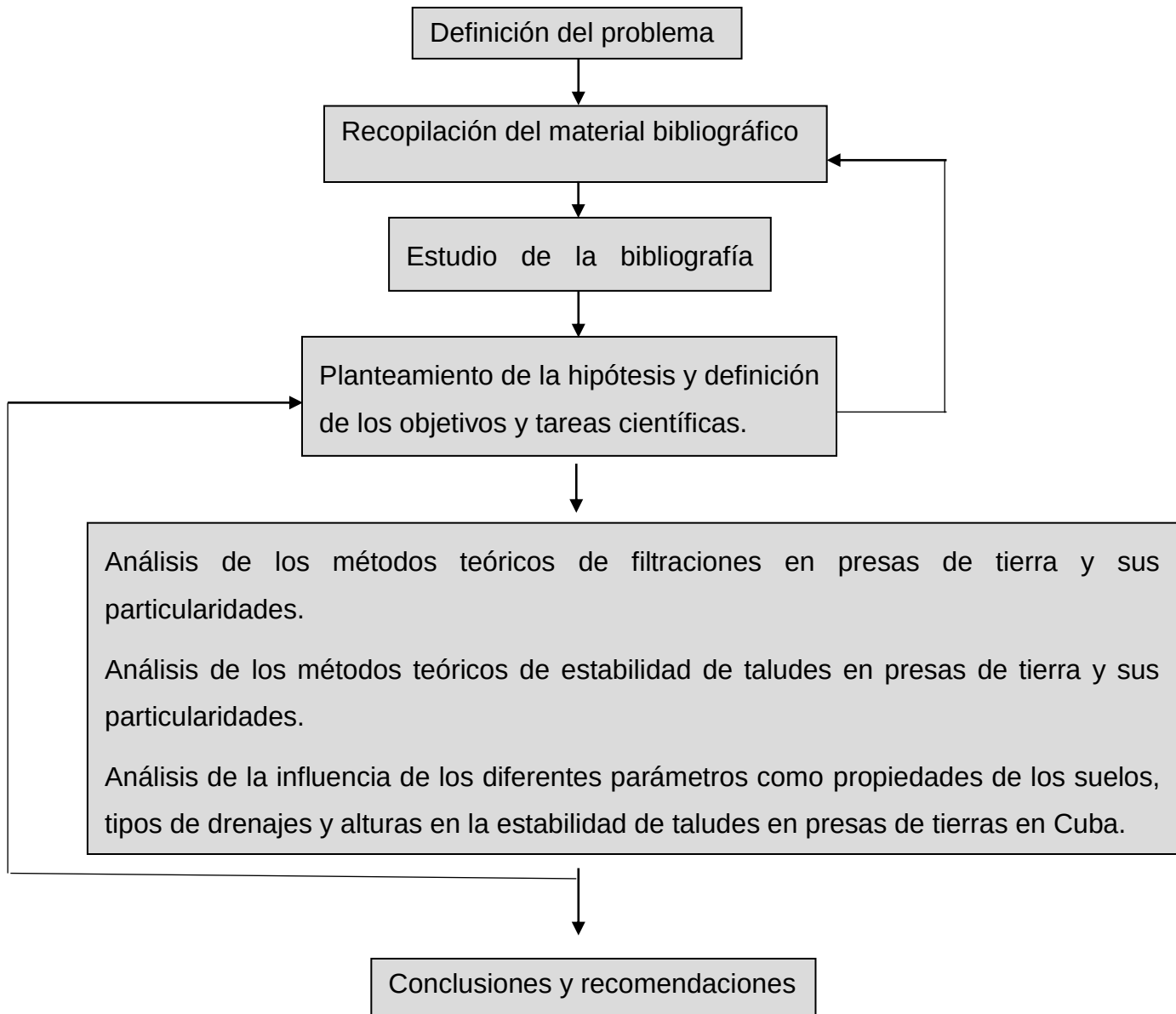
Objetivos específicos:

1. Fundamentar teórica y conceptualmente mediante la revisión bibliográfica en temáticas relacionadas con el análisis de filtraciones y estabilidad de taludes y la modelación en presas de tierras.
2. Analizar como varían los parámetros para las presas de Cuba.
3. Analizar la influencia de los diferentes parámetros como propiedades de los suelos, tipos de drenajes y altura de la cortina en la estabilidad de taludes y análisis de filtraciones en presas de tierras en Cuba, para el estado de carga explotación a través del programa GeoStudio 2007.
4. Establecer consideraciones generales acerca de las variaciones del factor de seguridad bajo la influencia de parámetros como propiedades de los suelos, tipos de drenajes y altura de la cortina en la estabilidad y análisis de filtraciones de taludes en presas de tierras en Cuba y proponer parámetros para el predimensionamiento de secciones transversal de la cortina de presa de tierra.

Tareas investigativas

1. Recopilación del material bibliográfico disponible de carácter nacional e internacional actualizado respecto al tema.
2. Estudio de la bibliografía recopilada.
3. Análisis de los criterios de predimensionamiento de presas de tierra en Cuba
4. Análisis de los métodos teóricos de filtraciones en presas de tierra y sus particularidades.
5. Análisis de los métodos teóricos de estabilidad de taludes en presas de tierra y sus particularidades.
6. Análisis de la influencia de los diferentes parámetros como propiedades de los suelos, tipos de drenajes y alturas en la estabilidad de taludes en presas de tierras en Cuba.
7. Cálculo del factor de seguridad mediante la modelación por el programa GeoStudio 2007 para el estado de carga: Explotación
8. Análisis de los resultados obtenidos
9. Formulación de las conclusiones y recomendaciones

La metodología de la investigación utilizada en este trabajo se refleja de una mejor forma en el siguiente Cronograma de investigación:

**Novedad Científica:**

Se realiza el análisis de las filtraciones y la estabilidad de taludes en presas de tierra a partir de la influencia de parámetros como propiedades del suelo, tipos de drenajes y altura de la cortina, mediante la utilización de programa GeoStudio 2007 y se dan recomendaciones para el predimensionamiento de la sección transversal de la cortina de presas de tierra acorde a las condiciones de Cuba.

Aporte metodológico

Se propone recomendaciones para el predimensionamiento de la sección transversal de la cortina de presa de tierra acorde a las condiciones de Cuba y se analiza las filtraciones y estabilidad de taludes utilizando el programa GeoStudio 2007.

Estructura del trabajo:

- Resumen / Abstract
- Índice
- Introducción
- Capítulo 1: Estado del arte sobre la estabilidad de taludes y filtraciones de presas de tierra empleando técnicas computacionales.
- Capítulo 2: Análisis de los métodos teóricos de estabilidad de taludes y filtraciones en presas de tierra y sus particularidades.
- Capítulo 3: Implementación de los métodos teóricos en el programa computacional GeoStudio 2007 y sus soluciones.
- Conclusiones
- Recomendaciones
- Bibliografía
- Anexos

Capítulo 1: Estado del arte sobre la estabilidad de taludes y filtraciones de presas de tierra empleando técnicas computacionales.

1.1 Tipología de las presas en Cuba.

Las presas de tierras son una de las estructuras ingenierilmente más complejas por las características de los materiales utilizados en su construcción, tanto por sus complejidades técnicas basada fundamentalmente en la mecánica de suelos, como por las inversiones y recursos que requieren al comparar los beneficios que reportan al país. Estas estructuras de suelo y roca que, debido a la gran variedad de materiales existentes en la naturaleza, la cantidad de éstos disponible para la construcción, las condiciones de los yacimientos, la diversidad de contornos, cerrada y valle, del emplazamiento, tiene como consecuencia una amplísima gama de morfología y dimensiones para la sección típica.(Aguir Hernández, 2016)

Los suelos son el más antiguo de los materiales de construcción y el más complejo de cuantos se conocen. Su variedad es enorme y sus propiedades, variables en el tiempo y el espacio, son difíciles de entender y medir. E siglo XX constituyó el de mayor esfuerzo de los científicos para resolver los problemas que enfrentaba la mecánica de suelos y con ello el diseño y construcción de presas de tierra. La importancia de este tipo de obra para la vida del hombre y su desarrollo social es ampliamente conocida. En Cuba no estamos al margen de esto y es por ello, a partir del triunfo de la revolución, se han proyectado y construido un gran número de presas de materiales locales. (Armas Novoa, 2002)

Como menciona (Quevedo Sotolongo, 2017). Las presas de tierras tienen una gran importancia para el desarrollo del país y entre sus funciones principales podemos mencionar:

- Abastecimiento de agua a la agricultura, la industria y la población.
- Control de inundaciones.
- Suministro de energía.
- Recreación.

Desde épocas muy remotas los hombres han tratado de buscar vías para poder almacenar el agua y a lo largo del desarrollo de la humanidad se podrían citar varios ejemplos de ello, pero no es hasta el siglo pasado con el desarrollo de la Mecánica de Suelos y la Hidrología que se ha podido llevar a cabo un proceso acelerado de construcción de presas cada vez más altas, con mayor capacidad de embalses y con diseño muy complejos ya atrevidos, pero económicos.

Existen un gran número de presas de tierra tanto a nivel mundial como en Cuba, algunas de las mayores presas construidas a nivel mundial y en Cuba son:

Presas de mayores alturas a escala internacional

- Presa Nurek. URSS, 1980: $H=304$ m y $L=704$ m. (Tierra)
- Presa Chicoasén México, 1980: $H=261$ m y $L=485$ m. (Tierra)

Presas de mayores capacidades de embalse en Cuba.

- Presa Zaza, SS, 1972: $V_{nam}=1180$ Mm³, $H=38.5$ m y $L=3295$ m
- Presa Alacranes, VC, 1972: $V_{nam}=680$ Mm³, $H=24.5$ m y $L=3000$ m
- Presa Cauto el Paso, G, 1991: $V_{nam}=450$ Mm³, $H=30.5$ m y $L=2200$ m
- Presa Protesta de Baraguá, SC: $V_{nam}=412$ Mm³, $H=35.0$ m y $L=876$ m
- Moa, H, 1988: $V_{nam}=188$ Mm³, $H=35.0$ m y $L=876$ m

Los embalses en Cuba se han construido aprovechando el cauce natural de la corriente superficial que será regulada, por lo que el área inundada, la altura de la presa y la longitud de la cortina, dependen de la topografía del lugar de la obra.

La mayor parte de las presas construidas en Cuba se han construido para el control de avenidas, las que, a su vez, actúan como recarga de las cuencas subterráneas vinculadas. (Consejo de la Administración Provincial, 2004)

Según el estudio realizado con los datos suministrados por los Grupo Empresarial de Aprovechamiento de los Recursos Hídricos de cada provincia sobre las características principales de los embalses se seleccionaron 12 embalses de tipo

homogéneo considerados los de mayor interés para el país por su importancia y aparecen en la tabla 1.1:

Tabla 1.1 Listado de presas cubanas seleccionadas

Presa	Provincia	Tipo de Presa
Ejército Rebelde	La Habana	Homogénea
Mampostón	Mayabeque	Homogénea
Las Nieves	Matanzas	Homogénea
Minerva	Villa Clara	Homogénea
Lebrije	Sancti Spíritus	Homogénea
Cauto del Paso	Granma	Homogénea
Sitio Peña	Pinar del Río	Homogénea
Baracoa	Artemisa	Homogénea
La Ruda	Mayabeque	Homogénea
Caunavaco	Matanzas	Homogénea
Abreus	Cienfuegos	Homogénea
Mal País II	Isla de la Juventud	Homogénea

1.2 Bases generales para el diseño de la sección de la cortina

Las presas de tierra no son económicas, aunque en su construcción se emplean los suelos naturales existentes en la zona o con un mínimo de procesamiento. Las más exitosas utilizan materiales como grava, arena, limo, polvo de roca y arcilla. Su construcción se basa en el almacenamiento de agua proveniente de un río o quebradas, que posteriormente podría ser utilizada de diversas formas o combinación de estas: para consumo humano, regadío; así como también para generar electricidad, aumentar la profundidad de diversos ríos, hacerlos más navegables y controlar el caudal del agua durante los periodos de inundaciones. Es por eso, que hoy en día son de gran importancia y deben ser estables y seguras. (Velázquez Sentmanat, 2016)

Generalmente se realiza un diseño de presa en base a las experiencias, normas, criterios y recomendaciones, obtenidas a través de estudios realizados; éste no es más que predimensionar, el cual consiste en determinar la altura, ancho de la cresta y los taludes tanto aguas arriba como aguas abajo, a los cuales posteriormente es necesario calcularle su estabilidad y realizar el estudio de filtración.

Según define (Quevedo Sotolongo, 2017) para el diseño y construcción de las presas de tierra es necesaria analizar una serie de factores como.

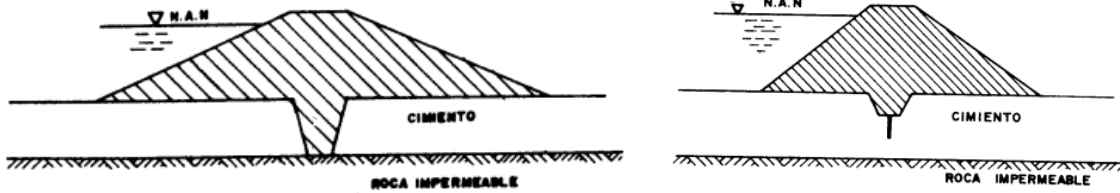
1) Factores hidrológicos definen:

- Volumen del embalse
- Gasto del aliviadero
- Cota de la corona
- Régimen hidráulico
- Procedimiento de construcción. (Desvío del río)

2) Factores geológicos definen:

- Volumen de material en los préstamos y canteras.
- Filtraciones del embalse
- Ubicación del cierre
- Unión cortina cimiento
- Necesidad de inyección o no





3) Materiales disponibles definen:

- Tipo de sección de la presa

4) Características de la cimentación definen:

- Inclinação del talud. (Cimiento blando → talud más tendido)
- Utilización de obras que limiten las filtraciones.

5) Clima define:

- Procediendo y tipo de construcción

6) Topografía del cierre define:

- Procedimiento de desvío del río.

En zona montañosa → se utilizan túneles y galerías.

En zonas llanas → se utiliza un canal d desvío

7) Acción de las olas define:

- Tipo y volumen del revestimiento

8) Finalidad del embalse define:

- Gasto admisible de filtraciones
- Utilización o no de dentellones
- Precisión en el análisis de la estabilidad de los taludes

9) Tiempo disponible para la construcción define:

- Estabilidad de taludes ya que define la posibilidad de disipación de la presión de poros.

10). Acción sísmica define:

- Taludes más tendidos
- Coronas más anchas
- Filtros y drenes más extensos.

1.3 Criterios de predimensionamiento de presa de tierra.

A continuación se enuncian una serie de criterios preliminares para el diseño de las presas de tierra según expone(Quevedo Sotolongo, 2017):

Taludes de las presas:

Se definen en función de la altura, el tipo de cimentación, las propiedades físico-mecánicas del material del terraplén, etc. En la tabla siguiente se dan valores recomendados en función de la experiencia práctica.

Tabla 1.2 Valores recomendados de pendientes de los taludes y alturas en función de la experiencia práctica

Altura de la presa (H) (m)	Pendientes de los taludes	
	Aguas arriba	Aguas abajo
$H \leq 10$	$m=2,0$	$m=1,5$
$10 < H \leq 15$	2-2,5	1,5-2,0
$15 < H \leq 30$	2,5-3,0	2,0-2,5
$30 < H \leq 50$	3,0-3,5	2,5-3,0
$H > 50$	4,0-5,0	3,5-4,0

m =cotangente del ángulo de inclinación del talud

Ancho y cota de la corona:

El ancho queda definido en función de criterios constructivos y de las características de las vías de comunicación que se construya. En la siguiente tabla se muestran los valores recomendados.

Tabla 1.3 Valores recomendados de ancho de la corona en función de la altura de la presa.

Altura de la presa (H) (m)	Ancho de la corona (m)
$H \leq 15$	4
$15 < H \leq 30$	5
$H > 30$	>5,00

La cota de la presa se determina como el valor máximo de una de las dos expresiones siguientes:

$$\text{Cota de la corona} = \text{NAN} + h_t + \Delta h + a$$

$$\text{Cota de la corona} = \text{NAM} + h_t + \Delta h + a$$

Donde:

NAM: Nivel de aguas máximas

NAN: Nivel de aguas normales

h_t : Altura de trepada de la ola

Δh : Remanso

a: Borde libre (no menor de 50 cm)

En general $h_t + a$ de estar entre 2 y 5 m y además debe cumplirse siempre que la cota de la corona sea mayor que el $\text{NAM} + 0.3\text{m}$

Revestimiento de los taludes:

El tipo de revestimiento a utilizar estará en función de:

- Altura del oleaje
- Fluctuación del nivel de la presa

- Material de la presa
- Condiciones climáticas
- Importancia de la obra

Tipos de revestimientos utilizados en el talud aguas arriba:

- Enrocamiento sobre capa de filtro
- Losas de hormigón
- Hormigón bituminoso
- Suelo estabilizado con cemento u otro material

Tipos de revestimientos utilizados en el talud aguas abajo:

- Capas de grava o piedra
- Césped

Dimensiones preliminares de algunas partes:

- Núcleo y diafragmas

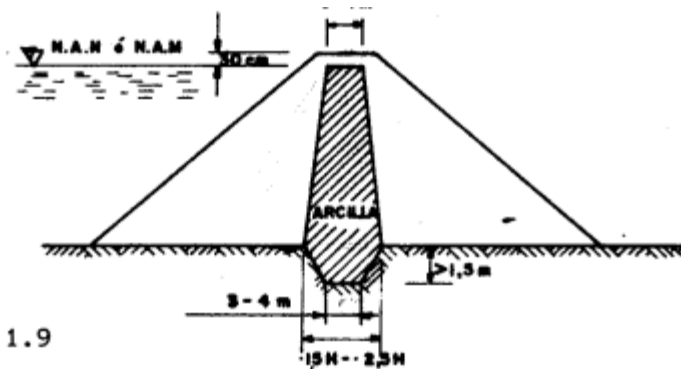


Figura 1.9

Pantallas y delantales



Figura 1.10

- Drenajes

Los drenes en las presas de tierra se colocan para controlar la línea de saturación y los posibles efectos de las filtraciones (Plavecino Ramos, 2015).

Ellos evitan que el material constitutivo de la presa sea arrastrado por el agua que se infiltra en la misma, además, disminuyen la presión neutra que se infiltra en la cortina de la presa, logrando un aumento de la tensión efectiva y, por tanto, de la estabilidad de la presa. Los dispositivos de drenaje deben garantizar la evacuación del agua sin ocluirse, además, no deben permitir el sifonamiento mecánico por lo que deben tener varias capas de filtro (Armas Novoa, 1987)

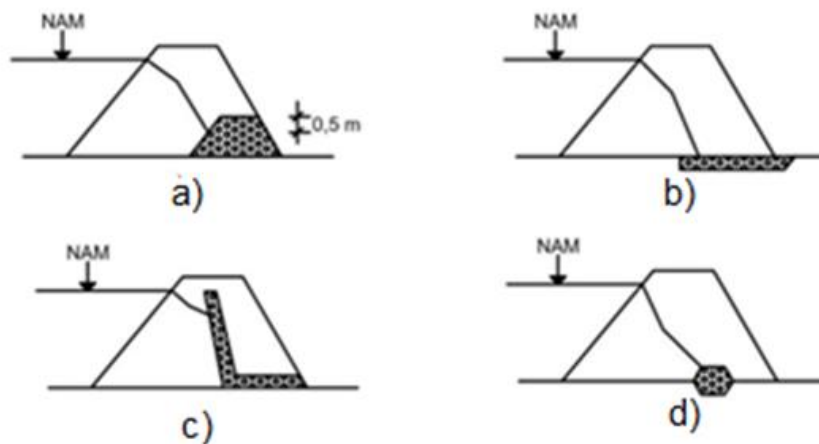


Figura 1.1 Tipos de drenajes en presas de tierra: (a) Prisma de drenaje, (b) Colchón de drenaje, (c) Drenaje de franja, (d) Drenaje central (Flores Berenguer, 2016)

a) Uno de los drenes más utilizados en presas de materiales locales, y en particular de sección homogénea, es el prisma de piedra en el pie del talud aguas abajo ya que aumenta considerablemente la estabilidad del mismo cuando la presa se apoya en una base rocosa, al estar situado el prisma en el lugar por donde pasará la superficie de falla potencialmente más peligrosa. Este tipo de dren tiene como inconveniente lo difícil que resulta su reparación en caso de oclusión de los filtros y que, además, al penetrar poco en la pantalla de la presa, contribuye poco a reducir el volumen de material saturado en el talud aguas abajo.

b) El colchón de drenaje es uno de los drenes más efectivos en reducir el volumen de material saturado en el talud aguas abajo y al controlar la salida de las filtraciones por la base de la presa. En el diseño de estos drenes se debe

utilizar un elevado factor de seguridad y se debe llevar a cabo un control riguroso de la ejecución ya que, de producirse una oclusión, son imposibles de reparar y la presa estaría sometida a filtraciones para las cuales no fue diseñada y que difícilmente podría soportar.

Los autores recomiendan un espesor mínimo de 0.8m para los colchones de drenaje y una longitud mínima igual a $L_c = 3H$ para presas de altura menor a 20m.

c) Los drenes de franja son una alternativa a los colchones de drenaje. Están compuestos por piedras, tuberías o galerías prefabricadas, que se colocan en el cimiento a una distancia deseada del pie del talud aguas abajo y con una pendiente determinada, impidiendo que la línea de corriente superior salga al talud. El agua recolectada es evacuada aguas abajo por medio de los colectores.

d) El drenaje central se utiliza en presas homogéneas para abatir totalmente el agua de filtración y alejarla del talud aguas abajo y su construcción puede ser costosa y complicada. Están compuestos por un núcleo de material permeable unido a un colchón de drenaje. La altura mínima del drenaje central no deberá ser menor que el N.A.N.

➤ Filtros

Los filtros deben cumplir los siguientes requisitos:

- Deben ser más permeables que el material a proteger, a fin de servirles de dren.
- Deben ser suficientemente finos como para evitar el sifonamiento mecánico del material a proteger.

(Ing. Washington Sandoval E., 2016) propone los criterios planteados en las tablas 1.4, 1.5 y 1.6:

Tabla 1.4 Valores recomendados de pendientes de los taludes en función del tipo de presa.

Tipo de presa	Talud a arriba	Talud a abajo
DE TIERRA (Depende del tipo de suelo)	2 a 4,5	2 a 4,5
TIERRA Y ENROCAMIENTO		
Con núcleo central, espaldones de roca	1,3 a 1,8	1,3 a 1,7
Con núcleo inclinado, espaldones de roca	1,5 a 2,0	1,2 a 2,6
Con pantalla, espaldones de roca	2 a 3,5	1,2 a 1,6
ENROCAMIENTO		
Con pantalla	0,7 a 1,6	1,2 a 1,5
Con diafragma	1,3 a 1,7	1,3 a 1,7

Tabla 1.5 Valores recomendados de pendientes de los taludes en función de la altura.

Altura de la presas	Talud A. arriba	Talud A. abajo
PRESAS DE TIERRA		

$H < 5$	2,0 – 2,5	1,5 – 1,75
$5 < H < 10$	2,25 – 2,75	1,75 - 2,25
$10 < H < 15$	2,5 - 3,0	2,0 - 2,25
$15 < H < 50$	3,0 – 4,0	2,5 – 4,0
$H > 50$	4,0 – 5,0	4,0 – 4,5
PRESAS DE ENROCAMIENTO		
$H < 15$	0,5	0,5
$15 < H < 30$	0,75	0,75
$30 < H < 45$	1,0	1,0
$H > 45$	1,3	1,3

Tabla 1.6 Finura del material utilizado según diferentes naciones

NOMBRE	USA d(mm)	Rusia d (mm)	Comunidad Europea d (mm)
--------	--------------	-----------------	--------------------------------

arcilla	< 0,005	< 0,005	< 0,002
Limo	0,005 - 0,075	0,005 - 0,05	0,002 - 0,06
arena	0,075 - 4,75	0,05 - 2,0	0,06 - 2,0
grava	4,75 - 76,2	2,0 - 40	2,0 - 60
guijarros	> 76,2	40 - 100	60 - 600
bolón		100-200	
Pedrejón		> 200	> 600

Según (Armas Novoa, 2002) define:

“Un talud es una zona plana inclinada de la parte de la Presa”

Tenemos que diseñar un buen talud ya que de este dependerá que nuestra Presa sea más consistente durante su vida útil. La protección del talud es un procedimiento que se realiza para proteger los taludes de obras de ingeniería, o taludes naturales, contra los daños causados por el escurrimiento del agua o el avatar de las ondas de un lago, río, o mar contra sus márgenes.

“La protección de los taludes se realiza de varias formas:”

- Recubriendo las márgenes, en la franja donde oscila el agua de un enrocado, rocas sueltas acomodadas en forma más o menos irregular en el talud a ser protegido, sistema denominado generalmente como enrocado. Este método es muy usado en los taludes aguas arriba de las presas hidráulicas;
- Recubriendo el talud con una placa de concreto o con un revestimiento en piedra. Frecuentemente se establecen valores que puedan servir como punto de partida en una alternativa, por ejemplo, ciertos reglamentos fijan como taludes mínimos los siguientes. Si la altura de la presa es de 5 a 12 metros su talud aguas arriba debe ser de 2:1. Es decir que por cada metro que avanza en forma vertical se debe correr dos metros en forma horizontal, así de esta manera formaremos nuestro talud. Si nuestra altura de nuestra Presa es de 12 a 30 metros aguas arriba nuestro talud será de

2.5:1. Es decir que por cada metro que avanza en forma vertical se debe correr dos metros y medio en forma horizontal, así de esta manera formaremos nuestro talud. Al tener estos conceptos en Presas pequeñas podemos varíalas y emplearlas en la construcción de una Presa mayor. El diseño del talud es uno de los aspectos más importantes en la construcción de una Presa

El ancho de la corona es un parámetro de gran importancia en el diseño de presas de tierra por eso que dentro de los criterios de diseño de presas de tierras mencionan:

“Se fija el ancho para aumentar el volumen de la presa y por consiguiente su estabilidad.”

Para asegurar la resistencia de esta parte contra los deterioros ocasionados por el oleaje, lluvias, huaycos y para establecer los servicios que sean necesarios sobre la Presa. Por razones constructivas y la necesidad de tener acceso a las estructuras de la Presa. Es recomendable de que la corona tenga por lo menos 3.0 metros para las presas altura inferior a 15 metros. El ancho mínimo de la corona debe ser aquel con el que se obtenga una pendiente segura de filtración a través de terraplén, para poder bajar la carga hidráulica cuando el vaso se encuentra lleno.

“En ciertos códigos de Presa se han fijado como anchos mínimos en la corona los siguientes:

- Cuando la altura de la Presa es de 12 metros, el ancho de la corona debe ser de 3 metros.
- Cuando la altura de la Presa es de 30 metros, el ancho de la corona debe ser de 4.5 metros.
- Cuando la altura de la Presa es de 45 metros, el ancho de la corona debe ser de 6 metros.

1.4 Análisis de filtraciones en presas de tierra.

Con el desarrollo de la Mecánica de Suelos en el siglo pasado se comenzó a realizar estudios más reales de las filtraciones a través de los medios porosos con grandes aplicaciones en el diseño de presas de tierras, algo que con anterioridad se realizaba por métodos empíricos.

Puntos notables en este desarrollo fueron:

- El enunciado de la ley de Darcy que define el gasto que pasa por un medio poroso, conocido el coeficiente de permeabilidad del mismo, el gradiente hidráulico y el área de la sección transversal por donde ocurre el flujo, considerando un análisis plano.
- Lo demostrado por Forchheimer de que la función de la carga hidráulica que gobierna el flujo en un medio poroso es una función armónica y por tanto satisface la ecuación de la Laplace.
- La solución gráfica dada por el propio Forchheimer a la ecuación de Laplace a través del Método de las Redes de Flujo a la ecuación de Laplace, que continúa siendo el método práctico más utilizado para el estudio de las filtraciones a través del suelo.

Al resolver el problema práctico de las filtraciones en el diseño de las presas de tierras el ingeniero obtiene información de tres aspectos fundamentales para dicho diseño:

- El gasto de agua de infiltración a través de la zona de flujo.
- La influencia del flujo de agua sobre la estabilidad general de la masa de suelo a través de la que ocurre.
- Las posibilidades del agua de infiltración de producir arrastres de material sólido, erosiones, sifonamiento, etc

El agua del suelo puede clasificarse en tres categorías:

- Agua absorbida: ligada a las partículas del suelo por fuerzas de origen eléctrico. No participan en el flujo.
- Agua capilar: debido al fenómeno de tensión superficial. El efecto del flujo en la zona de agua capilar es pequeño y suele despreciarse.
- Agua libre: también llamada agua gravitacional, que puede moverse en el interior de la masa sin otro obstáculo que el que impone su viscosidad y la trama estructural del suelo

La teoría de las redes de flujo se aplica solo al agua libre o gravitacional que se encuentra por debajo del nivel freático, el que se define de forma general como:

La superficie que constituye el lugar geométrico de los puntos donde el agua tiene una presión igual a la atmosférica que, en cuestiones de flujo, donde se trabaja normalmente con presiones manométricas, se considera igual a cero. El caso del flujo a través de la cortina de una presa de tierras esta superficie constituye la llamada línea de corriente superior. (Quevedo Sotolongo, 2017)

Almacenar agua es por lo general la función principal por la que se diseña y construye una presa y sin embargo esta puede verse comprometida a raíz de las fallas por pérdidas por filtraciones. Las causas de estas están asociadas a la presencia de carso o cavernas en el vaso de la presa, que provocan pérdidas de agua muy superiores de las que ocurren debido a las filtraciones a través de la cortina de la presa. (Velázquez Sentmanat, 2016)

En Cuba el ejemplo más significativo de este tipo de fallo es el que ocurrió en la Presa Ejército Rebelde, en La Habana en las cercanías del parque Lenin. En dicha presa ocurrió una falla parcial por filtraciones, ocurriendo grandes pérdidas de agua a través de su vaso. De los objetivos de proyecto dicha presa cumplió con el relacionado de regular la avenida, pero no pudo cumplir el objetivo relacionado con el uso del agua almacenada para el riego, posteriormente se le ha atribuido otro objetivo, a la alimentación del manto freático, pero el mismo no fue concebido en el proyecto original de la presa.

1.5 Análisis de estabilidad de taludes en presas de tierra.

Antecedentes de los métodos de análisis de estabilidad de taludes

“Este análisis lo que se busca es asegurar la estabilidad de la Presa durante su vida útil”

En el análisis de estabilidad de presas se requiere garantizar que los esfuerzos máximos y mínimos en la base de la presa sean de compresión, para que toda la base de la presa este soportando los esfuerzos. Para ello se debe garantizar que la fuerza resultante en la base de la presa esté localizada en el tercio medio de la presa. El diseño de una Presa conlleva a la concordancia de las deformaciones diferentes de los elementos componentes de la Presa zonificada entre el núcleo y el prisma, motivado más que nada por las concentraciones de esfuerzos que pueden dar deformaciones no previstas, ocasionando grietas internas. Los procesos de filtración pueden ser previstos con un buen programa de investigación de laboratorios, quedando así el cálculo de estabilidad como el de la mayor incidencia. Para el análisis de estabilidad de una Presa se consideran tres condiciones de análisis: Flujo Establecido, Vaciado Rápido y Sismo. Todos los métodos de cálculo conllevan a concentrar una superficie para el cual el coeficiente de seguridad sea el mínimo. Con este análisis haremos que el diseño de la Presa sea más seguro. (Armas Novoa, 2002)

Como (Velázquez Sentmanat, 2016) esta falla por estabilidad de taludes ocurre generalmente a lo largo de una superficie circular llamada falla cuando los esfuerzos actuantes en la misma superan la resistencia a cortante que se genera a lo largo de ella, tal y como se muestra en la siguiente figura:

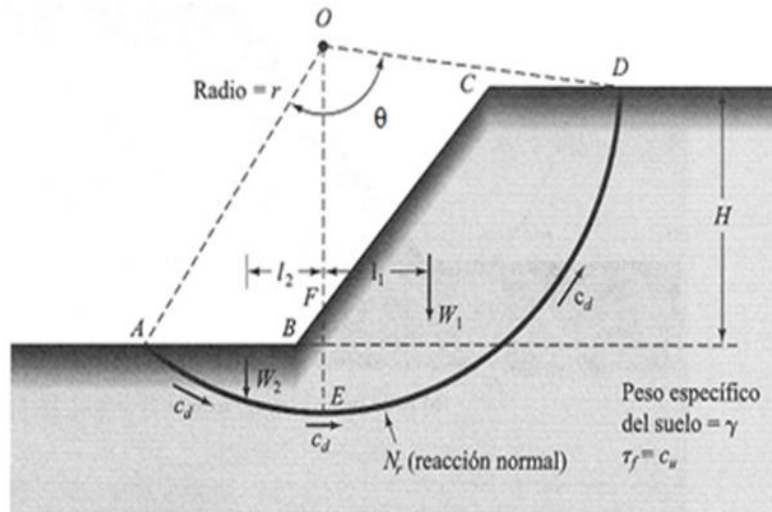


Figura 1.2 Análisis de la estabilidad de un talud mostrando una superficie de falla circular.

Las dos causas fundamentales que provocan la falla de los taludes son; aumento de los esfuerzos actuantes a lo largo de una superficie y disminución de los esfuerzos resistentes a cortante a lo largo de la misma superficie, aunque en muchas ocasiones pueden ocurrir las dos a la vez.

A partir de estudios realizados a las fallas ocurridas en numerosas presas de tierras, se ha podido arribar a las siguientes conclusiones generales:(Quevedo Sotolongo, 2017)

- Las fallas ocurren predominantemente en los primeros años de la vida de la presa. Casi una tercera parte de las fallas ocurren durante el primer año y más de la mitad durante los primeros 5 años.
- El 94 % de los fallos por deslizamiento ocurrieron antes de 1940. Este tipo de fallos ocurren cada vez menos frecuente en la actualidad, motivado en gran medida por la experiencia sacada de las fallas ocurridas y por el perfeccionamiento de los procedimientos de análisis de la estabilidad de taludes y de la construcción de las presas de tierra.

Los fallos por deslizamiento de los taludes se agrupan en 3 categorías:

1. Falla durante la construcción

2. Falla durante la explotación
3. Falla durante un vaciado rápido.

Fallas durante la construcción

Este tipo de falla ocurre antes de poner en explotación la presa, estando vacía, estableciéndose las siguientes generalidades:(Quevedo Sotolongo, 2017)

- Son menos frecuentes que las que ocurren durante la explotación de la presa.
- Nunca han sido catastróficas.
- Se han presentado sobre todo en presas cimentadas sobre arcillas blandas, con una gran parte de la superficie de falla a través de ese material, siendo por tanto una falla profunda.
- Pueden ser rápidas o lentas, dependiendo si el material de la cimentación es homogéneo o presenta estratificaciones que favorecen el movimiento.
- La causa fundamental de ocurrencia de este tipo de fallo está relacionada con las altas presiones de poros generadas durante la construcción en la cortina y/o la cimentación, que provocan una disminución de la resistencia a cortante del suelo.

Las recomendaciones fundamentales para tratar de evitar este tipo de fallo son:

- Lograr la disipación de las presiones de poros.
- En arcillas homogéneas la posible disipación de las presiones de poros ocurre de forma lenta, pues requiere que el suelo se vaya consolidando producto del propio peso de la presa.
- En el caso de que existan estratificaciones en que alguna capa desarrolle presiones de poros elevadas con riesgo de estabilidad, el remedio puede ser más rápido con obras de alivio que abatan esas presiones neutras locales.

Fallas durante la explotación

Estas fallas ocurren terminada la construcción de la presa y llenada la misma, lo que provoca el establecimiento de las filtraciones por debajo de la línea de corriente superior, LCS, en la cortina de la presa, ocurriendo siempre en el talud aguas abajo. (Quevedo Sotolongo, 2017)

Este tipo de falla puede ser:

- Profundas
- Superficiales

Las fallas profundas incluyen en su superficie de falla la cimentación de la presa y suelen ocurrir a presa llena, producto de las presiones neutras que origina el flujo de agua a través de la cortina y la cimentación.

Generalidades sobre este tipo de fallas:

- El deslizamiento no alivia las presiones neutras, lo que trae consigo que ocurran otras fallas ulteriores, al presentar taludes más escarpados, pudiendo llegar al desbordamiento.
- Es común que estas fallas ocurran relativa lentitud, específicamente en arcillas con velocidades un metro por día durante varios días o semanas.

Las fallas superficiales se producen después de grandes lluvias, y se han producido lo mismo en los primeros años después de la construcción que varios años después. Han ocurrido en presas donde se ha almacenado agua en el talud aguas abajo, por tener depósitos de gravas o rocas o por tener bermas con drenajes deficientes.

La causa fundamental de este tipo de falla es producto de una línea de corriente superior, LCS, muy alta y por tanto altas presiones de poros, que implican una disminución de la resistencia a cortante del material.

En general los fallos por estabilidad de talud están muy relacionados con el tipo de suelo utilizado para la construcción de la cortina y el de la cimentación. Se ha podido constatar que una gran mayoría de los deslizamientos han ocurrido en presas construidas con materiales finos altamente plásticos.

Según (Quevedo Sotolongo, 2017) Sherard, en un estudio de 65 presas en el oeste de los EEUU, determinó que fallaron por deslizamiento 14, estableciendo una relación muy clara entre las que fallaron y la finura del material utilizado, tal y como se muestra a continuación:

$D_{50} < 0.0006 \text{ mm}$	Todas fallaron
$0.0006 \leq D_{50} < 0.002 \text{ mm}$	Fallaron la mitad
$0.002 \leq D_{50} < 0.06 \text{ mm}$	Fallaron unas pocas
$D_{50} > 0.06 \text{ mm}$	Ninguna falló

En general para tratar de evitar el deslizamiento de los taludes se pueden seguir las siguientes recomendaciones:

1. Seleccionar suelos granulares, $c = 0$ y $\phi \geq 25^\circ$, los que presentan altas resistencia a cortante
2. Compactar con energías altas y humedades bajas, en la zona seca
3. Adecuar la geometría de la sección, con la utilización de taludes más tendidos y el empleo de bermas

Cuando ha ocurrido la falla de un talud por deslizamiento se puede estabilizar el talud mediante:

- Construcción de bermas
- Colocación de drenes

En Cuba se han presentado fallas parciales por deslizamiento en presas de tierra, a saber:

- Presa Herradura, Pinar del Río
- Presa Lebrije, Sancti Spíritus, 2002
- Presa Zaza, Sancti Spíritus 1972. Ocurrió producto del sifonamiento que se produjo al agrietarse la tubería de desvío

Según (Velázquez Sentmanat, 2016) en (Suarez, 2009) la tabla 1.7 que aparece a continuación muestran en esencia la evolución del Análisis de Estabilidad de Taludes mediante los métodos desarrollados para ello.

Métodos	Superficies de falla	Equilibrio	Características
Talud infinito	Rectas	Fuerzas	Bloque delgado con nivel freático, falla paralela a la superficie
Bloques o cuñas	Cuñas con tramos rectos	Fuerzas	Cuñas simples, dobles o triples, analizando las fuerzas que actúan sobre cada cuña
Espiral logarítmica (Frohlich, 1953)	Espiral logarítmica	Fuerzas y momentos	Superficie de falla es espiral logarítmica. El radio de la espiral varia con el ángulo de rotación
Arco circular (Fellenius, 1992)	Circulares	Momentos	Circulo de falla, el cual es analizado como un solo bloque. Se requiere que el suelo sea cohesivo ($\phi=0$)
Ordinario o de Fellenius (Fellenius, 1927)	Circulares	Fuerzas	No tiene en cuenta las fuerzas entre dovelas
Bishop simplificado (Bishop, 1955)	Circulares	Momentos	Asume que todas las fuerzas de cortante, entre dovelas, son cero.

Janbú Simplificado (Janbú, 1968)	Cualquier forma	Fuerzas	Asume que no hay fuerzas de cortante entre dovelas.
Sueco Modificado U.S Army Corps of Engineers (1970)	Cualquier forma	Fuerzas	Las fuerzas entre dovelas tienen la misma dirección que la superficie del terreno.
Lowe y Karafiath(1960)	Cualquier forma	Fuerzas	Las fuerzas entre dovelas están inclinadas en un ángulo igual al promedio de la superficie del terreno y las bases de las dovelas.
Spencer (1967)	Cualquier forma	Momentos y fuerzas	La inclinación de las fuerzas laterales son las mismas para cada tajada, pero son desconocidas.
Morgenstern y Price (1965)	Cualquier forma	Momentos y fuerzas	Las fuerzas entre dovelas, se asume que varían de acuerdo con una función arbitraria
Sarma (1973)	Cualquier forma	Momentos y fuerzas	Utiliza el método de las dovelas en el cálculo de la magnitud de un coeficiente sísmico requerido para producir la falla.

Según (Quevedo Sotolongo, 2017)se han estudiado distintos métodos para el análisis de la estabilidad de taludes como los mencionados anteriormente, todos basados en el método general de las dovelas, pero hasta el momento hemos partido que se conoce la superficie de falla crítica, a la cual se asocia el factor de seguridad mínimo. En un diseño en realidad esa superficie de falla crítica no se conoce y para su determinación necesariamente hay que aplicar un proceso iterativo, tanteando distintas superficies de fallas, con su radio y centro correspondiente, hasta que se encuentre la de factor seguridad mínimo.

1.6 Análisis del Software GeoStudio.

El avance tecnológico en estos tiempos es notable, es por ello que no se puede dejar de mencionar dentro de estos el avance de los métodos computacionales aplicados a la solución de problemas ingenieriles y dentro de ellos el análisis de filtraciones y estabilidad de taludes en presas de tierra.

Según (Velázquez Sentmanat, 2016) para el análisis de la estabilidad la introducción de programas con procedimientos paso a paso para la resolución de problemas de estabilidad de taludes es cada vez más común. Uno de los más destacados lo constituye el programa Geo-Slope, que permite trabajar con varios métodos.

Otro programa utilizado ha sido el STB 2001, desarrollado en la Universidad de Delft, utilizado por los estudiantes para complementar sus aplicaciones prácticas en el estudio de la estabilidad de taludes.

El software GeoStudio es una herramienta de propósito específico, que tiene implementada en su programación la solución del método de los elementos finitos para la resolución de las ecuaciones en la obtención de los estados tenso - deformacionales de obras de tierra.

El programa permite realizar cálculos tenso-deformacionales de las siguientes naturalezas:

- Análisis de deformaciones.
- Simulación de fases de construcción y por lo tanto de carga del terreno.
- Cálculo de exceso de presiones de poro.
- Interacción suelo estructura.
- Análisis de consolidación.

El paquete de programas GeoStudio está compuesto de varias herramientas con distintos usos y funcionalidades:

- Slope/W para cálculo de estabilidad de taludes.
- Seep/W para cálculo de redes de flujo y filtración.

- Sigma/W orientado al cálculo de tensiones y deformaciones de suelos o rocas sometidos a carga.
- Quake/W para cálculo de los efectos de sismos en suelos y estructuras de suelos (presas, terraplenes, etc.)
- Temp/W aplicación de la ecuación del calor sobre estructuras de suelos.
- Ctran/W aplicado a fenómenos de difusión de contaminantes en suelos.
- Vadose usado en la modelización de acuíferos.

Capítulo 2 Análisis de los métodos teóricos de estabilidad de taludes y filtraciones en presas de tierra y sus particularidades.

2.1 Métodos de análisis de filtraciones en presas.

En el presente epígrafe se realizará un estudio de los métodos usados para el análisis de filtraciones y estabilidad de taludes en presas de tierra analizando las particularidades de cada uno, así como las potencialidades y deficiencias que puedan presentar.

Estos métodos se presentan en gran diversidad ya que se ajustan a las múltiples situaciones que ofrece el suelo como material versátil de construcción, a continuación, se presentan los métodos con sus características, limitaciones y ventajas:

2.1.1 Método de las Dovelas.

Pueden resolverse problemas que involucren varios estratos de suelos diferentes, presencia de napa, geometrías complicadas de la superficie del talud, efecto de cargas externas, etc.

El esfuerzo normal que actúa en un punto de la potencial superficie de falla depende principalmente del peso de suelo situado por encima de ese punto.

Este método consiste en dividir la masa de suelo en una serie de dovelas verticales Figura 2.1.

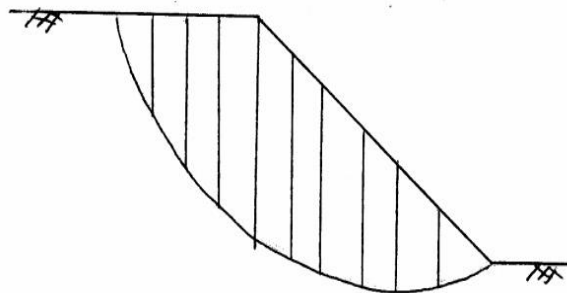
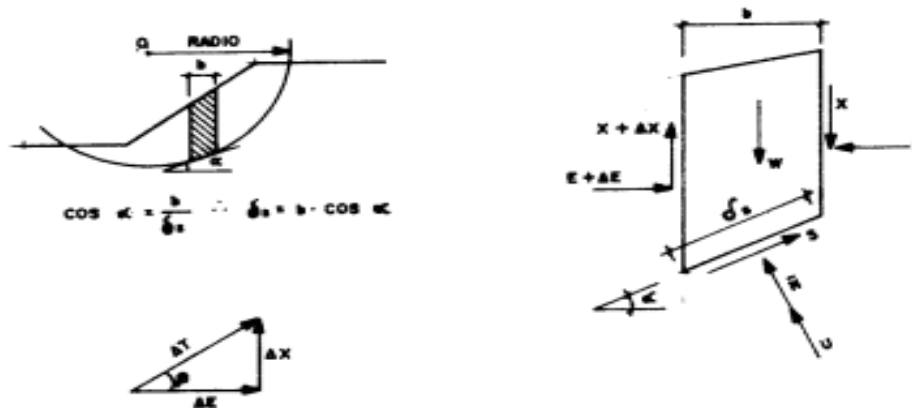


Figura 2.1 Dovelas verticales en las que se divide la masa de suelo.



La figura 2.2 Muestra las fuerzas que actúan sobre una dovela.

Donde:

ΔX = Fuerza tangencial sobre la dovela.

ΔE = Fuerza normal sobre la dovela.

ΔT = Vector de relación entre la fuerza normal y la fuerza tangencial.

δs = Longitud de la cuerda en la base de la dovela.

α = Inclinación de la cuerda con respecto a la horizontal.

$\tilde{N}$ = Acción normal del suelo respecto a la masa deslizante del talud.

W = peso de la dovela.

b = Ancho de la dovela

Este método supone que:

- El F.S. de cada dovela es el mismo que el del talud (F.S. global)
- El F.S. es el mismo para la componente cohesiva y para la componente friccionante.

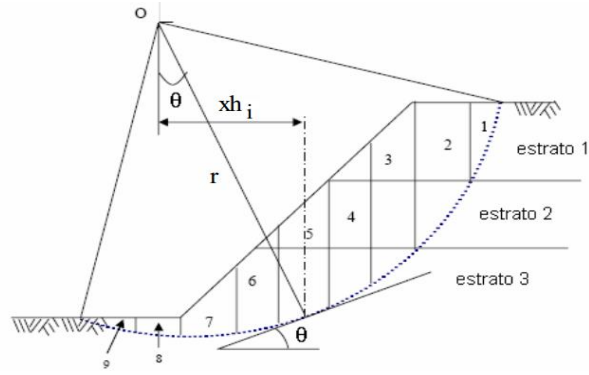


Figura 2.3 Círculo de falla del talud

La fuerza de corte movilizada en la base de cada dovela T_i es:

$$T_{imov} = \frac{c' \Delta l_i}{FS} + \frac{N'_i \tan(\phi')}{FS}$$

(Ecuación 2.1)

Haciendo equilibrio de momentos con respecto al centro del semicírculo de deslizamiento:

$$\sum_{i=1}^{i=n} (w_i x_{hi}) = \sum_{i=1}^{i=n} (T_{imov} r)$$

(Ecuación 2.2)

$$\sum_{i=1}^{i=n} (w_i \sin(\theta_i)) = \sum_{i=1}^{i=n} \left(\frac{c' \Delta l_i}{FS} + \frac{N'_i \tan(\phi')}{FS} \right) r$$

(Ecuación 2.3)

Finalmente, el factor de seguridad al volcamiento es:

$$F.S. = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (c' \Delta l_i + N'_i \tan(\phi'))}{\sum_{i=1}^{i=n} (w_i \sin(\theta_i))}$$

(Ecuación 2.4)

La tabla muestra las incógnitas y ecuaciones para una masa deslizante dividida en n dovelas.

Incógnitas	Número
Factor de seguridad	1
Fuerzas normales en la base de las dovelas N_i	n
Fuerzas normales en las caras verticales E_i	n-1
Fuerzas de corte en las caras verticales X_i	n-1
Ubicación de las fuerzas normales N_i	n
Ubicación de las fuerzas normales E_i	n-1
Número total de incógnitas	5n-2
Ecuaciones	
Equilibrio de fuerzas horizontales	n
Equilibrio de fuerzas verticales	n
Equilibrio de momentos	n
Número total de ecuaciones	3

2.1.2 Método de Fellenius

Fellenius consideró la hipótesis de que $\beta = \alpha$ y, por tanto:

$$\bar{N} = W \cdot \cos \alpha - U$$

(Ecuación 2.5)

Si se sustituye se obtiene:

$$F = \frac{R \sum [c' \cdot \delta_s + (W \cdot \cos \alpha - u \cdot \delta_s) \tan \phi]}{\sum W \cdot X}$$

(Ecuación 2.6)

2.1.3 Método simplificado de Bishop

En el método de Bishop (simplificado), toma como hipótesis para poder solucionar el análisis de la estabilidad de taludes utilizando el enfoque general del método de

las dovelas que $\beta = 0$, lo que significa que no toma en cuenta la fricción entre las dovelas, siendo $\Delta x = 0$ y por tanto ΔT tiene la dirección horizontal como ΔE .

Aplicando estas condiciones a las ecuaciones generales del método de las dovelas se puede determinar N y F de la siguiente forma.

$$\bar{N} = \frac{\frac{(W - c' \cdot b \cdot \tan \alpha - ub) \cdot \sec \alpha}{F}}{1 + \frac{\tan \phi' \cdot \tan \alpha}{FS}}$$

(Ecuación 2.7)

$$FS = \frac{R \sum \left\{ [c' \cdot b + (W - ub) \cdot \tan \phi] \cdot \frac{\sec \alpha}{1 + \frac{\tan \phi' \cdot \tan \alpha}{FS}} \right\}}{\sum W \cdot X}$$

(Ecuación 2.8)

Simplificando:

$$FS = \frac{R \sum c' \cdot \delta_s \cdot n}{\sum W \cdot X} + \frac{R \sum (W - ub) \cdot \varepsilon \cdot \tan \phi'}{\sum W \cdot X}$$

(Ecuación 2.9)

Donde:

$$n = \frac{1}{1 + \frac{\tan \phi' \cdot \tan \alpha}{FS}}$$

(Ecuación 2.10)

$$\varepsilon = n \cdot \sec \alpha$$

(Ecuación 2.11)

Como se aprecia en la ecuación, el factor de seguridad aparece en ambos miembros, por lo que es necesario asumir un primer factor de seguridad para resolver la ecuación. Se inicia así un proceso iterativo que se repite hasta que el factor de seguridad obtenido se encuentre en el intervalo de tolerancia

especificado con respecto al factor de seguridad anterior, en el que se recomienda iniciar los cálculos considerando $FS = 1$.

2.1.4 Método de Janbú:

Plantea que las fuerzas entre dovelas son horizontales y no toma en cuenta el efecto del cortante, pero las superficies de falla no son necesariamente circulares, por lo que en este método Janbú propone un factor de relación que depende de la curvatura de la superficie de falla f_0 , cabe mencionar que dichos factores son aproximados fueron obtenidos mediante procedimientos empíricos y se basan en análisis de 30 a 40 casos. Este método solamente satisface el equilibrio de esfuerzos y no satisface el equilibrio de momentos.

En algunos casos, la suposición de f_0 puede ser una fuente de inexactitud en el cálculo del factor de seguridad. Sin embargo, para algunos taludes la consideración de este factor de curvatura representa el mejoramiento del análisis.

De acuerdo con Janbú (ecuación modificada):

$$FS = \frac{f_0 \cdot \sum \{ [C' \cdot b + (W - ub) \cdot \tan \phi] \frac{1}{\cos \alpha \cdot m\alpha} }}{\sum W \cdot \tan \alpha}$$

(Ecuación 2.12)

Donde:

f_0 = depende de la curvatura de la superficie de falla

$$m\alpha = \cos \alpha \left(1 + \frac{\tan \alpha \cdot \tan \phi}{FS} \right)$$

(Ecuación 2.13)

b = Ancho de la Dovela

W = Peso de cada dovela

C' , ϕ = Parámetros de resistencia del suelo.

u = Presión de poros en la base de cada dovela = $\gamma_w h_w$

α = Angulo del radio y la vertical en cada dovela

2.1.5 Método de Spencer:

Se basa en que las fuerzas entre dovelas son paralelas entre sí, por lo que tienen el mismo ángulo de inclinación, este parámetro se toma como una incógnita que se calcula al solucionar las ecuaciones de equilibrio. Este método satisface el equilibrio de fuerzas y el de momentos y su uso no está restringido solo a superficies circulares. El método de Spencer se considera muy preciso y aplicable para casi todo tipo de geometría de talud y perfiles de suelo y es tal vez, el procedimiento de equilibrio más completo y más sencillo para el cálculo del factor de seguridad. (Ing. Washington Sandoval E., 2016)

La inclinación específica de estas fuerzas entre partículas, es desconocida y se calcula como una de las incógnitas en la solución de las ecuaciones de equilibrio. Spencer inicialmente propuso su método para superficies circulares pero este procedimiento se puede extender fácilmente a superficies no circulares. Spencer plantea dos ecuaciones una de equilibrio de fuerzas y otra de equilibrio de momentos, las cuales se resuelven para calcular los factores de seguridad F y los ángulos de inclinación de las fuerzas entre dovelas θ .

Para resolver las ecuaciones F y θ , se utiliza un sistema de ensayo y error donde se asumen los valores de estos factores (en forma repetitiva) hasta que se alcanza un nivel aceptable de error.

Una vez se obtienen los valores de F y θ se calculan las demás fuerzas sobre las dovelas individuales. El método de Spencer se considera muy preciso y aplicable para casi todo tipo de geometría de talud y perfiles de suelo y es tal vez, el procedimiento de equilibrio más completo y más sencillo para el cálculo del factor de seguridad.

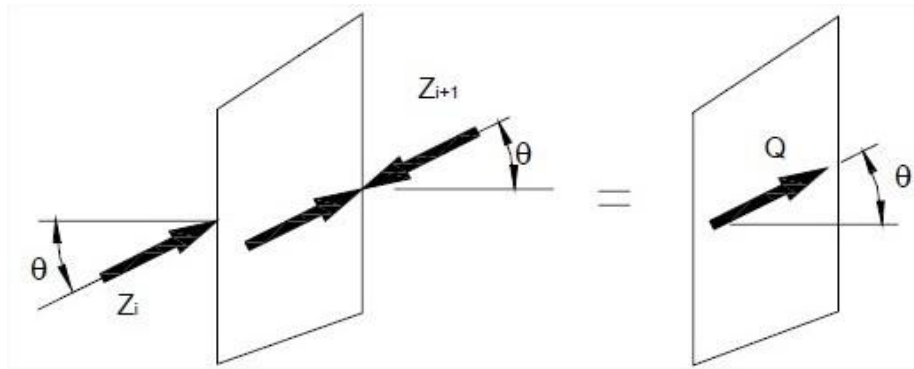


Figura2.4. Análisis del ángulo de Inclinación en el método de Spencer

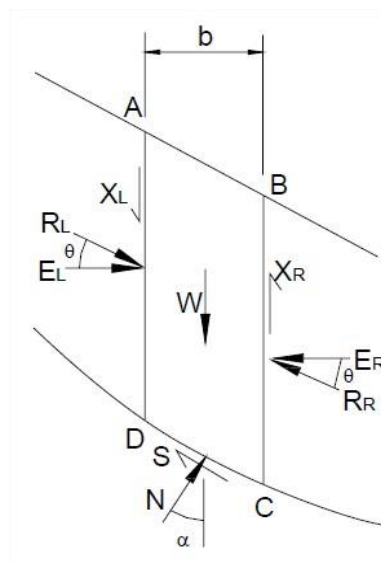


Figura 2.5 Análisis de fuerzas por dovelas en el método de Spencer

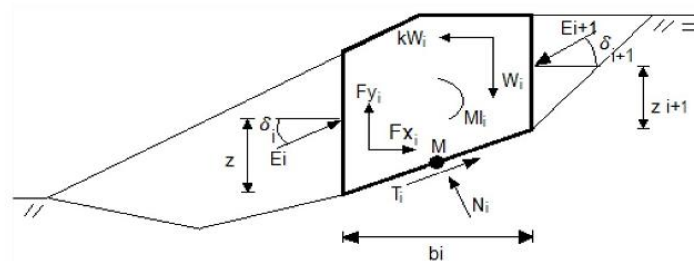


Figura 2.6 Esquema de análisis del método de Spencer.

2.1.6 Método de Morgenstern-Price

El método de Morgenstern y Price (1965) asume que existe una función que relaciona las fuerzas de cortante y las fuerzas normales entre dovelas.

Esta función puede considerarse constante, como en el caso del método de Spencer, o puede considerarse otro tipo de función. La posibilidad de suponer una determinada función para determinar los valores de las fuerzas entre dovelas, lo hace un método más riguroso que el de Spencer.

Sin embargo, esta suposición de funciones diferentes tiene muy poco efecto sobre el cálculo de factor de seguridad cuando se satisface el equilibrio estático y hay muy poca diferencia entre los resultados del método de Spencer y el de Morgenstern y Price. El método de Morgenstern y Price, al igual que el de Spencer, es un método muy preciso, prácticamente aplicable a todas las geometrías y perfiles de suelo.

Este método cumple con las condiciones de equilibrio de fuerza como de momentos.

La dirección de la resultante de las fuerzas normales y de corte en las caras laterales de las dovelas es determinada por medio de una función arbitraria. El porcentaje de esta función requerida para satisfacer el equilibrio de fuerzas y momentos es calculado mediante iteración.

$$x = E\lambda f(x)$$

(Ecuación 2.14)

2.1.7 Determinación del centro y el radio crítico.

La determinación de la superficie de deslizamiento más crítica, o sea, aquella que brinda el mínimo factor de seguridad, es un proceso iterativo que, de realizarse manualmente, puede resultar engorroso. Para facilitar este trabajo existen varios métodos como el de Ostrovski que permiten precisar el área donde se buscará el centro crítico y el radio a utilizar. A continuación, se muestran los radios recomendados para emplearlo Tabla 2.1:

Tabla 2.1 Radios recomendados para el emplear el método de Ostrovski (Armas Novoa, 1987).

R/H				
Talud	1:1	1:2	1:3	1:4
R_m	1,65	1,95	2,60	3,60
$R_{m\acute{a}x}$	2,20	2,50	3,30	4,70
$R_{m\acute{i}n}$	1,10	1,40	1,90	2,50

En la figura 2.7 se muestran los principales elementos del método, el cual consiste en tomar como centro los puntos A y B y con R_m trazar dos arcos que se corten en S; desde S se traza la normal al talud SM y desde M se levanta una vertical. Haciendo radio en M y con radio $\frac{1}{2}SM$ se traza un arco que pase por N. El centro crítico se encontrará en la recta NS y se busca a lo largo de esta recta hasta el encontrar el FS mínimo. Luego se determinan los factores de seguridad para ese punto en $R_{m\acute{a}x}$ y $R_{m\acute{i}n}$.

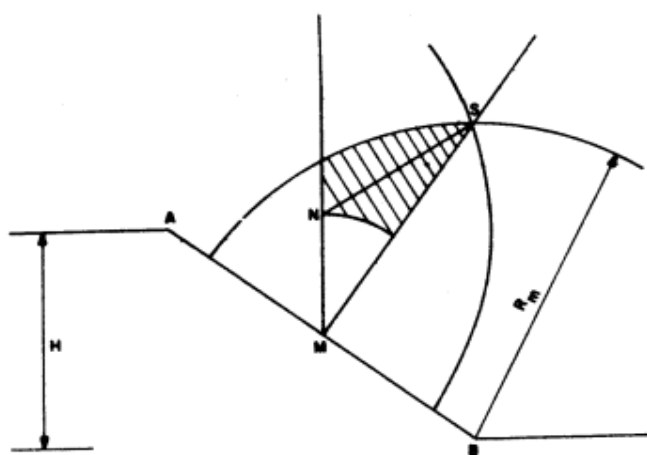


Figura 2.7 Elementos del método de Ostrovski (Armas Novoa, 1987)

2.2 Métodos de análisis de filtraciones en presas.

Uno de los factores que influyen en la estabilidad de taludes es la presencia de agua en el suelo lo que puede influir sobre los taludes provocando:

Aumento en las presiones de agua que conducirá a la disminución de esfuerzos efectivos y, por tanto, la disminución de la resistencia a cortante del suelo.

Aumento de las fuerzas de flujo que, aunadas a la fuerza de gravedad, pueden hacer que el factor de seguridad disminuya considerablemente hasta producir la falla.

Es por eso que el estudio y análisis de las filtraciones a través de la cortina de la presa y la red de flujo que estas generan es de gran importancia. El agua que está presente en un suelo puede ser absorbida, capilar o libre. La teoría de las redes de flujo en presas de tierra se aplica precisamente al agua libre o gravitacional que se encuentra debajo del nivel freático.

2.2.1 Teoría de la línea de corriente superior. Condiciones de entrada y salida.

La red de flujo está compuesta por las líneas equipotenciales y las líneas de flujo. Las primeras unen todos los puntos de una región con igual carga hidráulica y la segunda representa la trayectoria real y física que sigue el agua a través de la región del flujo, desde la zona de mayor potencial a la zona de menor potencial, y entre ellas se forman los canales de flujo. (Cordero Mejias, 2017)

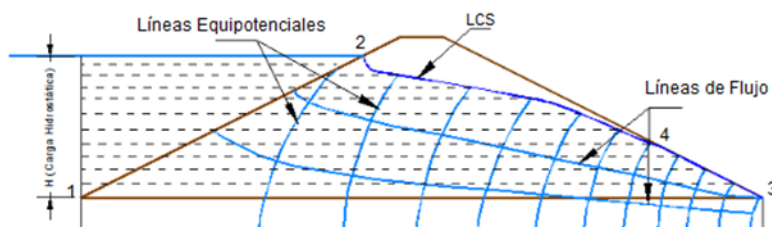


Figura 2.8 Red de flujo en presa de tierra (Tenreiro, 2003)

La particularidad del flujo libre en presas de tierra radica en que, en la zona del flujo, una de las fronteras no es conocida. La línea 1-2 en la Figura 1.16 es una línea equipotencial donde se produce el contacto entre el agua y el suelo permeable, mientras que la línea 1-3 es una línea de flujo. Ambas son fáciles de determinar, no siendo así para las restantes fronteras de la región. Como se aprecia en la figura, por debajo de la línea 2-4 la cortina de la presa se encuentra

en estado saturado y por encima de ella, salvo una estrecha región capilar, el suelo se encuentra en estado seco (Armas Novoa, 1987). A esta línea se le conoce como Línea de Corriente Superior (LCS) y es a la vez una línea de flujo y una línea equipotencial donde todas las presiones son iguales a cero. La línea 4-3 es de equipresión correspondiente a la presión atmosférica y se puede determinar fácilmente si se conoce el punto 4, por lo que es la determinación de la LCS la clave para delimitar la región del flujo.

Existen distintas variantes de entrada y salida de la línea de corriente superior en la presa de tierra, en función de la geometría de la misma como se muestra a continuación:

Inicialmente analizaremos los tres casos que se pueden presentar en cuanto a la forma de la entrada de la línea de la corriente superior, LCS, en la presa de tierra, en función del ángulo de inclinación del talud aguas arriba de la misma.

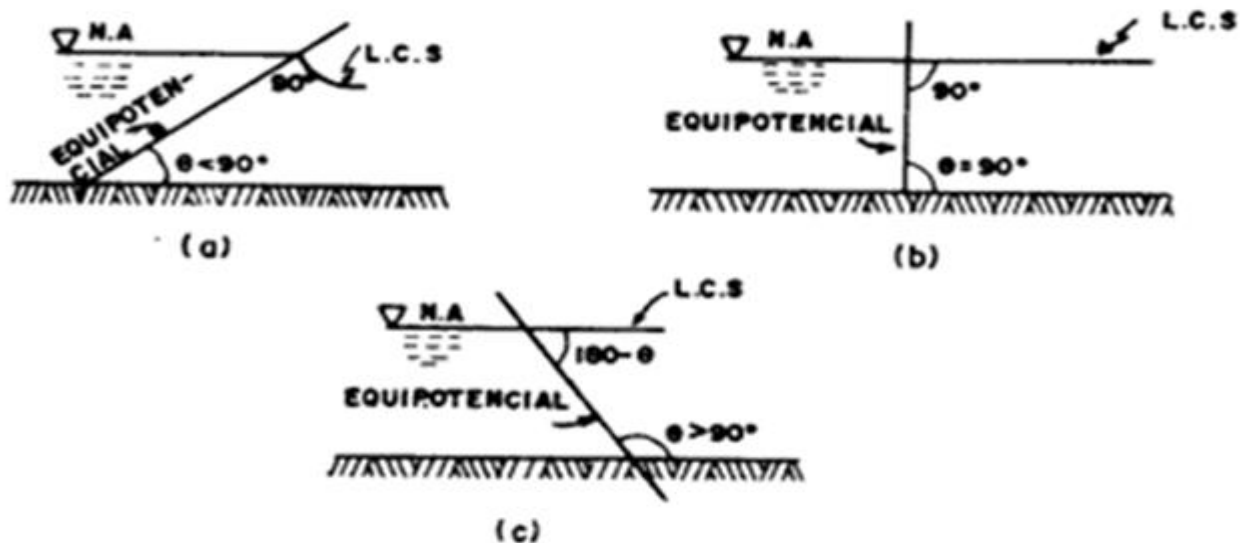


Figura 2.9 Condiciones de entrada de la línea de corriente superior. LCS

Lo mostrado en la figura 2.9 se puede resumir en la tabla 2.2:

Tabla 2.2 Condiciones de entrada de la línea de corriente superior. LCS.

Ángulo que forma el talud aguas arriba con la horizontal:	Condición de entrada: ángulo que forma la línea corriente superior, LCS con el talud:
$\theta < 90^\circ$	90°
$\theta = 90^\circ$	90° (horizontal)
$\theta > 90^\circ$	$180^\circ - \theta$

Las condiciones de salida de la línea de corriente superior, LCS en la presa de tierra se presentan en los tres casos que se muestran en la figura 2.10, quedando los mismos en función de la geometría del talud aguas abajo.

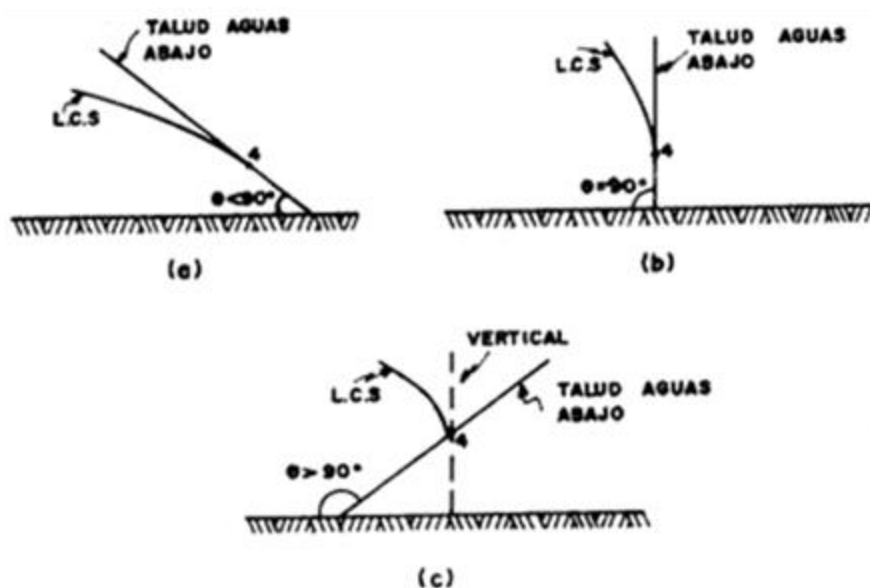


Figura 2.10 Condiciones de salida de la línea de corriente superior. LCS.

Lo mostrado en la figura 2.10 se puede resumir en la tabla 2.3:

Tabla 2.3 Condiciones de salida de la línea de corriente superior. LCS

Ángulo que forma el talud aguas Abajo con la horizontal:	Condición de salida de la línea de corriente superior, LCS en el punto 4:
$\theta < 90^\circ$	Tangente al talud
$\theta = 90^\circ$	Tangente al talud
$\theta > 90^\circ$	Tangente a la vertical

Conocidas las reglas generales que debe cumplir la entrada y la salida de la LCS en la presa de tierra, resulta necesario estudiar las teorías existentes para poder determinar la geometría completa de la línea de corriente superior, LCS y con ello lograr definir la región de la presa donde está ocurriendo el flujo y posteriormente establecer la red de flujo que da solución a las filtraciones a través de la misma.

2.2.2 Teoría de Dupuit.

Para poder determinar la geometría completa de la línea de corriente superior, LCS y de esta forma definir la región de la presa donde ocurre el flujo y establecer la red de flujo que da solución a las filtraciones a través de la misma se debe conocer primero las reglas generales que debe cumplir la entrada y la salida de la LCS en la presa de tierra y posteriormente resulta necesario estudiar las teorías existentes.

En 1863 J. Dupuit estableció las bases para una solución aproximada para problemas de flujo no confinado. Las hipótesis de la teoría de Dupuit son las siguientes:

- Para pequeñas inclinaciones de la LCS, las líneas de flujo pueden considerarse horizontales y, consecuentemente, las líneas equipotenciales como verticales.
- El gradiente hidráulico es igual a la pendiente de la línea de corriente superior en el punto de que se trate y es constante en cualquier punto de la vertical que se trace por él.

Aunque las hipótesis anteriores parecen hasta cierto punto contradictorias, la teoría de Dupuit proporciona soluciones satisfactorias para algunos problemas de flujo no confinado.

Para el flujo bidimensional es factible encontrar el gasto que pasa bajo una línea de corriente superior, LCS que, en su recorrido de proyección horizontal (S), varía desde la altura (h) hasta otra (h₀) según se muestra en la figura 2.11.

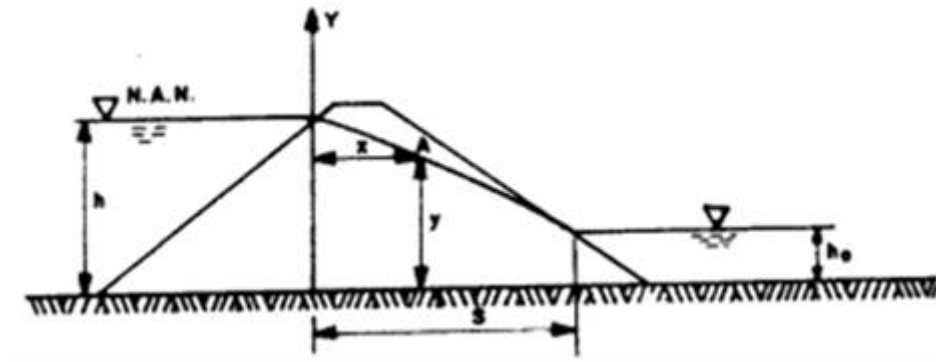


Figura 2.11 Sección transversal con flujo bidimensional

En la sección transversal de una presa se puede aplicar la ley de Darcy para obtener la ecuación del gasto diferencial, asumiendo que el gradiente hidráulico es igual a la pendiente de la línea de corriente superior, LCS $i = dy/dx$, quedando como:

$$q = -k \cdot y \cdot \frac{dy}{dx}$$

(Ecuación 2.15)

$$q \cdot dx = -k \cdot y \cdot dy$$

(Ecuación 2.15a)

Integrando la (Ecuación 2.15a) se tiene que:

$$q \cdot x = -\frac{k \cdot y^2}{2} + C$$

(Ecuación 2.16)

Si se evalúa para $x=0$ y $y=h$, queda:

$$C = \frac{k}{2} \cdot h^2$$

(Ecuación 2.17)

Si se sustituye el valor de la constante de integración C en la (Ecuación 2.16) se tiene que:

$$q \cdot x + \frac{k}{2} \cdot y^2 = \frac{k}{2} \cdot h^2$$

(Ecuación 2.18)

La (Ecuación 2.18) representa la ecuación de una parábola y constituye la ecuación de la línea de corriente superior, LCS según la teoría de Dupuit.

Para obtener una ecuación del gasto en términos conocidos, se evaluará la (Ecuación 2.18) para $x = S$ y $y = h_0$, obteniéndose:

$$q \cdot S + \frac{k}{2} \cdot h^2 = \frac{k}{2} \cdot h^2$$

$$q = \frac{k}{2 \cdot S} \cdot (h^2 - h_0^2) \text{ (Ecuación 2.19)}$$

La (Ecuación 2.19) representa el gasto que circula en la sección transversal, considerando un espesor unitario en el sentido perpendicular al plano del papel, según la teoría de Dupuit.

A continuación, realizaremos algunas valoraciones sobre la teoría de Dupuit:

1. No se plantea nada en cuanto a las condiciones de entrada y salida de la LCS, por lo que se considera que la misma comienza en el nivel de aguas arriba y termina en el nivel aguas abajo.

2. Ni el gasto, ni la ecuación de la línea de corriente superior, LCS, definidas por las ecuaciones (2.18) y (2.19), dependen de los taludes de la presa, lo que implica que la línea de corriente superior, LCS no es tangente al talud aguas abajo ni sale perpendicular al talud aguas arriba.
3. Si se sustituye la (ecuación 2.19) en la ecuación de la línea de corriente superior, LCS (2.18) se observa se observa que ésta es independiente de la permeabilidad, solo depende de la geometría de la sección.
4. Para el caso $h_0 = 0$ la expresión (2.19) queda $q = k \cdot h^2/2S$. Debe hacerse notar que en este caso particular no se satisface la condición de que la línea de corriente superior, LCS sea de pequeña pendiente en toda su longitud y que la hipótesis $h_0 = 0$ es hasta cierto punto inadmisibles, pues h_0 debe ser diferente de cero para permitir la salida del gasto q .

2.2.3 Solución de Schaffernak y Van Iterson para la LCS.

Esta solución se diferencia de la de Dupuit en que es solo válida para el caso de $h_0 = 0$ y que considera la formación una superficie filtración, cuya longitud, como se muestra en la figura 2.12, a lo largo del talud aguas abajo es "a".

El método descansa en las hipótesis de Dupuit, pero toma en consideración, hasta cierto punto, las condiciones de entrada y salida de la línea de corriente superior de la presa de tierra.

Considérese la sección de presa de tierra homogénea mostrada en la figura 2.12

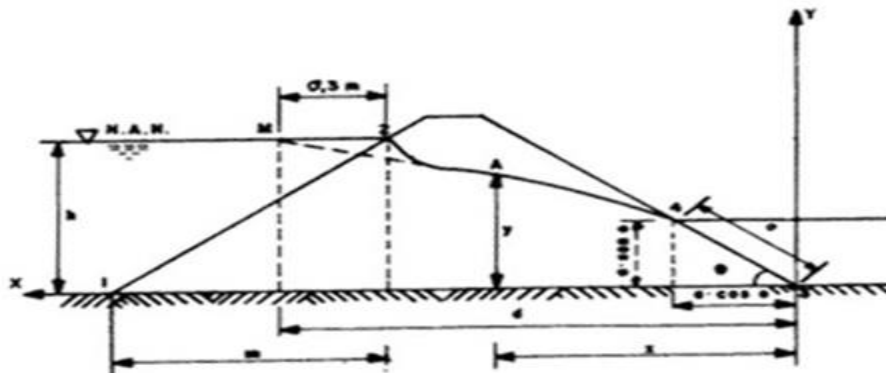


Figura 2.12 Sección de presa de tierra homogénea

Con vista a considerar las condiciones de entrada de la LCS se supone conocido el punto M, de coordenadas (d; h). Arthur Casagrande propone la posición del punto M, tal y como se muestra en la figura 2.12, a una distancia de 0.3 m a la izquierda del punto 2. De igual forma la distancia horizontal entre el punto 1 y el 2 es m.

Tal y como ya se había planteado en la teoría de Dupuit, el gasto en cualquier sección bajo la línea de corriente superior, LCS, tal y como lo es el punto A (x; y) será:

$$q = k \cdot y \cdot \frac{dy}{dx}$$

(Ecuación 2.20)

El cambio de signo con respecto a la (Ecuación 2.20) definida por Dupuit se debe al cambio de la posición de los ejes de coordenadas.

Integrando la (Ecuación 2.20) se obtiene:

$$q \cdot x = k \cdot \frac{y^2}{2} + C$$

(Ecuación 2.21)

Evalutando (Ecuación 2.21) para $x = d$ e $y = h$ se obtiene el valor de la constante de integración C, quedando como:

$$C = q \cdot d - \frac{k \cdot h^2}{2}$$

(Ecuación 2.22)

Sustituyendo (Ecuación 2.22) en (Ecuación 2.21) se tiene:

$$q (d - x) = k \cdot \frac{h^2 - y^2}{2}$$

(Ecuación 2.23)

La (Ecuación 2.23) representa el lugar geométrico de la línea de corriente superior en función del gasto.

Con vista a considerar la condición de salida de la línea de corriente superior, LCS, la cual debe salir tangente al talud aguas abajo en el punto 4, se tiene que, para dicho punto 4:

$$x = \alpha \cdot \cos \theta$$

$$y = \alpha \cdot \text{sen } \theta$$

$$i = \tan \theta$$

El gasto en la sección vertical que pasa por el punto 4 estará dado por:

$$q = k \cdot \alpha \cdot \text{sen } \theta \cdot \tan \theta$$

(Ecuación 2.24)

El valor de “a” puede obtenerse sustituyendo la (Ecuación 2.24) en la (Ecuación 2.23) y despejando “a” después de evaluada para las coordenadas del punto 4, obteniéndose después de operar la siguiente ecuación de segundo grado:

$$a^2 - 2 \cdot \frac{d}{\cos \theta} \cdot a + \frac{h^2}{\text{sen}^2 \theta} = 0$$

(Ecuación 2.25)

Resolviendo la ecuación anterior y eliminando la solución con radicando positivo, por ser absurda desde el punto de vista físico, se obtiene la siguiente ecuación para determinar a:

$$a = \frac{d}{\cos \theta} - \sqrt{\frac{d^2}{\cos^2 \theta} - \frac{h^2}{\text{sen}^2 \theta}}$$

(Ecuación 2.26)

La (Ecuación 2.26) permite calcular el valor de “a” y por tanto definir la posición del punto 4 de salida de la línea de corriente superior, LCS.

A continuación, realizaremos algunas valoraciones sobre la solución de Schaffernak y Van Iterson:

- 1) Con las ecuaciones (2.26) y (2.24) se puede calcular el gasto de filtración sin necesidad de trazar la red de flujo.
- 2) La ecuación (2.24) da buenos resultados cuando la línea de corriente superior, LCS es bastante tendida; A. Casagrande propone que este método solo se utilice para $\theta < 30^\circ$. Cabe señalar que en casi la totalidad de las presas de tierra homogéneas se cumple dicha condición y por tanto se puede aplicar la solución ante expuesta.
- 3) Conocidos los puntos M y 4 puede trazarse la LCS utilizando las ecuaciones (2.23) y (2.24).
- 4) La parábola así trazada pasa bajo el punto 2 o punto de entrada de la LCS. A. Casagrande propone hacer a “a ojo” una corrección en esta zona, de forma que se cumpla con la condición de entrada de la línea de corriente superior, LCS, que debe ser normal en el punto 2 al talud de aguas arriba de la presa. Esta corrección se ha hecho en la figura 2.12.

2.2.4 Solución de Kozeny para la línea de corriente superior

Kozeny (1931) propuso una solución rigurosa para cuando $\theta = 180^\circ$, que es el caso cuando en una presa de tierra tiene un colchón de drenaje, tal y como se muestra en la figura 2.13.

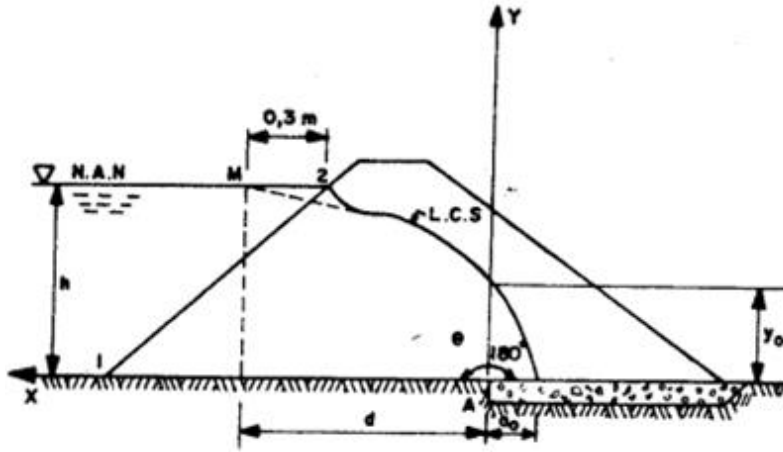


Figura 2.13 Sección de presa de tierra con colchón de drenaje

La solución rigurosa propuesta por Kozeny para el caso de $\vartheta = 180^\circ$ es la de considerar la red de flujo formada por dos familias de parábolas del mismo foco A.

La ecuación de la línea de corriente superior, LCS, referida al sistema de ejes planteados en la figura 2.13, con origen en el foco A, es:

$$x = \frac{y^2 - y_0^2}{2y_0}$$

$$y = \sqrt{2y_0 \cdot x + y_0^2}$$

(Ecuación 2.27)

Donde:

y_0 : Ordenada en el origen de coordenadas de la línea de corriente superior

En la solución se supone, de nuevo, conocido el punto M, de coordenadas (d, h) con lo que se puede conocer las distancias a_0 y y_0 , según:

$$a_0 = \frac{y_0}{2} = \frac{1}{2} \cdot (\sqrt{d^2 + h^2} - d)$$

(Ecuación 2.28)

En esta solución el gasto a través de la presa se determina por la siguiente expresión:

$$q = 2 \cdot k \cdot a_0 = k \cdot y_0$$

(Ecuación 2.29)

A continuación, se realizan algunas observaciones sobre la solución de Kozeny.

- 1) La relación entre a_0 y y_0 es una propiedad conocida de las parábolas
- 2) Otra propiedad de la parábola (línea de corriente superior, LCS) es que su inclinación sobre el origen, (en $x = 0$; $y = y_0$) es de 45° .
- 3) Al plantearse que $q = k \cdot y_0$ se está planteando que $i = 1$, lo que significa que se considera el gradiente igual a la pendiente de la línea de corriente superior, LCS, ($i = \tan \alpha$), hipótesis de Dupuit, y que en esa sección $dy/dx = 1$.
- 4) Si derivamos $x = (y^2 - y_0^2)/2 y_0$ nos daría $dx/dy = y/y_0$, de igual forma se puede obtener que $dy/dx = y_0/y$, por lo tanto, para $y=0$, entrada al drenaje, $dy/dx = \infty$, lo que implica que la LCS entra al drenaje totalmente vertical, además para $y=y_0$ se obtiene que $dy/dx = 1$, demostrándose lo planteado anteriormente que la pendiente de la LCS en $x = 0$; $y = y_0$ es de 45° .
- 5) La parábola de Kozeny es también denominada como “parábola básica”
- 6) La condición de entrada de la LCS se corrige a “ojo”, siguiendo la propuesta de Casagrande.

2.2.5 Solución de Casagrande para la línea de corriente superior.

Casagrande extendió la solución rigurosa de Kozeny, de manera que llegó a soluciones aproximadas, pero de gran valor práctico, aplicable a los casos en que $60^\circ < \theta < 180^\circ$. En la figura 2.14 se muestran las particularidades de dicha solución.

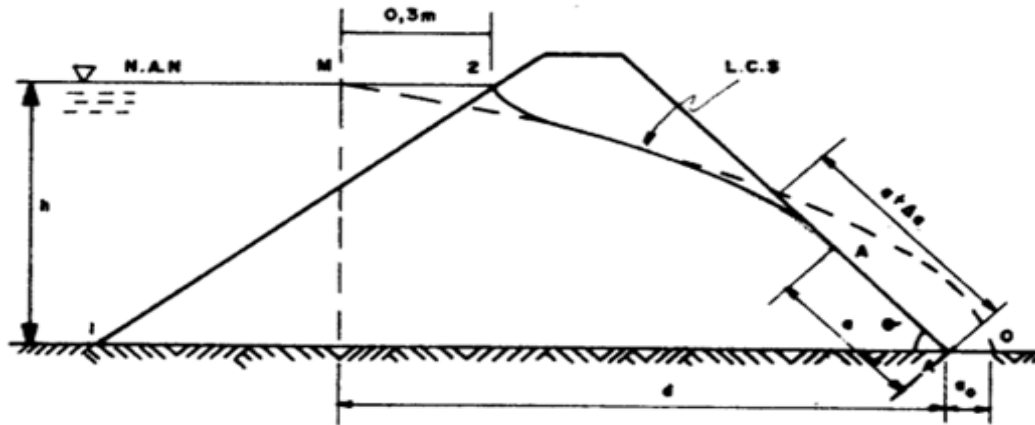


Figura 2.14 Sección para la solución de Casagrande

Para aplicar la solución propuesta por Casagrande se debe seguir el siguiente procedimiento:

- 1) Se considera como foco de la parábola básica el pie del talud aguas abajo (punto A).
- 2) Con vista a tener en cuenta la condición de entrada se supone conocido el punto M, de coordenadas (d; h).
- 3) La posición del punto O se determina colocando la distancia α_0 , calculada según la (ecuación 2.30).

$$\alpha_0 = \frac{1}{2}(\sqrt{d^2 + h^2} - d)$$

(Ecuación 2.30)

- 4) Se calculan los puntos de la parábola utilizando la expresión:

$$x = \frac{y^2 - y_0^2}{2y_0}$$

Donde:

$$y_0 = 2\alpha_0$$

Dibujándose la parábola (de M hasta O). Los ejes de coordenadas son los mismos de Kozeny y se encuentran en el foco A.

- 1) Se determina la distancia $(\alpha + \Delta\alpha)$ entre el pie del talud y la intersección de la parábola con el talud aguas abajo, tal como se señala en la figura 2.14.
- 2) Se determina según Casagrande la posición del punto 4, haciendo uso de la corrección mostrada en la figura 2.15.

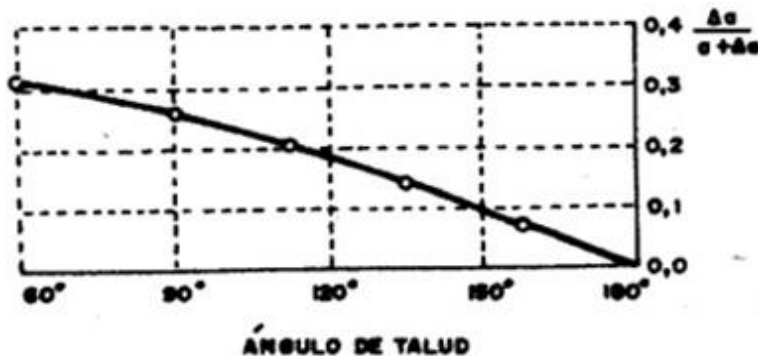


Figura 2.15 Corrección por Casagrande

- 3) Con el valor de $\Delta\alpha / (\alpha + \Delta\alpha)$, obtenido del paso anterior, y $(\alpha + \Delta\alpha)$ obtenido en el paso 5, se despeja $\Delta\alpha$, pudiéndose situar el punto 4.
- 4) Se corrigen “a mano”, tanto la condición de entrada como la de salida, siendo esta última tangente al talud en el punto 4, en el caso mostrado en la figura 2.14. En el caso de que θ sea mayor que 90° , como es el de una sección de presa homogénea con prisma de drenaje, la condición de salida de la línea de corriente superior deberá ser tangente a la vertical en el punto 4.

A continuación, realizaremos algunas observaciones sobre la solución planteada por Casagrande para la obtención de la línea de corriente superior, LCS.

1. En la solución de Casagrande para determinar el gasto resulta necesario recurrir a la red de flujo, como la que se muestra en la siguiente figura 2.16.

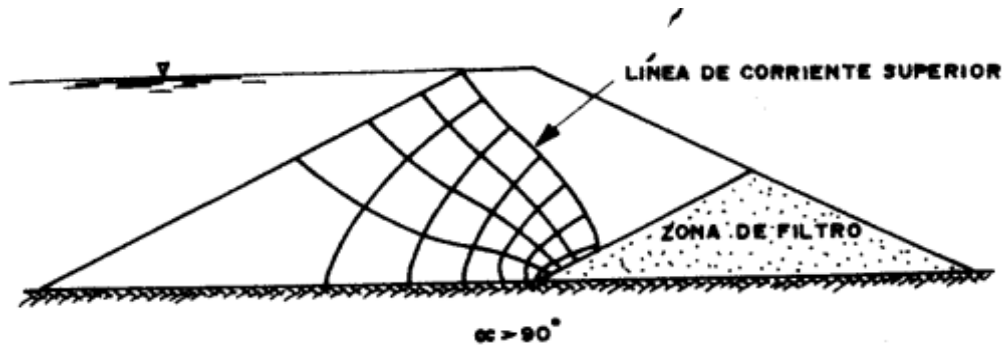


Figura 2.16 Red de flujo

2. Para calcular el gasto en la red de flujo debe determinarse n_e sobre la superficie impermeable, frontera inferior de la red.

2.2.6 Teoría de la sección transformada.

Como ya se ha planteado la ecuación de la Laplace está muy estudiada, al igual que sus soluciones, por lo que sería muy recomendable que sea la utilizada para el estudio del flujo a través de una región de suelo. Por otro lado, ya se definió que la ecuación de Laplace solo es válida para suelos isótropos desde el punto de vista de la permeabilidad, y como conocemos en una cantidad de problemas prácticos, incluidas las presas de tierras, esa condición no se cumple ya que en dichos casos $K_x \neq K_y$.

Afortunadamente existe un artificio matemático de trabajo que permite estudiar todos los problemas de flujo como si éste estuviera ocurriendo a través de un suelo isótropo donde $K_x = K_y$. Este artificio se conoce como la teoría de la sección transformada y permite reducir un suelo anisótropo a uno isótropo, en cuanto a la permeabilidad, y por tanto poder utilizar la ecuación de Laplace y su solución en el problema del flujo de agua a través de la cortina de una presa de tierra.

En esencia la teoría de la sección transformada es un simple artificio de cálculo que se logra por una sencilla transformación de coordenadas y que modifica sobre el papel de las dimensiones de la zona de flujo en estudio, de manera que la nueva sección obtenida, supuesta isótropa con $K_x = K_y$, tengan todas las

condiciones de flujo que interesan, iguales a las prevalecientes en la sección propuesta con $K_x \neq K_y$.

Partiendo de la región de flujo que se muestra en la figura 2.17, en la que $K_x \neq K_y$.

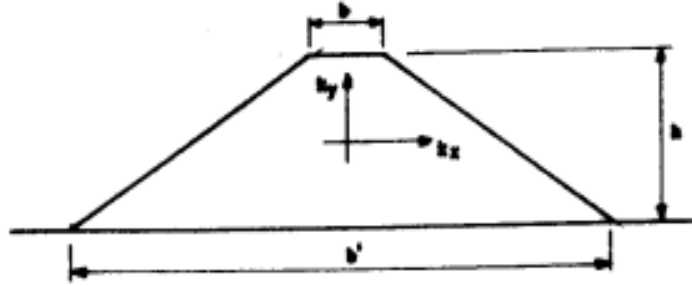


Figura 2.17 Región de flujo

Se realizará la siguiente transformación de coordenadas, en la que la coordenada x se transforma en la coordenada x' , tal que:

$$x' = \sqrt{\frac{k_y}{k_x}} \cdot x$$

(Ecuación 2.31)

Si la (Ecuación 2.32) la dividimos por K_x

$$k_x \cdot \frac{\partial^2 \cdot h}{\partial x^2} + k_y \cdot \frac{\partial^2 \cdot h}{\partial y^2} = 0$$

(Ecuación 2.32)

se obtiene:

$$\frac{\partial^2 \cdot h}{\partial x^2} + \frac{k_y}{k_x} \cdot \frac{\partial^2 \cdot h}{\partial y^2} = 0$$

(Ecuación 2.33)

Por otro lado, si se deriva la (Ecuación 2.31) con respecto a x se obtiene:

$$\frac{dx'}{dx} = \sqrt{\frac{k_y}{k_x}}$$

De igual forma, tomando en cuenta la transformación definida en la (Ecuación 2.31), se puede escribir:

$$\frac{\partial h}{\partial x} = \frac{\partial h}{\partial x'} \cdot \frac{dx'}{dx} = \sqrt{\frac{k_y}{k_x}} \cdot \frac{\partial h}{\partial x'}$$

(Ecuación 2.34)

Si se vuelve a derivar la (ecuación 2.35) con respecto a x, se obtiene:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} = \frac{k_y}{k_x} \cdot \frac{\partial^2 h}{\partial x'^2}$$

(Ecuación 2.35)

Si sustituimos la ecuación (2.35) en (2.33), se tiene:

$$\frac{k_y}{k_x} \cdot \frac{\partial^2 h}{\partial x'^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0$$

(Ecuación 2.36)

La que evidentemente se reduce a la siguiente expresión:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x'^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0$$

(Ecuación 2.37)

Demostrándose que si se trabaja con la sección transformada resulta posible utilizar la ecuación de Laplace para el estudio del flujo a través de una región de suelo, incluso para el caso de suelos anisótropos en cuanto a la permeabilidad donde $K_x \neq K_y$.

En la figura 2.18 se muestra cómo quedaría la sección transformada de la original mostrada en la figura 2.17, en la que quien dirige y gobierna el flujo es la ecuación de Laplace.

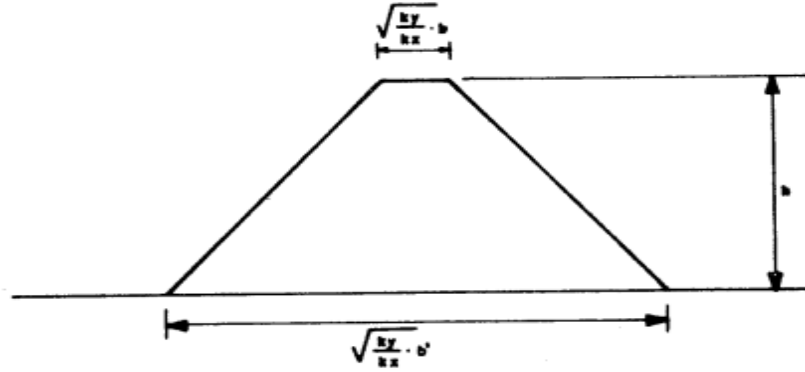


Figura 2.18 Sección transformada

Naturalmente que la transformación de coordenadas no ha de hacerse solo en las ecuaciones, sino también física y realmente en la sección bajo estudio. Así, la zona de flujo original en la figura 2.17 se transforma para todos los cálculos en la región 2.18, donde las dimensiones horizontales se transforman y las verticales no se modifican.

La sección transformada también se pudo haber obtenido transformando las coordenadas y en coordenadas transformadas y' , donde la ecuación para la transformación sería:

$$y' = \sqrt{\frac{k_x}{k_y}} \cdot y,$$

(Ecuación 2.38)

La permeabilidad equivalente que se emplea para los cálculos en la sección transformada se demuestra que es igual a:

$$k = \sqrt{k_x \cdot k_y}$$

(Ecuación 2.39)

En resumen, para resolver el problema del flujo de agua a través de una región de suelo anisótropo deberá inicialmente obtenerse la sección transformada, con el cambio de coordenadas correspondiente, y realizar todos los cálculos sobre dicha

sección transformada como si el suelo fuera isótropo con un coeficiente de permeabilidad equivalente igual al definido en la (ecuación 2.39)

2.3 Características generales de los tipos de drenajes en las presas cubanas.

Un fuerte desarrollo de construcción de presas y embalses se realizó en Cuba entre 1960 y 1992, actualmente 1 400 embalses y micropresas permiten almacenar 9 600 millones de metros cúbicos, comparados con 48 millones de metros cúbicos en 1959; paliando uno de los problemas importantes de la isla: la escasez de agua, tanto para riego como para uso humano. Es por ello que se han trazado metas en cuanto al diseño de presas haciendo que estas sean cada vez más atrevidas, pero a la vez seguras y económicas y para ello se debe hacer el análisis de algunos parámetros.

Como ya se dijo anteriormente los drenes en las presas de tierra se colocan para controlar la línea de saturación y los posibles efectos de las filtraciones. Ellos evitan que el material constitutivo de la presa sea arrastrado por el agua que se infiltra en la misma, además, disminuyen la presión neutra que se infiltra en la cortina de la presa, logrando un aumento de la tensión efectiva y, por tanto, de la estabilidad de la presa. En el estudio realizado a las presas cubanas se obtuvieron los datos de los tipos de drenajes más usados en Cuba. A continuación, se muestran los datos para las presas seleccionadas Tabla 2.4:

Tabla 2.4 Tipos de drenajes de la cortina en presas cubanas.

Presa	Tipo de drenaje de la cortina
Ejército Rebelde	Prisma
Mampostón	Colchón
Las Nieves	Prisma
Minerva	Prisma
Lebrije	Prisma
Cauto del Paso	Prisma
Sitio Peña	Prisma
Baracoa	Prisma

La Ruda	Prisma
Caunavaco	Prisma
Abreus	Prisma
Mal País II	Colchón

Como se evidencia los drenes más comunes utilizados en presas de materiales locales en Cuba, particularmente en presas de sección homogénea, es el prisma de piedra en el pie del talud aguas abajo ya que aumenta considerablemente la estabilidad del mismo cuando la presa se apoya en una base rocosa, al estar situado el prisma en el lugar por donde pasará la superficie de falla potencialmente más peligrosa. Este tipo de dren tiene como inconveniente lo difícil que resulta su reparación en caso de oclusión de los filtros y que, además, al penetrar poco en la pantalla de la presa, contribuye poco a reducir el volumen de material saturado en el talud aguas abajo.

Los casos seleccionados en su mayoría poseen dren de prisma ya que sus secciones son homogéneas.

Otro tipo de dren utilizado en presas cubanas es el de colchón, es uno de los drenes más efectivos en reducir el volumen de material saturado en el talud aguas abajo y al controlar la salida de las filtraciones por la base de la presa. En el diseño de estos drenes se debe utilizar un elevado factor de seguridad y se debe llevar a cabo un control riguroso de la ejecución ya que, de producirse una oclusión, son imposibles de reparar y la presa estaría sometida a filtraciones para las cuales no fue diseñada y que difícilmente podría soportar.

En el estudio realizado se obtuvieron dos presas de gran envergadura para el país con este tipo de drenaje Mampostón; de tipo homogénea y categoría II y Mal País II.

2.4 Características generales de los taludes y alturas en las presas cubanas.

La construcción de presas satisface diversos objetivos. Regula el flujo hídrico, compensando la abundancia de agua en algunas épocas del año con otras de

escasas lluvias; al mismo tiempo permite controlar flujos excesivos en épocas excesivamente lluviosas o en zonas de lluvias torrenciales concentradas en pocos meses del año, como en la región de los monzones, y evitar avenidas e inundaciones; hacen habitables llanuras que antes no lo eran. Al capturar agua de escorrentía que de otro modo iría directamente al mar, se aumenta efectivamente la oferta de agua, el relativamente alto nivel de la presa con relación a la llanura permite regar por gravedad, y, por cierto, las presas tienen un objetivo importante como generadoras de energía eléctrica. Para esto es necesario un buen diseño y análisis de parámetros principales de las presas.

La altura y pendiente de los taludes son datos esenciales al analizar las filtraciones y estabilidad de taludes en presas de tierra por ello a continuación se muestran los valores de altura y pendientes de los taludes de algunas presas de interés nacional antes mencionadas Tabla 2.5:

Tabla 2.5 Valores de altura de la cortina y pendiente de los taludes en presas cubanas.

Presa	Talud Aguas Arriba	Talud Aguas Abajo	Altura de la cortina (m)
Ejército Rebelde	1:3.5	1:2.5	29.10
Mampostón	1:3.0	1:2.25 y 1:2.5	37.0
Las Nieves	1:3.0	1:2.5	16.55
Minerva	1:2.5 y 1:3	1:2 y 1:2.5	37.0
Lebrije	1:2.2 y 1:3	1:2.5 y 1:2.5	39.5
Cauto del Paso	1:2.5	1:2.5	30.0
Sitio Peña	1:3	1:2.5	17,2
Baracoa	1:2.75	1:2.25	18
La Ruda	1:2.75	1:2 y 1:2.5	20,5
Caunavaco	1:2.5	1:2.5	35,2
Abreus	1:3	1:2.5	12,5
Mal País II	1:3	1:3	10

Como es evidente las alturas de los embalses oscilan entre 10 y 40 m, aunque en su mayoría se encuentran entre los 15 y 40 m y la altura promedio es de 25.21 m por lo podemos decir que son presas de alturas pequeñas

Las pendientes de los taludes aguas arriba oscilan de 1:2.5 a 1:3.5 y los taludes aguas debajo de 1: 2 a 1:3.

2.5 Características generales de los suelos en las presas cubanas.

La determinación de las propiedades de resistencia, permeabilidad y deformación de los suelos ha sido tema de la Mecánica de suelos. Para el diseño y construcción de presas es imprescindible conocer estas características de los suelos.

Los suelos en las presas cubanas poseen características típicas de acuerdo con el lugar en el que se encuentran ubicado el embalse Tabla 2.6. Para el caso de la base las propiedades de los suelos son:

Tabla 2.6 Propiedades de los suelos más comunes en los embalses cubanos.

C(Kpa)	100
φ°	10

Para el caso de la cimentación las propiedades de los suelos son:

C(Kpa)	10	20	25
φ°	10	20	25

2.6 Características principales del programa computacional GeoStudio 2007.

En el análisis de estabilidad de taludes se realizan suposiciones enfocadas al equilibrio estático para que la obtención del factor de seguridad sea factible. Para cada radio posible se puede obtener diferentes superficies de falla, por lo que el cálculo de dicho factor es una tarea tediosa y extensa.

El continuo desarrollo que ha tenido la tecnología en los últimos años ha permitido que las tareas asignadas a los métodos numéricos sean optimizadas a través de software que cumplen procesos sistemáticos e iterativos. (Eduardo, 2013)

GeoSlope 2007 es una de las herramientas informáticas de mayores potencialidades para el análisis de taludes y filtraciones, ya que permite tratar estratigrafías complejas, la presión del agua intersticial en condiciones irregulares, modelos de resistencia al corte lineal y no lineal, casi cualquier tipo de forma de la superficie de deslizamiento, cargas concentradas, y el refuerzo estructural. Este programa permite realizar los cálculos de estabilidad de taludes a través de una gran variedad de métodos: Ordinario (Fellenius), Bishop simplificado, Janbu simplificado, Spencer, Morgenstern-Price, Cuerpo de Ingenieros Americanos, Lowe-Karafiath, Sarma, Método de equilibrio límite generalizado y Método de los elementos finitos. La introducción de los condicionantes geométricos es muy versátil y se adapta prácticamente a cualquier geometría.

La introducción de los condicionantes geométricos son muy versátiles y se adaptan prácticamente a cualquier geometría: Geometría adaptable a cualquier contorno estratigráfico gráficas a través de la definición de regiones, Definición de grietas de tracción, Parcialmente sumergidos.

El software también dispone de distintos sistemas de modelización de las superficies de rotura como malla de centros y límites, superficies de rotura, por bloques, zonas de entrada salida acotando los posibles círculos de rotura, búsqueda automática de superficies de rotura, optimización de búsqueda de superficies de rotura, posicionamiento automático de grietas de tracción.

Se puede modelar las acciones del agua en el terreno a través de los siguientes sistemas: coeficiente de presión de agua, superficie piezométrica, presión hidrostática para cada punto, contornos de presiones hidrostáticas.

Con objeto de modelar el comportamiento de los suelos el programa dispone de varios modelos de comportamiento como:

- Tensiones totales y efectivas.

- Resistencia al corte sin drenaje.
- Resistencia al corte cero (agua, $c = 0$)
- Materiales impenetrables (lechos rocosos).
- Criterios de rotura bilineales.
- Incrementos de la cohesión con la profundidad.
- Resistencia al corte anisótropo.
- Criterios de rotura específicos.
- Modelo de Hoek y Brown

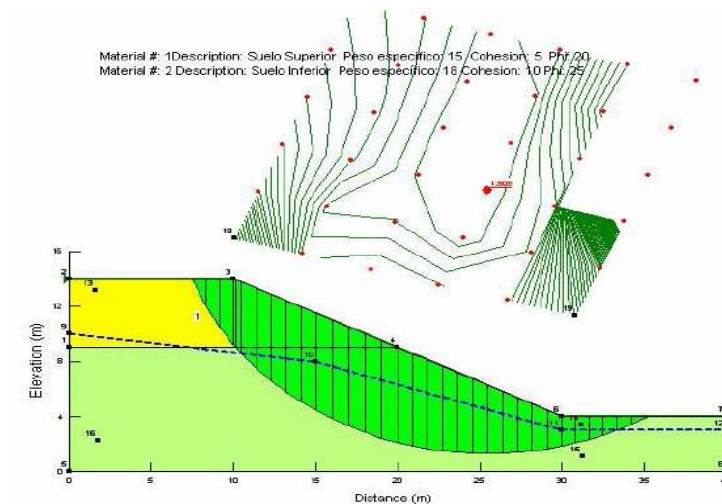


Figura 2.19 Ejemplo de modelación de suelo

Es utilizado para distintos tipos de cargas:

- Cargas superficiales
- Cargas lineales.
- Cargas sísmicas
- Anclajes y bulones (activos y pasivos)
- Suelo reforzado

Capítulo 3 Implementación de los métodos teóricos en el programa computacional GeoStudio 2007 y sus soluciones.

En el presente capítulo se tendrán en cuenta las consideraciones abordadas en el capítulo anterior sobre el trabajo para el análisis de filtraciones y estabilidad de taludes en presas de tierra, siguiendo una serie de pasos para obtener la información necesaria y una correcta modelación y análisis del objeto de obra como lo requieren este tipo de estructura.

Para ello es necesario la utilización del programa computacional GeoStudio 2007 para el análisis de las estructuras haciendo uso de los métodos teóricos descritos en el capítulo anterior, el cual permitirá obtener factores de seguridad según la variación de los parámetros analizados: propiedades de los suelos tipos de drenajes y alturas más comunes en las presas de Cuba y comparar los resultados entre los principales métodos de análisis de estabilidad de taludes y filtraciones

3.1 Análisis de problemáticas de filtraciones y estabilidad de taludes en presas de tierra con alturas de 10 m.

3.1.1 Problemática N°1 Análisis de las filtraciones y estabilidad de taludes en cortina de presa de tierra.

A partir de los datos y la sección transversal de la presa de tierra homogénea mostrados en la figura 3.1

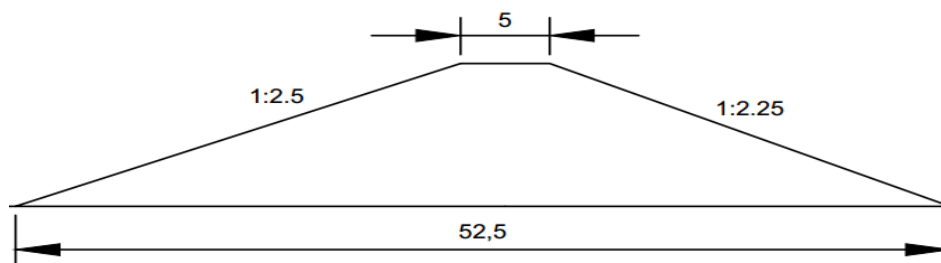


Figura 3.1 Sección transversal de la cortina de la presa.

Red de flujo según la solución computacional haciendo uso del programa GeoStudio 2007.

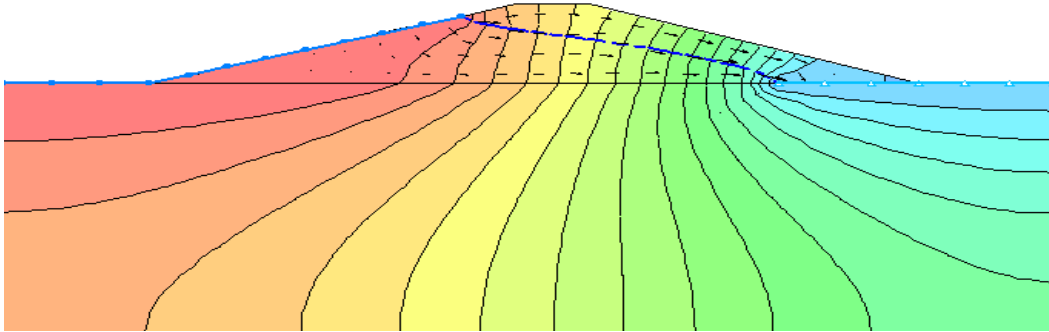


Figura 3.2 Red de flujo según programa computacional GeoStudio 2007

Solución computacional haciendo uso del programa GeoStudio 2007 con suelo de propiedades $c=20\text{Kpa}$ $\phi=20^\circ$ $\gamma=19\text{ Kn/m}^3$ Figura 3.3 a.

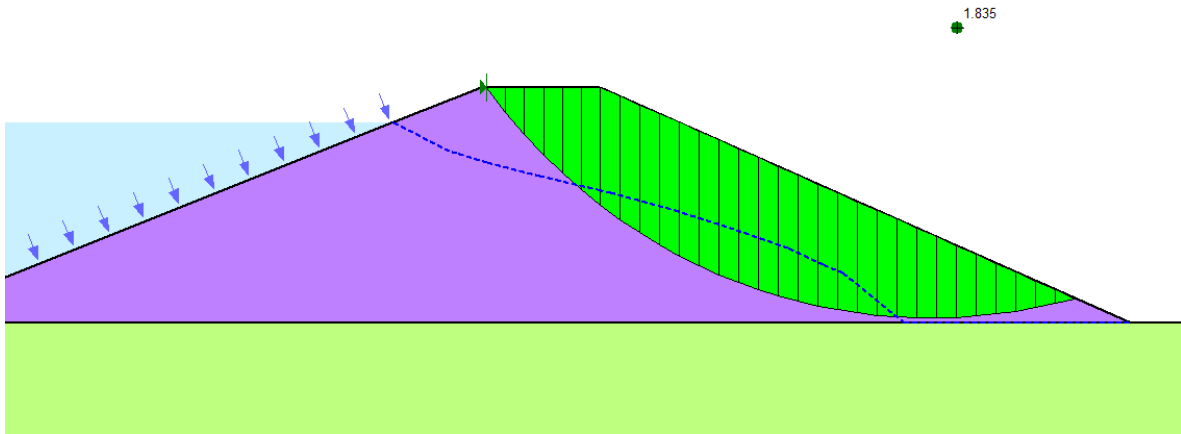


Figura 3.3 a) Solución computacional programa GeoStudio 2007

Solución computacional haciendo uso del programa GeoStudio 2007 con suelo de propiedades $c=25\text{Kpa}$ $\phi=25^\circ$ $\gamma=19\text{ Kn/m}^3$ Figura 3.3 b.

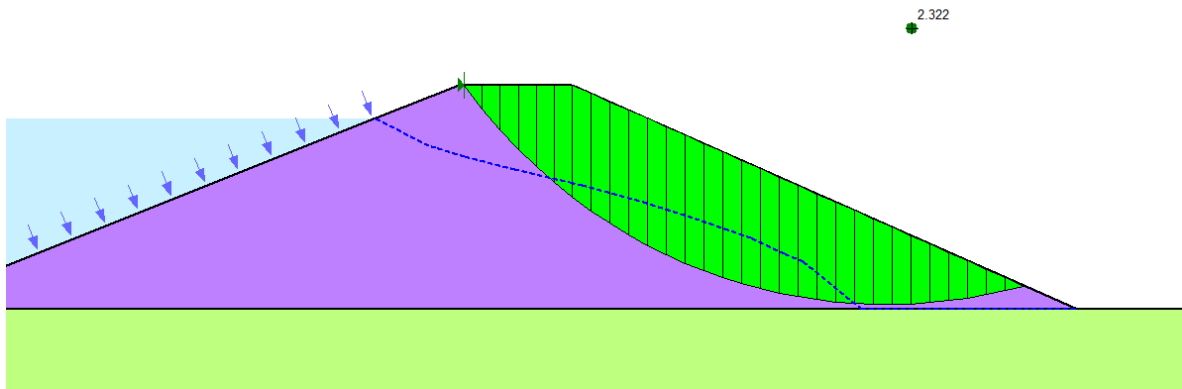


Figura 3.3 b) Solución computacional programa GeoStudio 2007

Solución computacional haciendo uso del programa GeoStudio 2007 con suelo de propiedades $c=30\text{Kpa}$ $\phi=30^\circ$ $\gamma=19\text{ Kn/m}^3$ Figura 3.3 c.

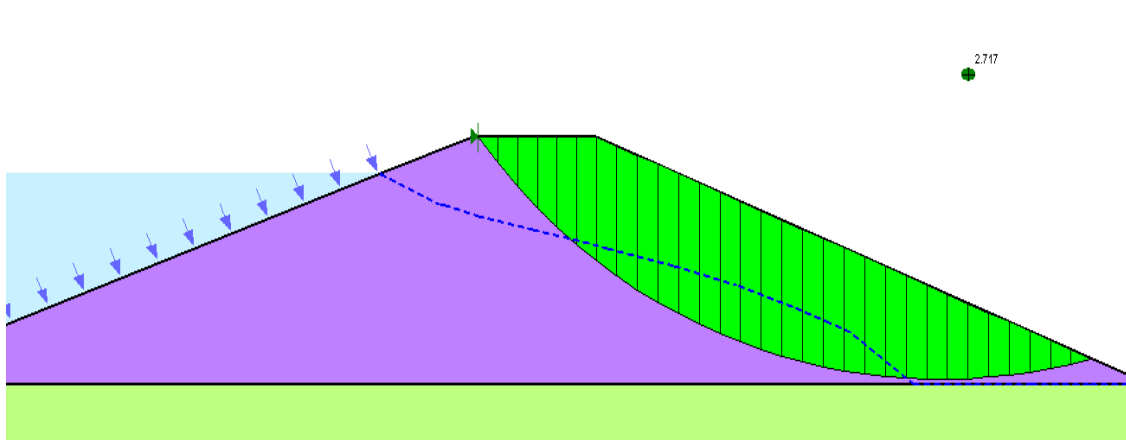


Figura 3.3 c) Solución computacional programa GeoStudio 2007

3.1.2 Problemática N°2 Análisis de las filtraciones y estabilidad de taludes en cortina de presa de tierra.

A partir de los datos y la sección transversal de la presa de tierra homogénea mostrados en la figura 3.4

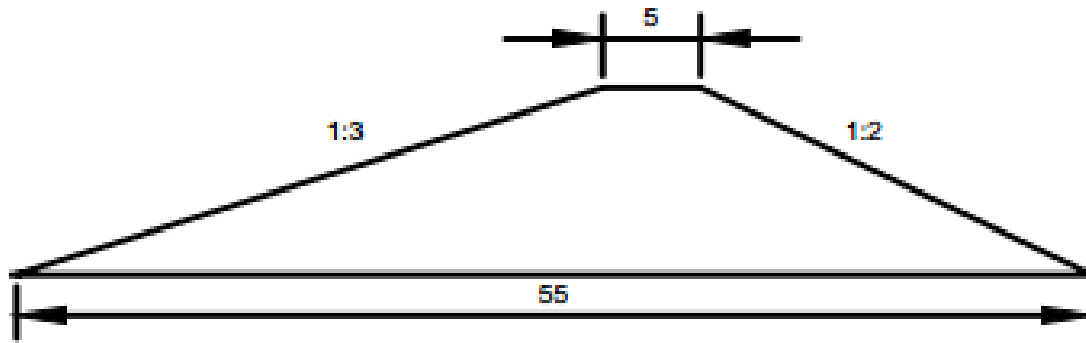


Figura 3.4 Sección transversal de la cortina de la presa.

Red de flujo según la solución computacional haciendo uso del programa GeoStudio 2007 figura 3.5.

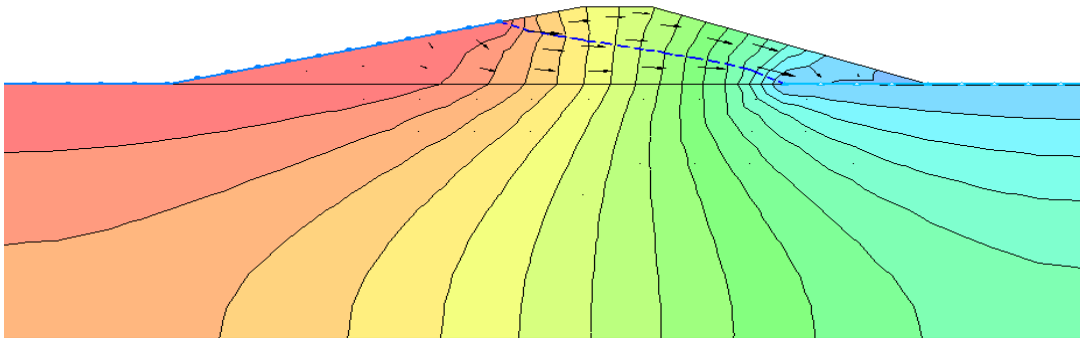


Figura 3.5 Red de flujo según programa computacional GeoStudio 2007

Solución computacional haciendo uso del programa GeoStudio 2007 con suelo de propiedades $c=20\text{Kpa}$ $\phi=20^\circ$ $\gamma=19$ Figura 3.6 a.

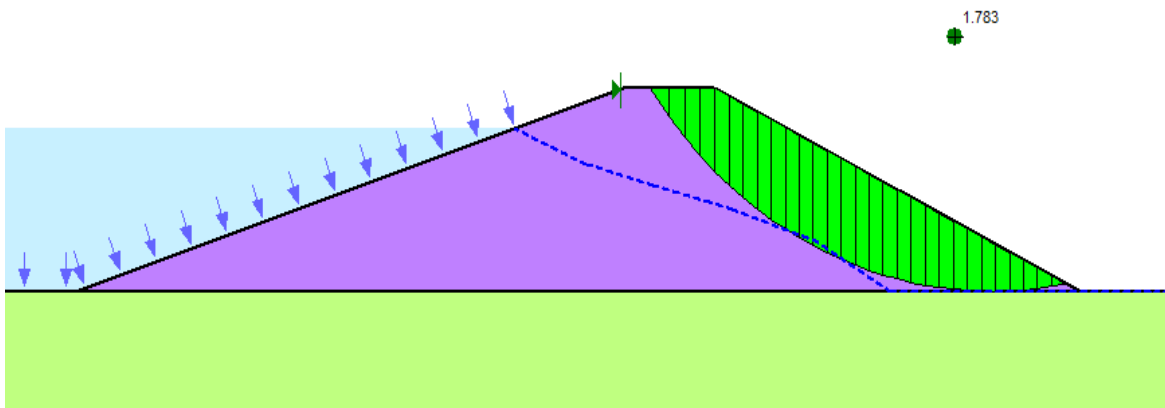


Figura 3.6 a) Solución computacional programa GeoStudio 2007

Solución computacional haciendo uso del programa GeoStudio 2007 con suelo de propiedades $c=25\text{Kpa}$ $\phi=25^\circ$ $\gamma=19 \text{ Kn/m}^3$ Figura 3.6 b.

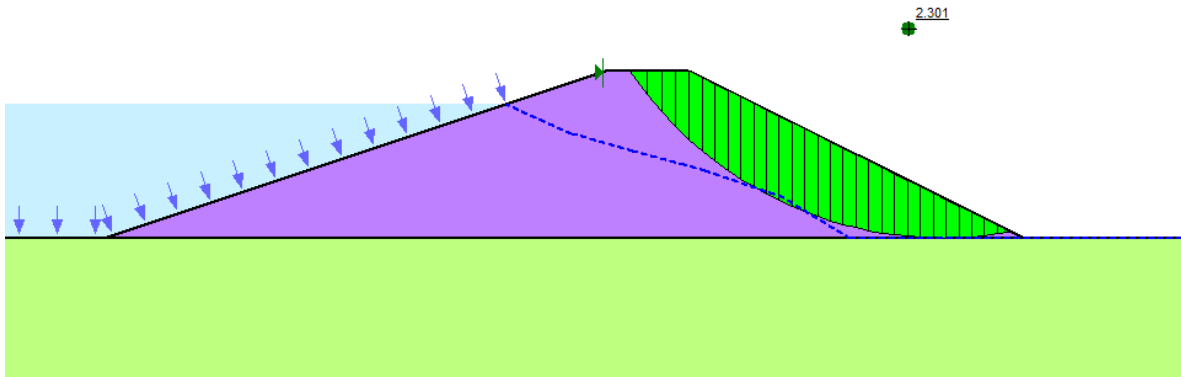


Figura 3.6 b) Solución computacional programa GeoStudio 2007

Solución computacional haciendo uso del programa GeoStudio 2007 con suelo de propiedades $c=30\text{Kpa}$ $\phi=30^\circ$ $\gamma=19 \text{ Kn/m}^3$ Figura 3.6 c.

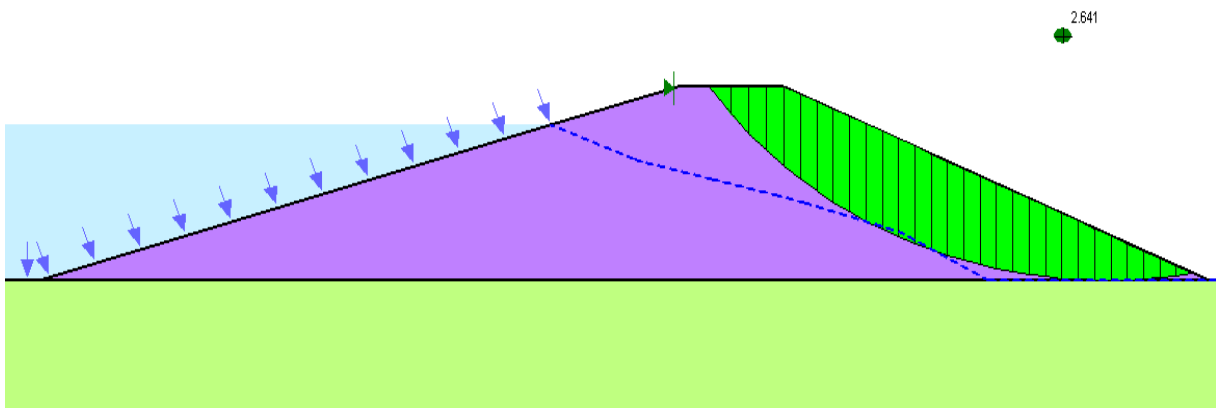


Figura 3.6 c) Solución computacional programa GeoStudio 2007

3.1.3 Problemática N°3 Análisis de las filtraciones y estabilidad de taludes en cortina de presa de tierra.

A partir de los datos y la sección transversal de la presa de tierra homogénea mostrados en la Figura 3.7

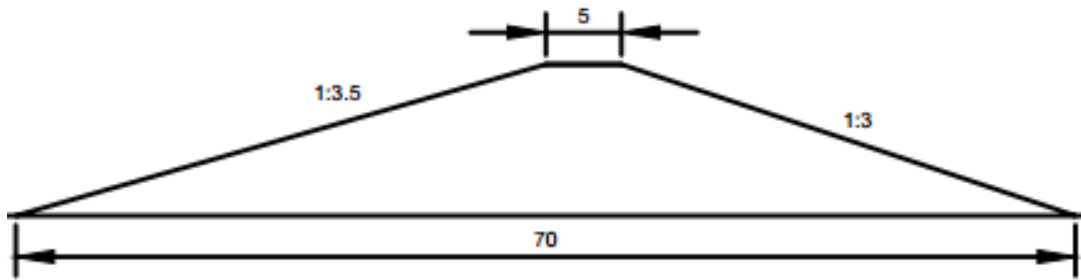


Figura 3.7 Sección transversal de la cortina de la presa.

Red de flujo según la solución computacional haciendo uso del programa GeoStudio 2007 Figura 3.8.

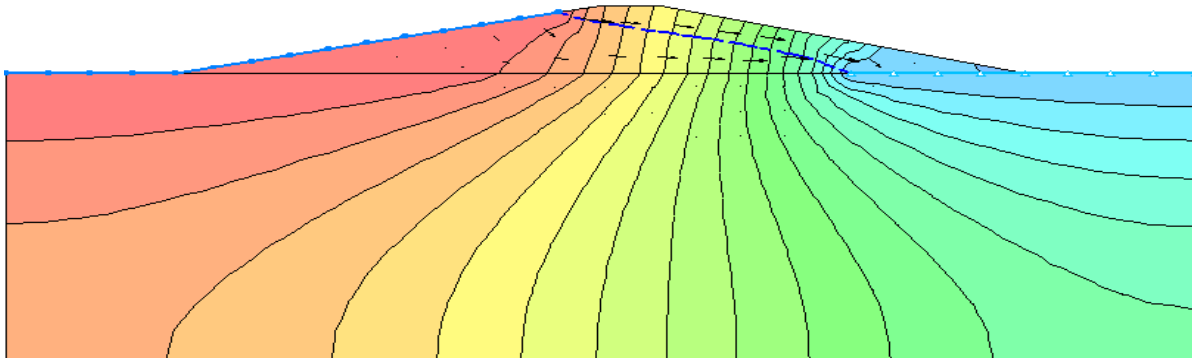


Figura 3.8 Red de flujo según programa computacional GeoStudio 2007

Solución computacional haciendo uso del programa GeoStudio 2007 con suelo de propiedades $c=20\text{Kpa}$ $\phi=20^\circ$ $\gamma=19\text{ Kn/m}^3$ Figura 3.9 a.

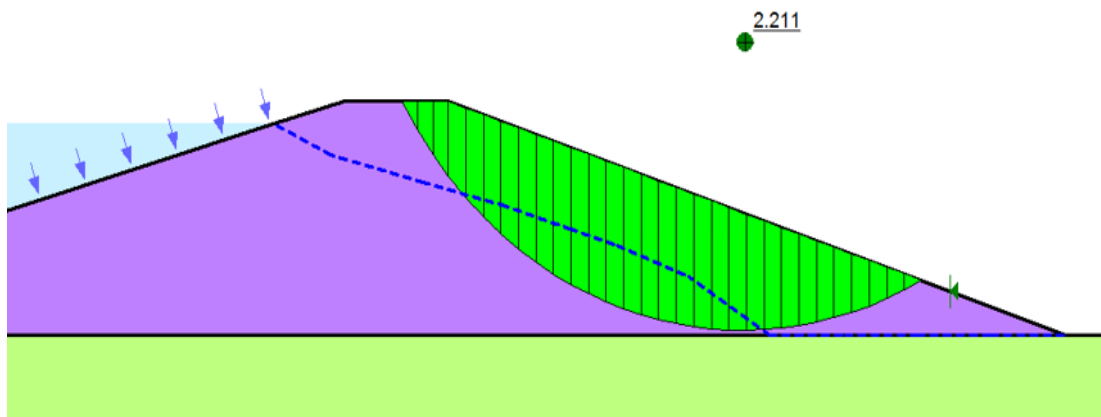


Figura 3.9 a) Solución computacional programa GeoStudio 2007

Solución computacional haciendo uso del programa GeoStudio 2007 con suelo de propiedades $c=25\text{Kpa}$ $\phi=25^\circ$ $\gamma=19\text{ Kn/m}^3$ Figura 3.9 b.

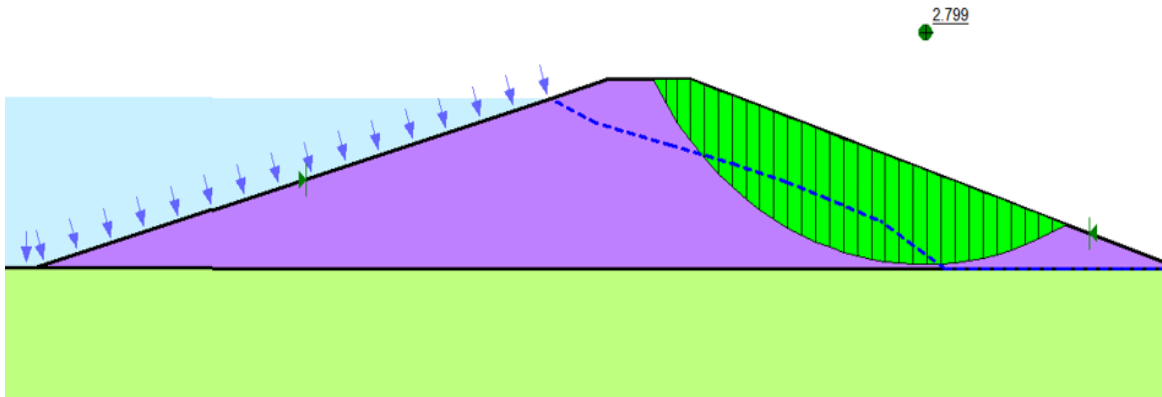


Figura 3.9 b) Solución computacional programa GeoStudio 2007

Solución computacional haciendo uso del programa GeoStudio 2007 con suelo de propiedades $c=30\text{Kpa}$ $\phi=30^\circ$ $\gamma=19\text{ Kn/m}^3$ Figura 3.9 c.

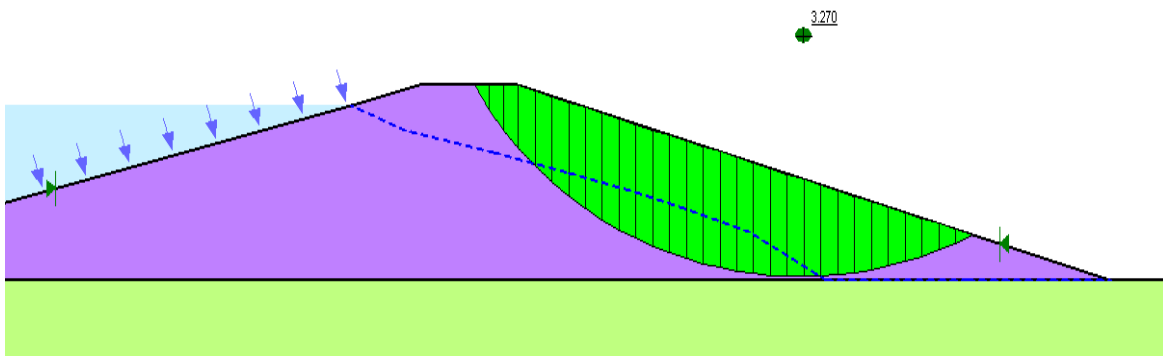


Figura 3.9 c) Solución computacional programa GeoStudio 2007

3.2 Análisis de problemáticas de filtraciones y estabilidad de taludes en presas de tierra con alturas de 25 m.

3.2.1 Problemática N°4 Análisis de las filtraciones y estabilidad de taludes en cortina de presa de tierra.

A partir de los datos y la sección transversal de la presa de tierra homogénea mostrados en la figura 3.10

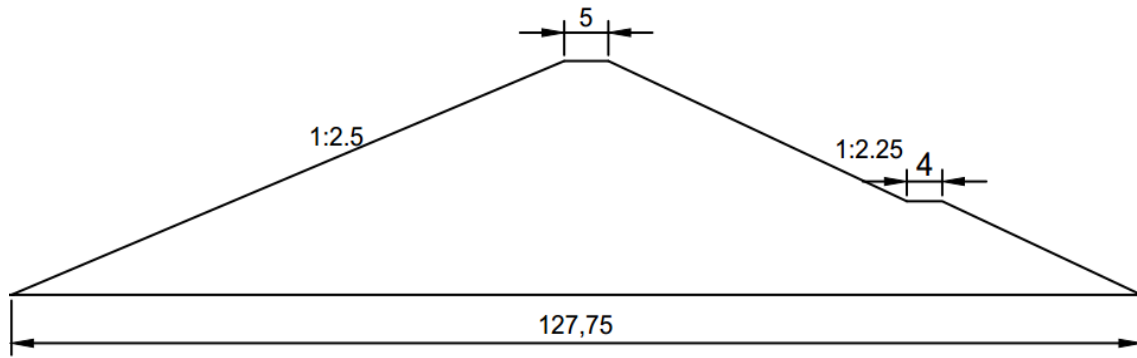


Figura 3.10 Sección transversal de la cortina de la presa.

Red de flujo según la solución computacional haciendo uso del programa GeoStudio 2007 Figura 3.11.

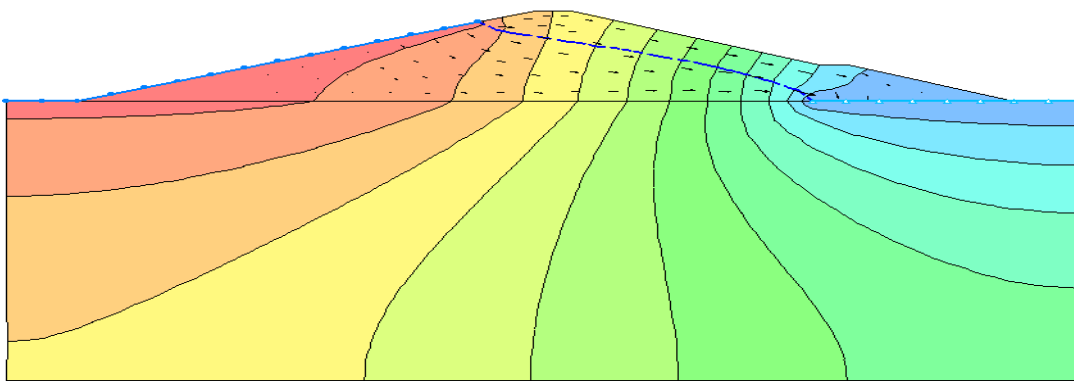


Figura 3.11 Red de flujo según programa computacional GeoStudio 2007

Solución computacional haciendo uso del programa GeoStudio 2007 con suelo de propiedades $c=20\text{Kpa}$ $\phi=20^\circ$ $\gamma=19\text{ Kn/m}^3$ Figura 3.12 a.

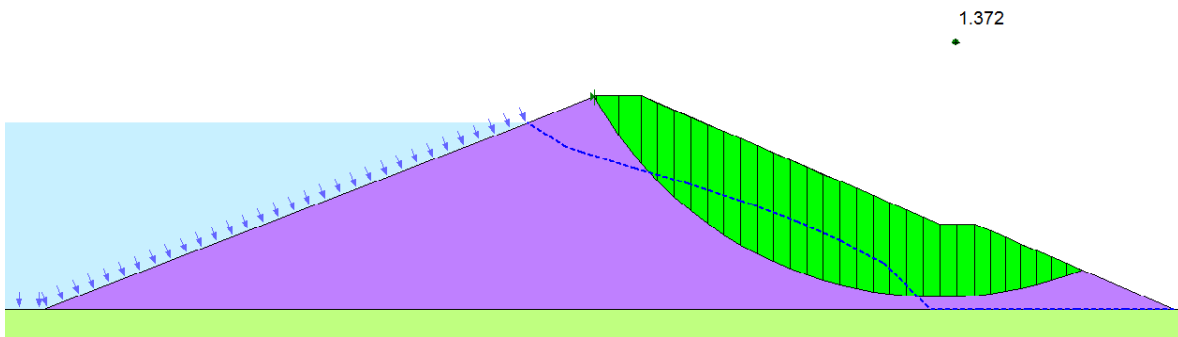


Figura 3.12 a) Solución computacional programa GeoStudio 2007

Solución computacional haciendo uso del programa GeoStudio 2007 con suelo de propiedades $c=25\text{Kpa}$ $\phi=25^\circ$ $\gamma=19 \text{ Kn/m}^3$ Figura 3.12 b.

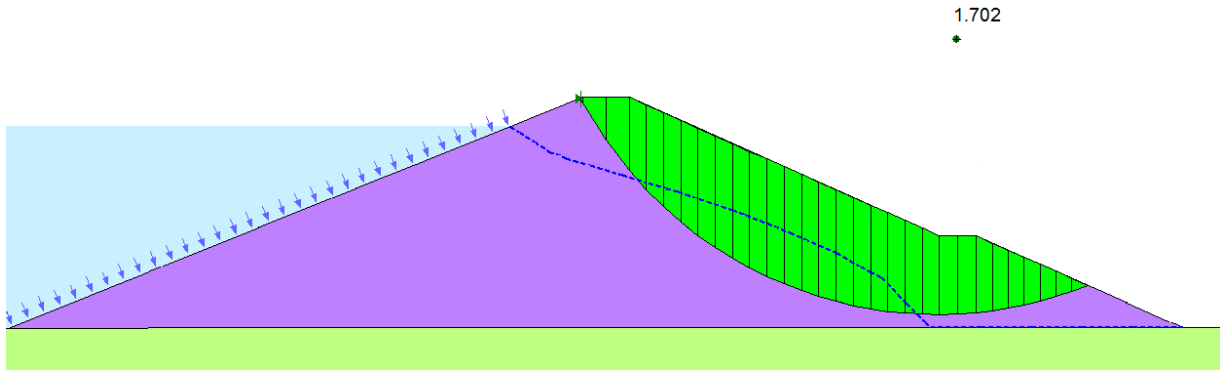


Figura 3.12 b) Solución computacional programa GeoStudio 2007

Solución computacional haciendo uso del programa GeoStudio 2007 con suelo de propiedades $c=30\text{Kpa}$ $\phi=30^\circ$ $\gamma=19 \text{ Kn/m}^3$ Figura 3.12 c.

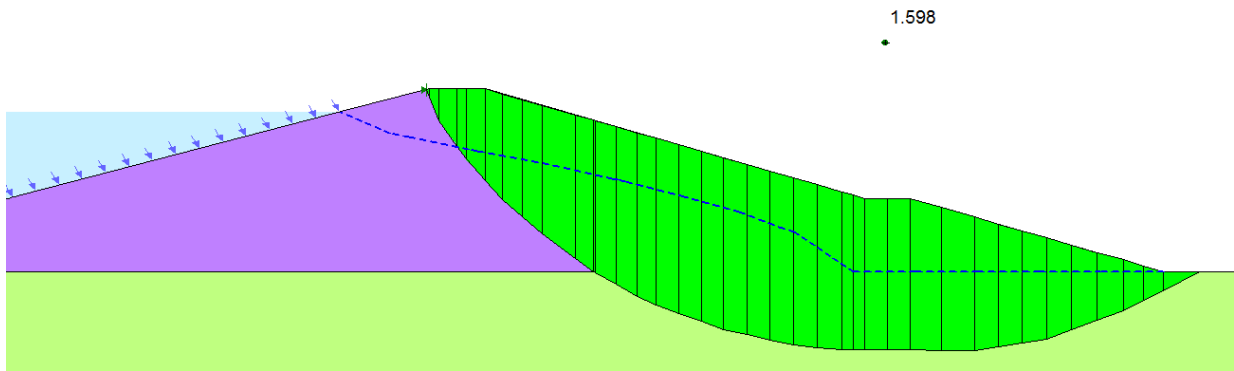


Figura 3.12 c) Solución computacional programa GeoStudio 2007

3.2.2 Problemática N°5 Análisis de las filtraciones y estabilidad de taludes en cortina de presa de tierra.

A partir de los datos y la sección transversal de la presa de tierra homogénea mostrados en la figura 3.13

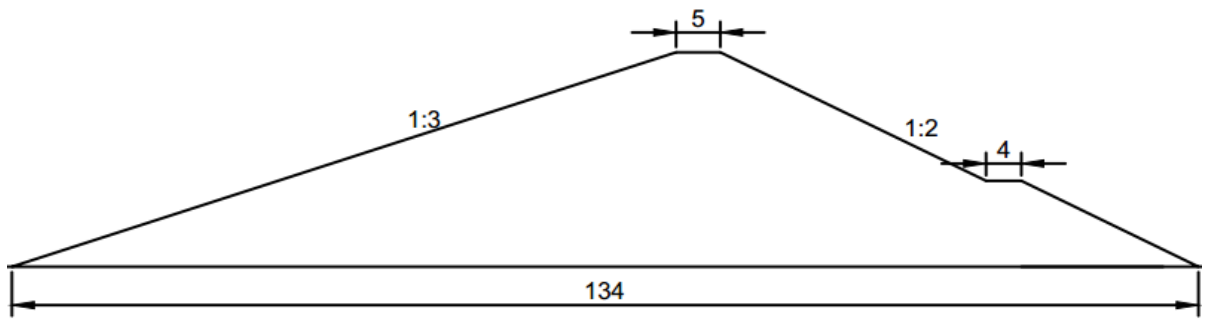


Figura 3.13 Sección transversal de la cortina de la presa.

Red de flujo según la solución computacional haciendo uso del programa GeoStudio 2007 Figura 3.14

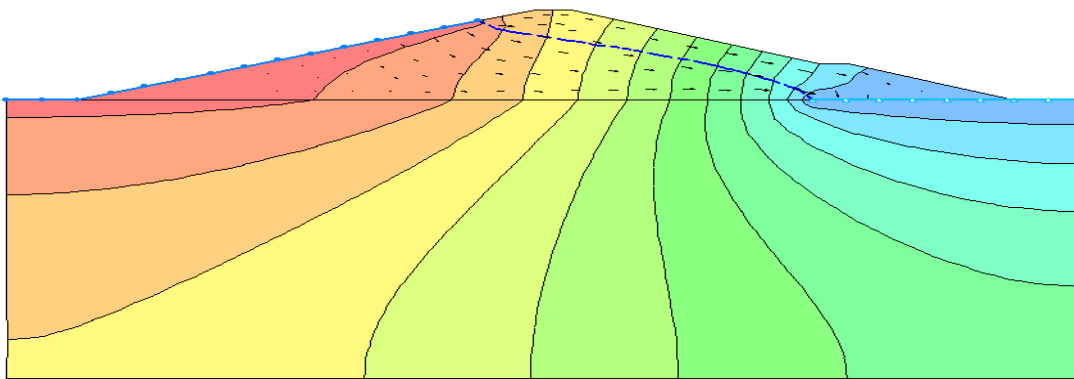


Figura 3.14 Red de flujo según programa computacional GeoStudio 2007

Solución computacional haciendo uso del programa GeoStudio 2007 con suelo de propiedades $c=20\text{Kpa}$ $\phi=20^\circ$ $\gamma=19\text{ Kn/m}^3$ Figura 3.15 a.

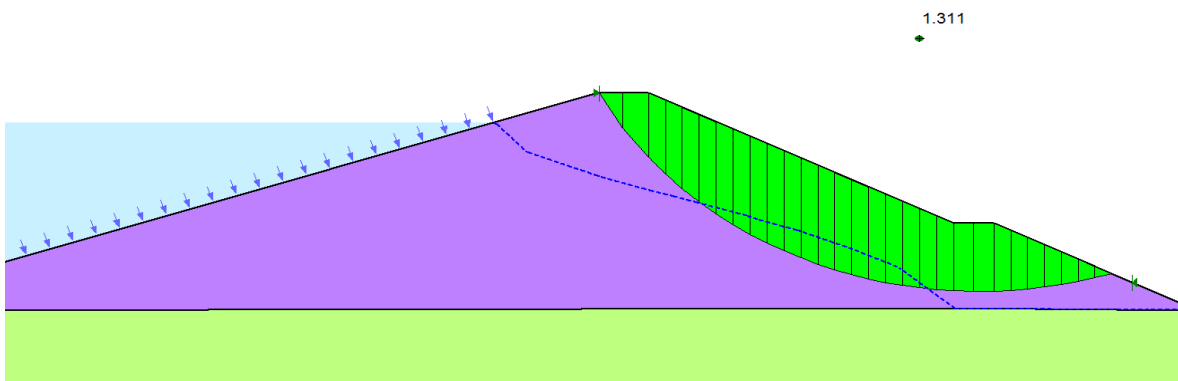


Figura 3.15 a) Solución computacional programa GeoStudio 2007

Solución computacional haciendo uso del programa GeoStudio 2007 con suelo de propiedades $c=25\text{Kpa}$ $\phi=25^\circ$ $\gamma=19 \text{ Kn/m}^3$ Figura 3.15 b.

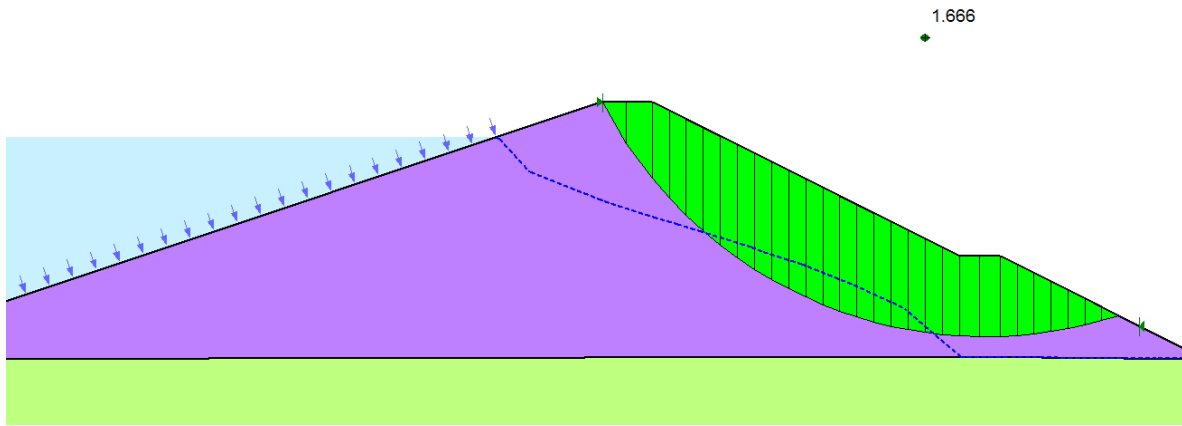


Figura 3.15 b) Solución computacional programa GeoStudio 2007

Solución computacional haciendo uso del programa GeoStudio 2007 con suelo de propiedades $c=30\text{Kpa}$ $\phi=30^\circ$ $\gamma=19 \text{ Kn/m}^3$ Figura 3.15 c.

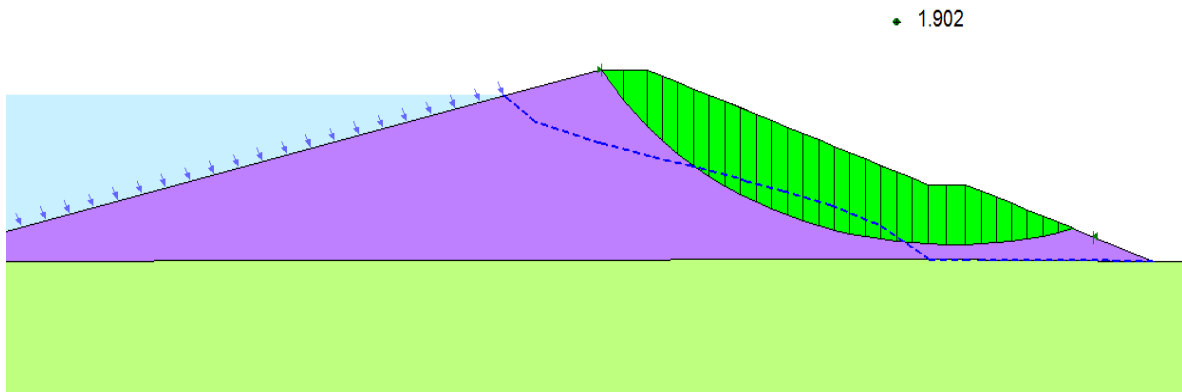


Figura 3.15 c) Solución computacional programa GeoStudio 2007

3.2.3 Problemática N°6 Análisis de las filtraciones y estabilidad de taludes en cortina de presa de tierra.

A partir de los datos y la sección transversal de la presa de tierra homogénea mostrados en la figura 3.16

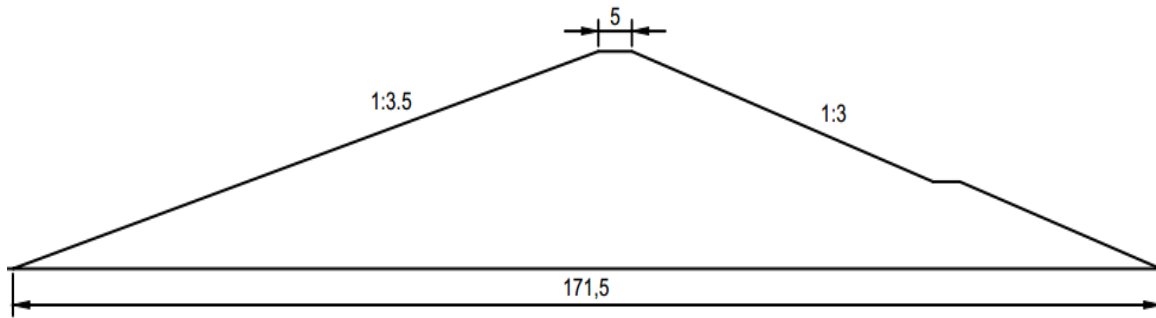


Figura 3.16 Sección transversal de la cortina de la presa.

Red de flujo según la solución computacional haciendo uso del programa GeoStudio 2007 Figura 3.17.

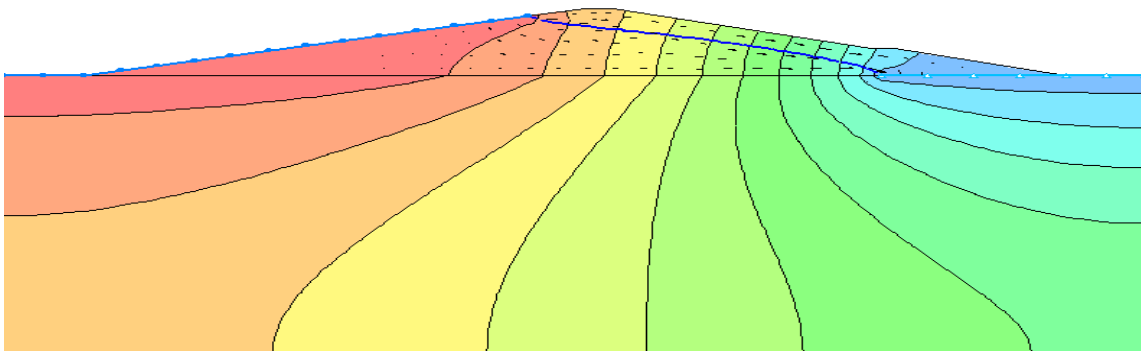


Figura 3.17 Red de flujo según programa computacional GeoStudio 2007
Solución computacional haciendo uso del programa GeoStudio 2007 con suelo de propiedades $c=20\text{Kpa}$ $\phi=20^\circ$ $\gamma=19\text{ Kn/m}^3$ Figura 3.18 a.

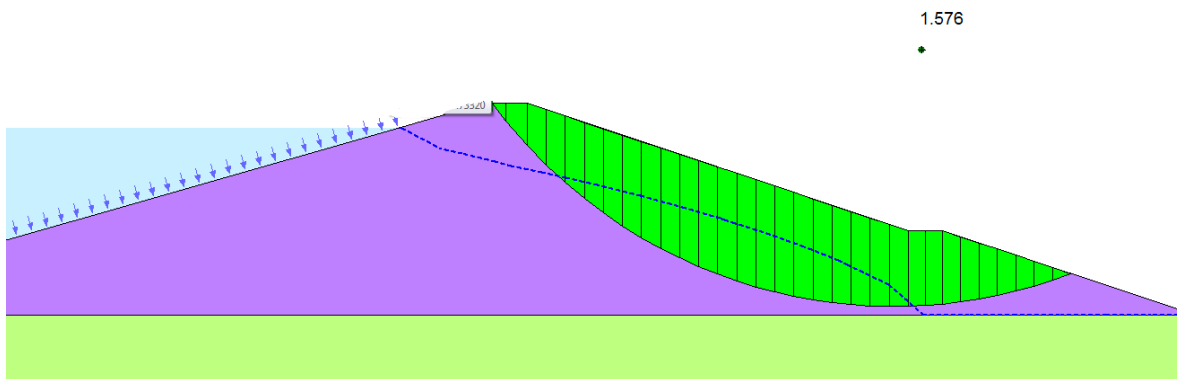


Figura 3.18 a) Solución computacional programa GeoStudio 2007

Solución computacional haciendo uso del programa GeoStudio 2007 con suelo de propiedades $c=25\text{Kpa}$ $\phi=25^\circ$ $\gamma=19\text{ Kn/m}^3$ Figura 3.18 b.

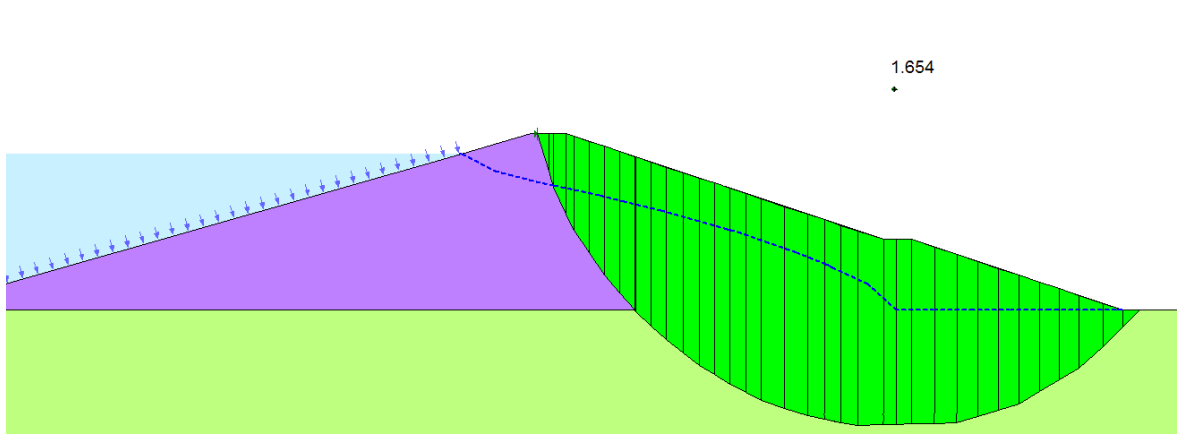


Figura 3.18 b) Solución computacional programa GeoStudio 2007

Solución computacional haciendo uso del programa GeoStudio 2007 con suelo de propiedades $c=30\text{Kpa}$ $\phi=30^\circ$ $\gamma=19\text{Kn/m}^3$ Figura 3.18 c.

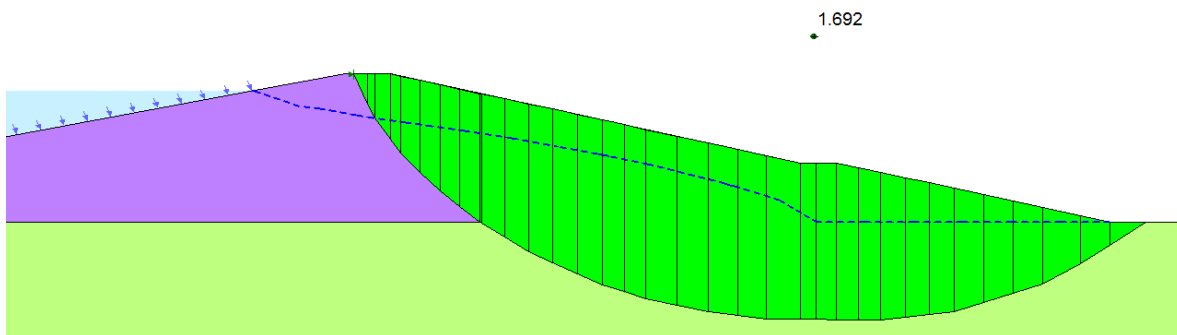


Figura 3.18 c) Solución computacional programa GeoStudio 2007

3.3 Análisis de problemáticas de filtraciones y estabilidad de taludes en presas de tierra con alturas de 40 m.

3.3.1 Problemática N°7 Análisis de las filtraciones y estabilidad de taludes en cortina de presa de tierra.

A partir de los datos y la sección transversal de la presa de tierra homogénea mostrados en la Figura 3.19

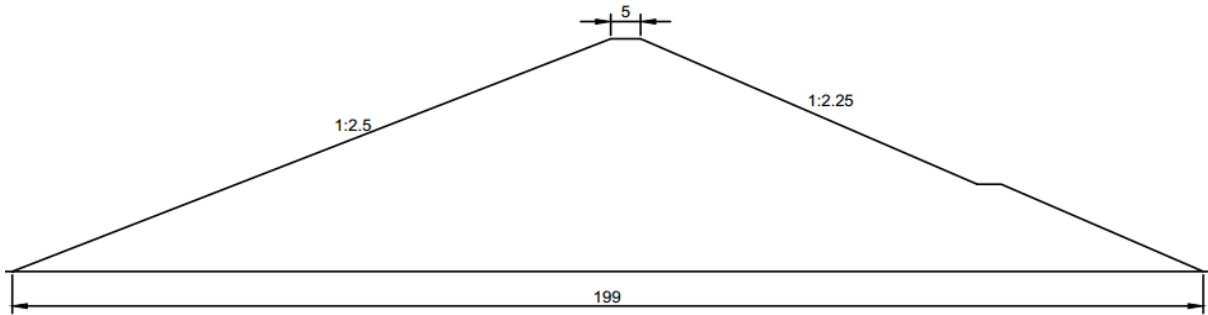


Figura 3.19 Sección transversal de la cortina de la presa.

Red de flujo según la solución computacional haciendo uso del programa GeoStudio 2007 Figura 3.20.

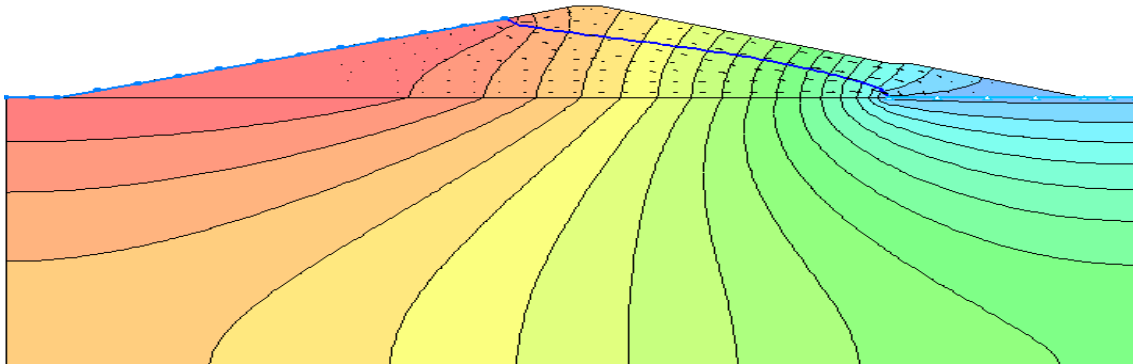


Figura 3.20 Red de flujo según programa computacional GeoStudio 2007

Solución computacional haciendo uso del programa GeoStudio 2007 con suelo de propiedades $c=20\text{Kpa}$ $\phi=20^\circ$ $\gamma=19\text{ Kn/m}^3$ Figura 3.21 a.

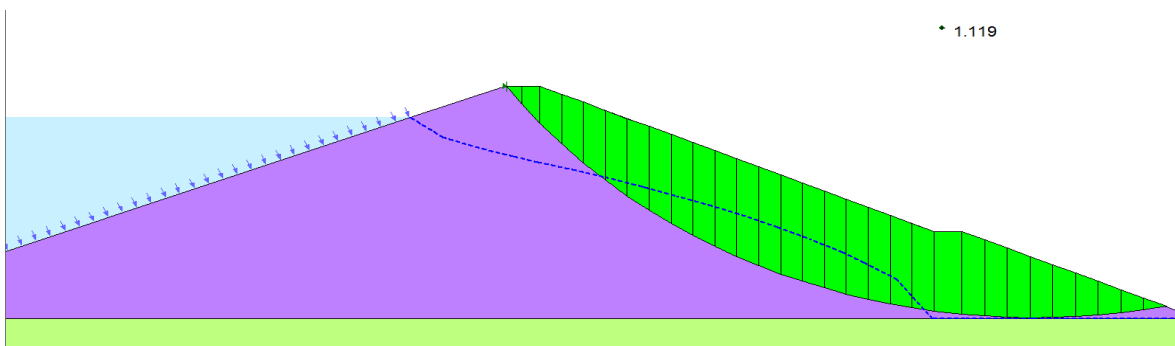


Figura 3.21 a) Solución computacional programa GeoStudio 2007

Solución computacional haciendo uso del programa GeoStudio 2007 con suelo de propiedades $c=25\text{Kpa}$ $\phi=25^\circ$ $\gamma=19\text{ Kn/m}^3$ Figura 3.21 b.

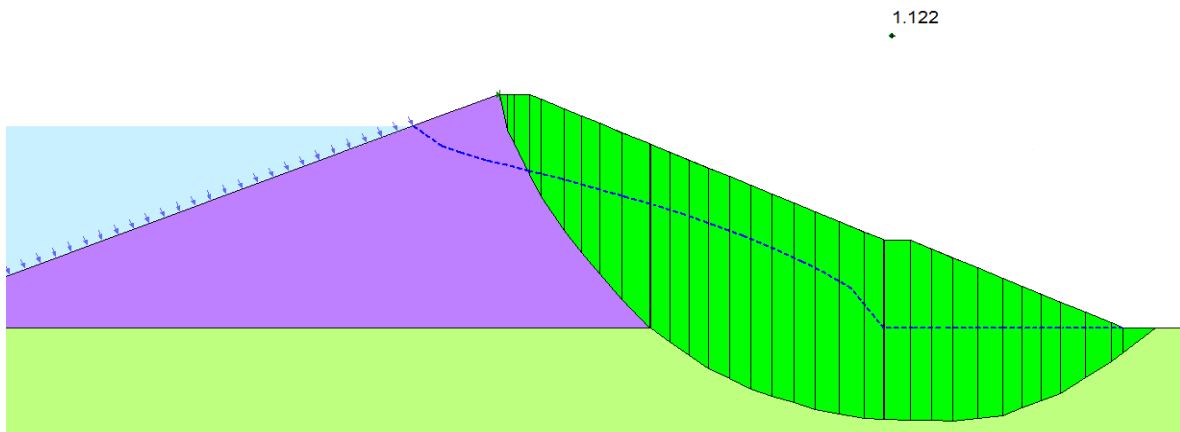


Figura 3.21 b. Solución computacional programa GeoStudio 2007

Solución computacional haciendo uso del programa GeoStudio 2007 con suelo de propiedades $c=30\text{Kpa}$ $\phi=30^\circ$ $\gamma=19\text{ Kn/m}^3$ Figura 3.21 c.

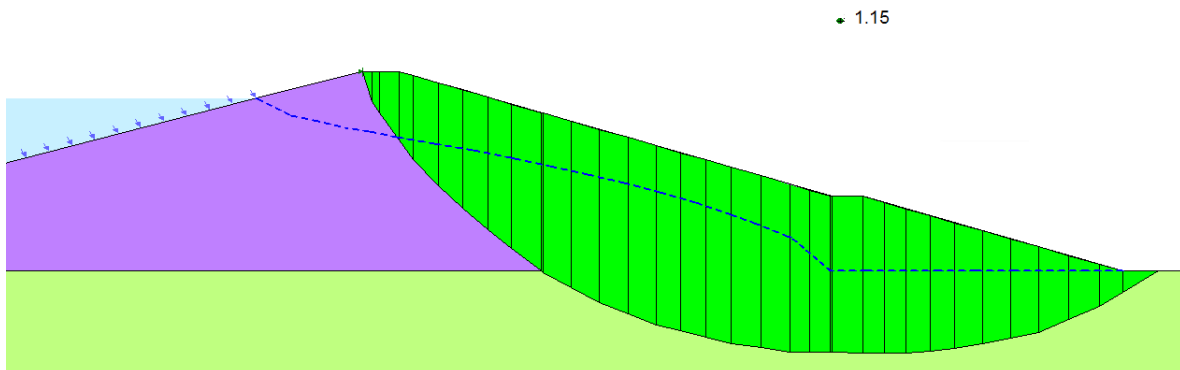


Figura 3.21 c) Solución computacional programa GeoStudio 2007

3.3.2 Problemática N°8 Análisis de las filtraciones y estabilidad de taludes en cortina de presa de tierra.

A partir de los datos y la sección transversal de la presa de tierra homogénea mostrados en la figura 3.22

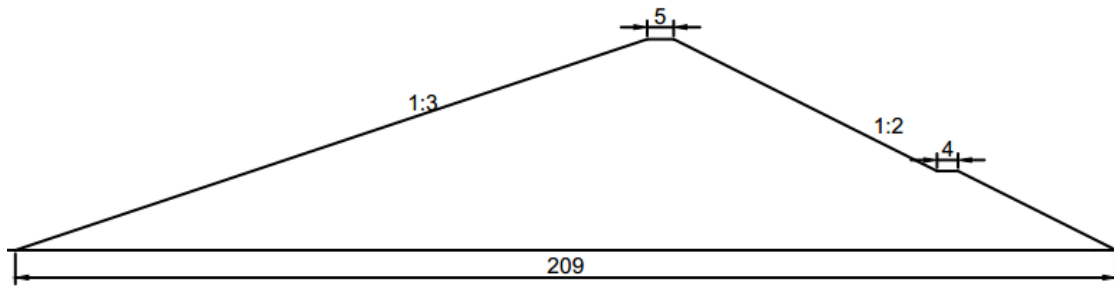


Figura 3.22 Sección transversal de la cortina de la presa.

Red de flujo según la solución computacional haciendo uso del programa GeoStudio 2007 Figura 3.23.

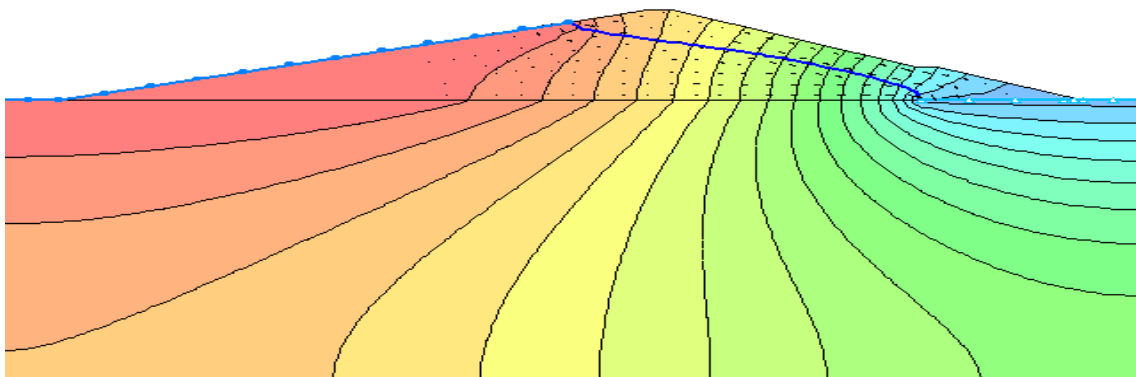


Figura 3.23 Red de flujo según programa computacional GeoStudio 2007

Solución computacional haciendo uso del programa GeoStudio 2007 con suelo de propiedades $c=20\text{Kpa}$ $\phi=20^\circ$ $\gamma=19\text{ Kn/m}^3$ Figura 3.24 a.

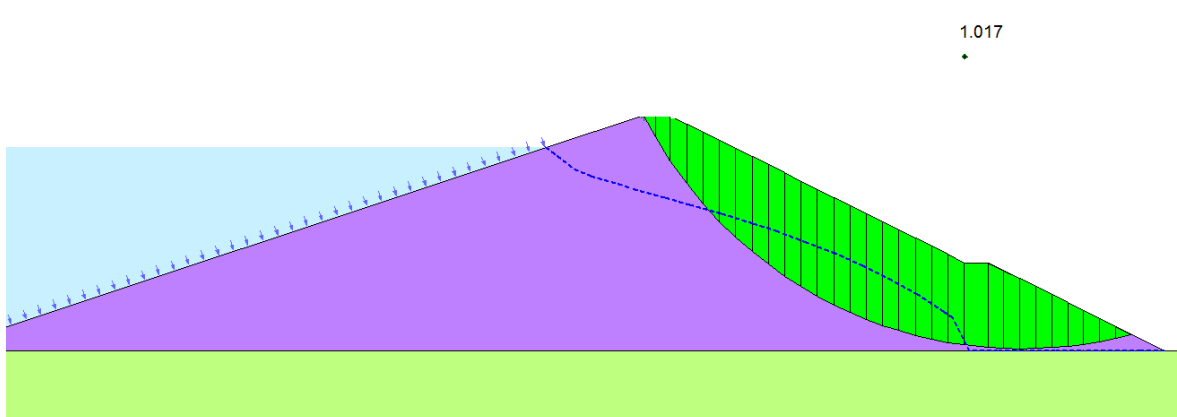


Figura 3.24 a) Solución computacional programa GeoStudio 2007

Solución computacional haciendo uso del programa GeoStudio 2007 con suelo de propiedades $c=25\text{Kpa}$ $\phi=25^\circ$ $\gamma=19\text{ Kn/m}^3$ Figura 3.24 b.

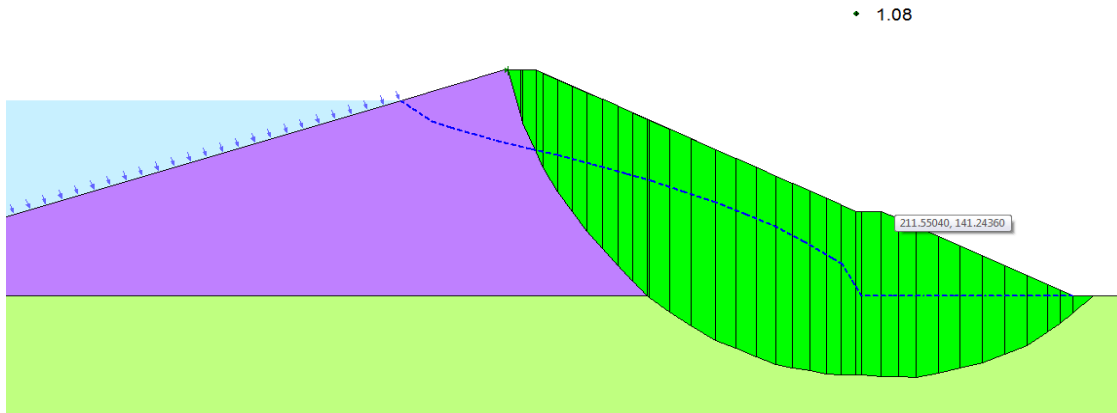


Figura 3.24 b) Solución computacional programa GeoStudio 2007

Solución computacional haciendo uso del programa GeoStudio 2007 con suelo de propiedades $c=30\text{Kpa}$ $\phi=30^\circ$ $\gamma=19\text{ Kn/m}^3$ Figura 3.24 c.

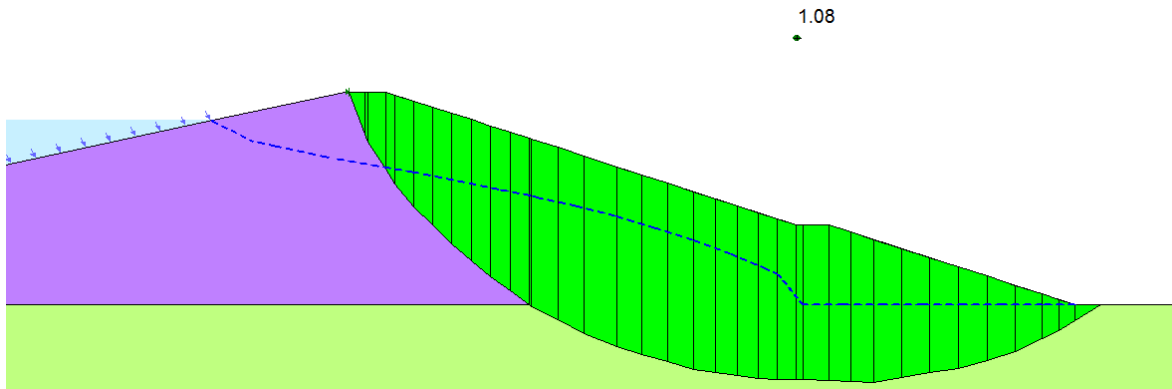


Figura 3.24 c) Solución computacional programa GeoStudio 2007

3.3.3 Problemática N°9 Análisis de las filtraciones y estabilidad de taludes en cortina de presa de tierra.

A partir de los datos y la sección transversal de la presa de tierra homogénea mostrados en la Figura 3.25

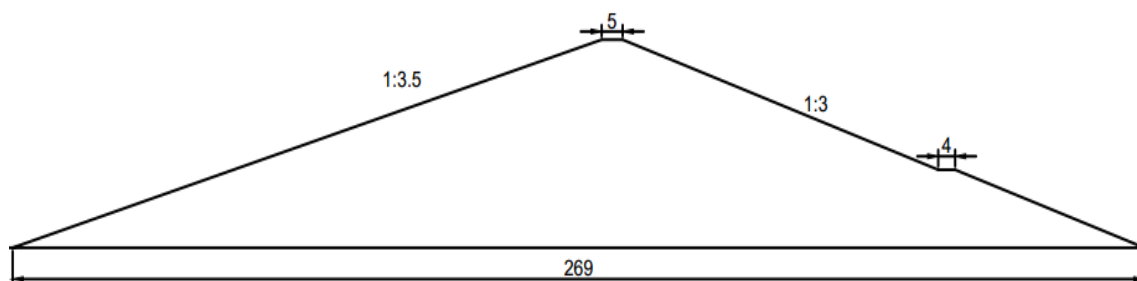


Figura 3.25 Sección transversal de la cortina de la presa.

Red de flujo según la solución computacional haciendo uso del programa GeoStudio 2007 Figura 3.26.

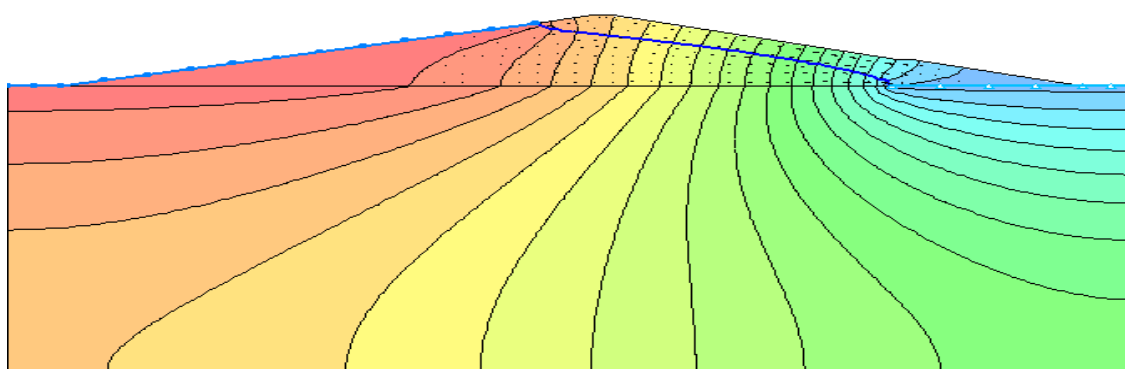


Figura 3.26 Red de flujo según programa computacional GeoStudio 2007

Solución computacional haciendo uso del programa GeoStudio 2007 con suelo de propiedades $c=20\text{Kpa}$ $\phi=20^\circ$ $\gamma=19\text{ Kn/m}^3$ Figura 3.27 a.

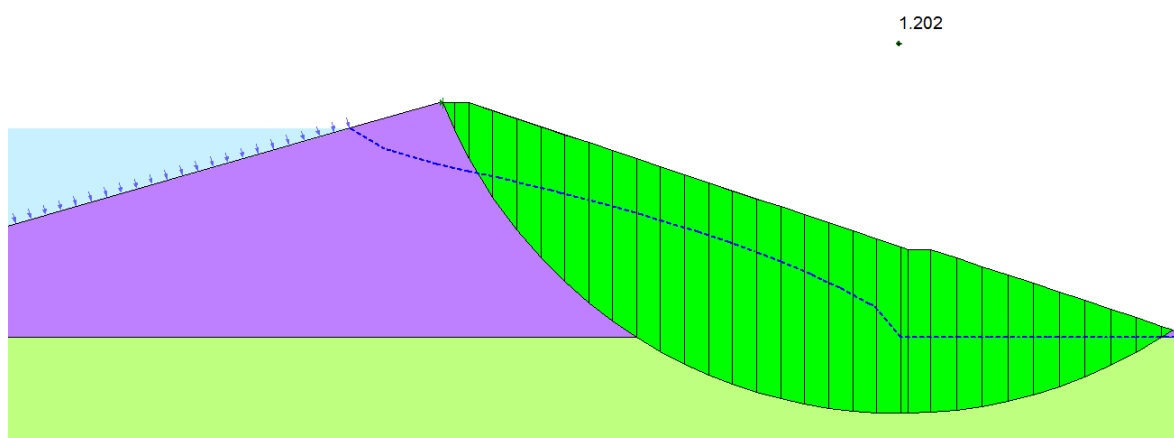


Figura 3.27 a) Solución computacional programa GeoStudio 2007

Solución computacional haciendo uso del programa GeoStudio 2007 con suelo de propiedades $c=25\text{Kpa}$ $\phi=25^\circ$ $\gamma=19\text{ Kn/m}^3$ Figura 3.27 b.

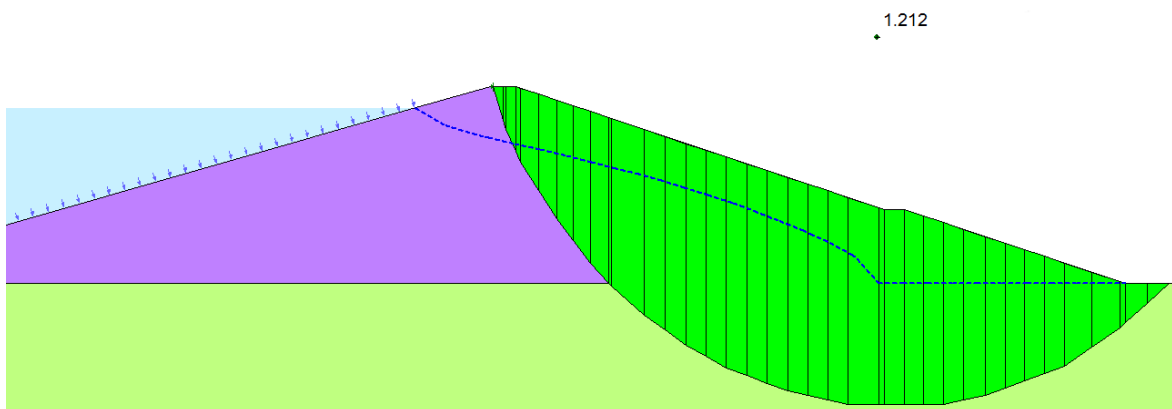


Figura 3.27 b) Solución computacional programa GeoStudio 2007

Solución computacional haciendo uso del programa GeoStudio 2007 con suelo de propiedades $c=30\text{Kpa}$ $\phi=30^\circ$ $\gamma=19\text{Kn/m}^3$ Figura 3.27 c.

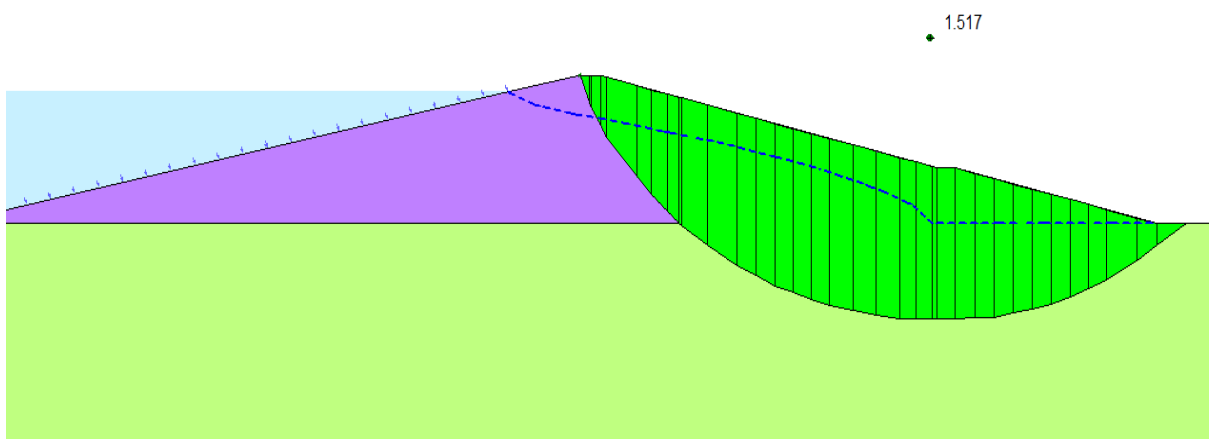


Figura 3.27 c) Solución computacional programa GeoStudio 2007

3.4 Propuesta de parámetros de diseño.

3.4.1 Representación gráfica de los resultados obtenidos.

Después de obtener y analizar los resultados obtenidos en el programa GeoStudio 2007 se pueden resumir los mismos en forma de gráfico para así poder compararlos y proponer parámetros de diseños de presas de tierra en Cuba.

La figura 3.7 muestra los valores de factor de seguridad obtenidos para alturas de 10m, 25m y 40m, para los tres pares de pendientes analizadas y a su vez para los tres tipos de suelos.

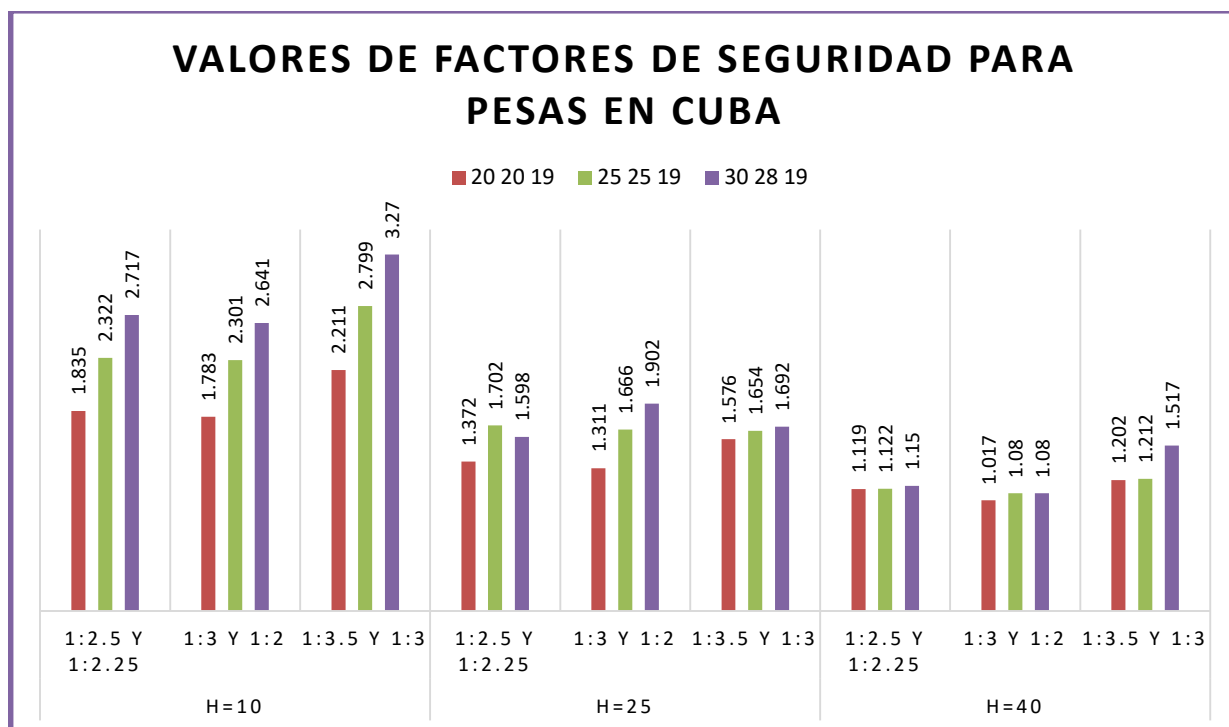


Figura 3.7 Análisis grafico de los valores de Factor de Seguridad obtenidos para las distintas condiciones.

En la Figura 3.8 aparece una relación entre los valores de factores de seguridad asociado a cada propuesta de pendientes de taludes para las tres condiciones de suelo analizadas para secciones de cortinas de presas de tierra de 10m de altura, apreciando así que para suelos más resistentes y pendientes más tendidas el valor de factor de seguridad es mayor

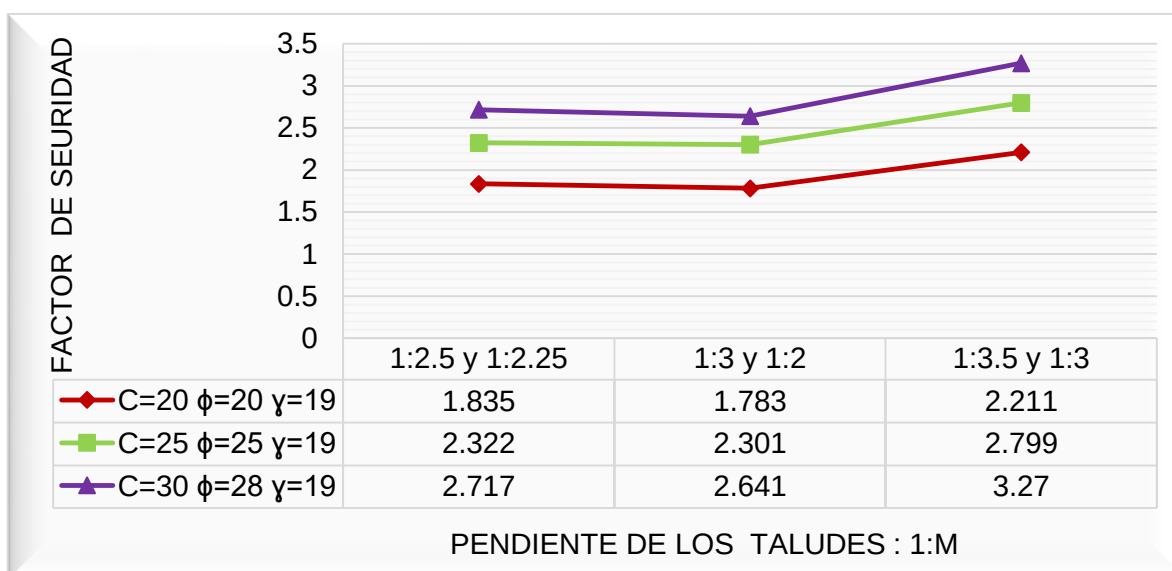


Figura 3.8 Valores de factores de seguridad para cada pendiente de talud 1:m para las tres condiciones de suelos analizadas y altura de la cortina 10m.

La Figura 3.9 muestra una relación entre los valores de factores de seguridad asociado a cada propuesta de pendientes de taludes para las tres condiciones de suelo analizadas para secciones de cortinas de presas de tierra de 25m de altura, apreciando así que el mayor factor de seguridad se alcanza para suelos más resistentes y pendiente aguas arriba 1:3 y aguas abajo 1:2.

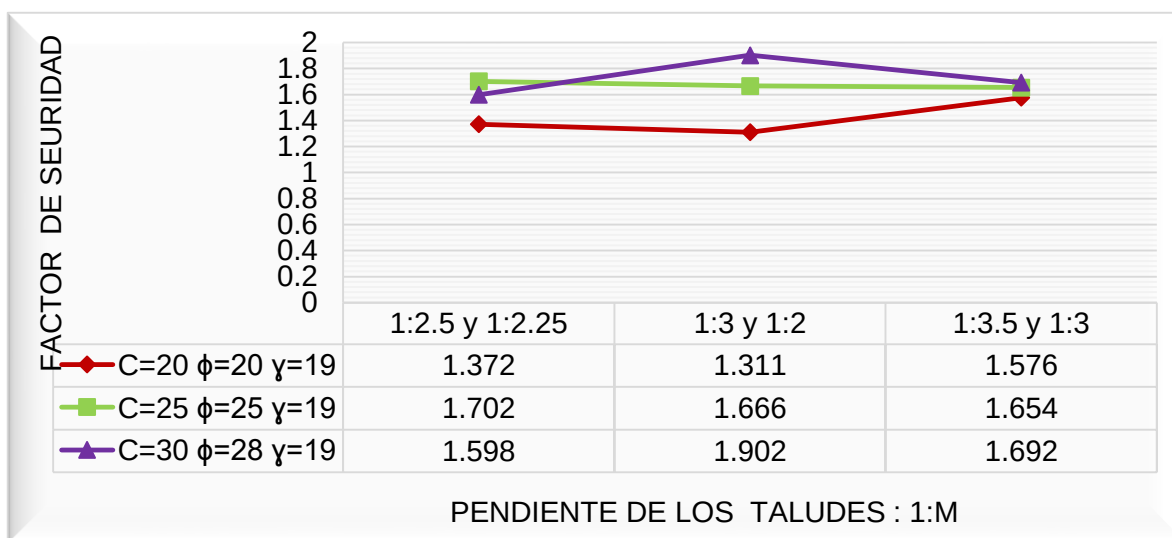


Figura 3.9 Valores de factores de seguridad para cada pendiente de talud 1:m para las tres condiciones de suelos analizadas y altura de la cortina 25m

La Figura 3.10 muestra una relación entre los valores de factores de seguridad asociado a cada propuesta de pendientes de taludes para las tres condiciones de suelo analizadas para secciones de cortinas de presas de tierra de 40m de altura, apreciando así que para presas de mayor altura los valores de factor de seguridad disminuyen y obteniendo el mayor valor de factor de seguridad para inclinaciones de los taludes 1:3.5 aguas arriba y 1:3 aguas abajo para suelos más cohesivos y friccionales.

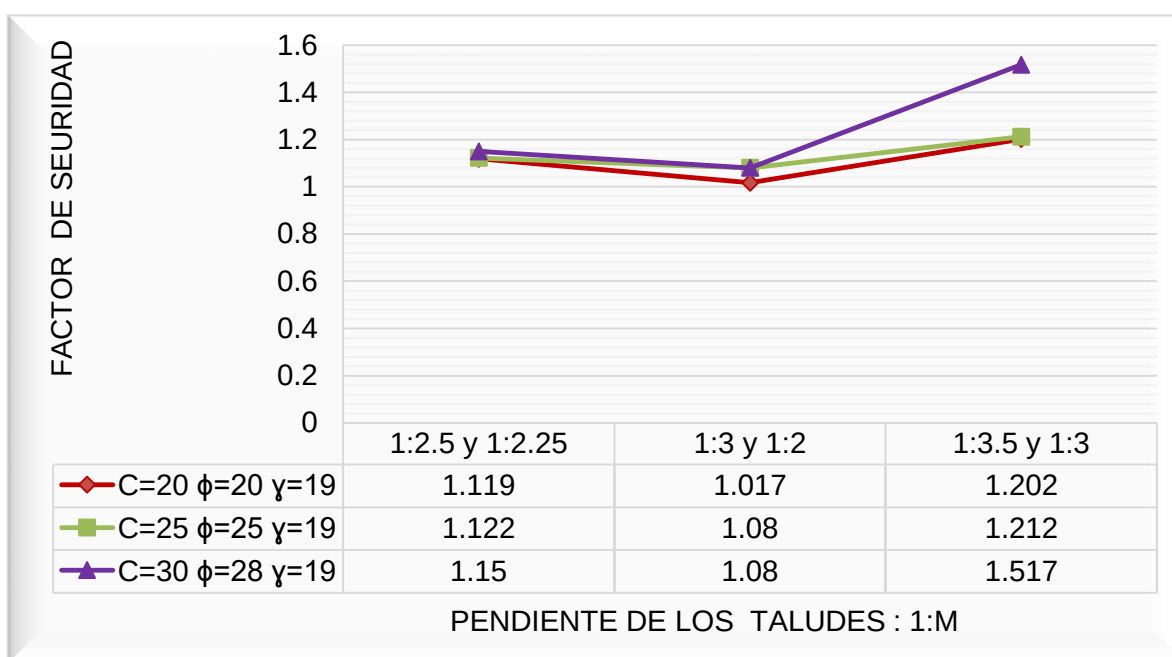


Figura 3.9 Valores de factores de seguridad para cada pendiente de talud 1:m para las tres condiciones de suelos analizadas y altura de la cortina 40m.

3.4.2 Propuesta de Parámetros de diseño

Según los resultados obtenidos se proponen los siguientes parámetros de diseño para presas de tierra Homogéneas y con dren de colchón para las condiciones de Cuba, atendiendo a alturas de 10m, 25m y 40m respectivamente para tres condiciones de suelos que van desde suelos menos cohesivos y friccionales hasta más cohesivos y friccionales y para tres pares de taludes desde el menos tendido hasta el más tendido Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Parámetros de diseño para presas de tierra en Cuba.

H=10m		H=25m		H=40m	
Talud Aguas Arriba	Talud Aguas Abajo	Talud Aguas Arriba	Talud Aguas Abajo	Talud Aguas Arriba	Talud Aguas Abajo
1:2.5	1:2.25	1:2.5	1:2.25	1:3	1:3
1:3	1:2	1:3	1:2		
1:3.5	1:3	1:3.5	1:3		

Para el caso de alturas de 10m y 25m se recomienda cualesquiera de los pares de taludes propuestos, aunque teniendo en cuenta el renglón económico se recomiendan las pendientes menos tendidas.

Conclusiones

- 1) El análisis realizado sobre conceptos principales, evolución histórica e importancia de los estudios de estabilidad de taludes y filtración en presas de tierra evidenció que es un tema complejo y que toda la teoría desarrollada actualmente encuentra su apoyo en la evaluación de métodos computacionales.
- 2) El estudio realizado a los doce embalses seleccionados del país aportó las características principales de los mismos; la altura de la cortina se encuentra entre 10 m y 40 m, las pendientes del talud aguas arriba van de 1:2.5 a 1:3.5 y el talud aguas abajo 1:2 a 1:3 y los drenajes de colchón y de prisma, lo que permitió realizar un estudio más real para las condiciones de Cuba.
- 3) En el trabajo se resolvieron nueve problemáticas, cada una de ella para tres suelos con propiedades mecánicas diferentes $c=20\text{Kpa}$ $\phi= 20^\circ$ y $\gamma=19 \text{ Kn/m}^3$, $c=25\text{Kpa}$ $\phi= 25^\circ$ y $\gamma=19 \text{ Kn/m}^3$ y $c=30\text{Kpa}$ $\phi= 28^\circ$ y $\gamma=19 \text{ Kn/m}^3$ lo que ha permitido obtener valores del factor de seguridad menores para los suelos menos cohesivos y friccionales y más altas para los más cohesivos y friccionales aplicando el programa GeoStudio 2007.
- 4) Para las condiciones de Cuba se propusieron criterios de diseño a partir de los resultados obtenidos del programa en correspondencia con la altura y las pendientes de los taludes aguas arriba y aguas abajo con drenaje de colchón en presas homogéneas, para altura de la cortina de 10m y 25m se recomiendan pendientes 1:2.5 y 1:2.25, 1:3 y 1:2 y 1:3.5 y 1:3, para altura de la cortina de 40m solo es recomendable usar pendientes 1:3.5 y 1:3.

Recomendaciones

Dar continuidad al trabajo considerando otros parámetros de diseño, realizar el estudio para secciones heterogéneas y para otros tipos de drenajes.

Bibliografía

- AGUIAR HERNÁNDEZ, A. A. 2016. Evaluación Dinámica del Talud Aguas Abajo de la Presa Zaza.
- ARMAS NOVOA, R. 2002. Criterios para diseñar presas de tierra. Prioridad y secuencia. .
- ARMAS NOVOA, R. H. M., EVELIO 1987. *Presas de Tierra*.
- CONSEJO DE LA ADMINISTRACIÓN PROVINCIAL, C. D. L. H. R. D. C. 2004. Soluciones aplicadas para el almacenamiento de agua,VI Asamblea General Mundial de RIOB Martinica.
- CORDERO MEJIAS, L. 2017. “Análisis de filtraciones y estabilidad de taludes en presas de tierra para suelos parcialmente saturados”.
- EDUARDO, E. D. C. 2013. Análisis comparativo entre los métodos de estabilidad de taludes aplicados a las presas de tierra del Proyecto PACALORI.
- FLORES BERENGUER, I. 2016. Análisis de la estabilidad de taludes en presas de tierra para suelos parcialmente saturados Caso de estudio: Formación Vía Blanca.
- ING. WASHINGTON SANDOVAL E., P. D. 2016 PRESAS DE TIERRA Y ENROCAMIENTO
- PLAVECINO RAMOS, A. E. 2015. Modelación bidimensional del flujo generado por la rotura de una presa de tierra, utilizando el programa IBER.
- QUEVEDO SOTOLONGO, G. J. 2017. "Conferencias de la asignatura presas de tierra".
- SUAREZ, J. 2009. Deslizamientos: Análisis Geotécnico.
- VELÁZQUEZ SENTMANAT, A. 2016. Análisis de las filtraciones y la estabilidad de taludes en presas de tierra.
- SHERARD, J. L. 1953. Influence of Soil. Properties and Construction Methods on performance of Homegeneus Earth Dams, U.S.
- AHEDO DESENA, A. 2003. Estabilidad de taludes en presas de tierras y enrocamiento.

ALEJANDRO TORRES, N. 2010. Filtraciones.

ALEJANDRO., C. V. A. H. A. E. J. 2014. Análisis comparativo en la reducción del gasto de filtración y el gradiente hidráulico entre las pantallas contra filtración y la geomembrana en presas de tierra homogénea.

ÁLVAREZ GIL, L. 1998. La estabilidad de las cortinas de presas de tierra mediante la solución de los estados tenso-deformacionales y la aplicación de la teoría de la seguridad.

ANABELA VEIGA, L. 2006. Estabilidad de Taludes.

ANGELONE, S. 2010. Geología y Geotecnia. Filtraciones.

ANTONIO, S. 1994. Curso de mecánica del suelo y cimentaciones. Estabilidad de taludes: Métodos para Rebanadas.

ASHFORD, S. S., N 1994. Seismic response of steep natural slopes.

BACH. CHALÁN CHÁVEZ, A. M. B. G. P., KEVIN ELI. 2014. Evaluación y análisis de la estabilidad de la presa Garrapón del centro poblado Garrapón-Ascope-la libertad.

BALAIRÓN, L., LÓPEZ, D., MORÁN, R., RAMOS, T. Y TOLEDO, M.A 2014. Avances en investigación aplicada mediante modelación física y numérica en el diseño de la ingeniería de presas.

BENKO, B. S., D 1993. The characterization and prediction of landslide movements using numerical modelling techniques.

BRIONES GUTIÉRREZ, J. 2011. "Red de flujos en secciones típicas de presas de tierra homogéneas".

BROCHE LORENZO, J. L. 2005. Conferencia de modelación de estructuras.

C. TAPIA, E. O., A. LARESE. 2009. Análisis numérico del proceso de filtración en presas de escollera.

CANDELA, J. 2008. Sistemas de Estabilización de Taludes y Laderas.

CARTER, J., DESAI, C., POTTS, D., SCHWEIGER, H. & SLOAN, S 2001. Computing and Computer Modelling in Geotechnical Engineering.

CHACÓN VILLA, Á. H. 2014. Análisis comparativo en la reducción del gasto de filtración y el gradiente hidráulico entre las pantallas contra filtración y la geomembrana en presas de tierra homogénea.

CLOUGH, R. & WOODWARD, R. 1967. Analysis of Embankment Stresses and deformations. Journal of geotechnical division.

CRISTIAN, T. N. 2009. "Análisis numérico del proceso de filtración en presas de escollera"

DE MATTEIS, Á. F. 2003. Estabilidad de taludes.

DEPARTMENT OF THE ARMY, U. S. A. C. O. E. W., DC 20314-1000 1970. Engineering and Design, Stability of Earth and Rock-Fill Dams, (Inclusive of Change 1).

E., B. G. J. 2016. Presas de tierra sobre cimentaciones blandas. seguridad a la falla por filtración.

ENRIQUE, T. B. L. 2013. Proyecto de graduación previo a la obtención del grado de Ingeniero Civil.

ESPINOZA DURÁN CARLOS EDUARDO, T. B. L. E. 2013. Análisis comparativo entre los métodos de estabilidad de taludes aplicados a las presas de tierra del Proyecto PACALORI. Proyecto de graduación previo a la obtención del grado de Ingeniero Civil, UNIVERSIDAD DE CUENCA.

ESTELA E. REYNA, S. M. R. 2012. Modelos analíticos y numéricos para la determinación de infiltración en presas de material suelto. Análisis de su uso y sensibilidad.

ESTRADA RESTREPO, O. A. 2008. Presas de terraplén. Presas de tierra.

FELLENIOUS, B. H. 2006. Basics of foundation design.

FERNÁNDEZ VEDIA, R. 2015. Monografía presa de tierra enrocado

FLORES BERRONES, R. G. C. I. 2005. Avances recientes en el diseño de filtros para presas de tierra y enrocamiento.

GERMÁN, L. P. 2007. Introducción al uso del programa SLOPE/W 2007. Área de Mecánica de los Medios Continuos y Teoría de las estructuras.

GONZÁLEZ, L., FERRER, M., ORTUÑO, L. & OTEO, C. 2002. Ingeniería geológica, Madrid.

GONZÁLEZ VERGARA, C. J. & DUSSÁN BUITRAGO, E. I. 2011. Modelación del flujo en taludes para drenes horizontales. La Pontificia Universidad Javeriana.

HERNÁN, G. J. 2016. Parámetros geotécnicos y estabilidad de taludes.

HONG, H. & ROH, G. 2008. Reliability Evaluation of earth Slopes. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering.

J., B. G. 1994. Presas de Tierra y enrocamiento. Resistencia a la Falla por Filtración.

J.M., D. & G., W. S. 2005. Soil Strength and Slope Stability, Hoboken. New Jersey.

JORGE, B. G. 2016. Presas de Tierra sobre Cimentaciones Blandas. Seguridad a la Falla por Filtración.

JUÁREZ BADILLO, E., RICO RORÍGUEZ, A. 1967. Mecánica de Suelos; tomo II.

KERGUELEN, A. 2009. Análisis probabilístico de estabilidad de taludes.

KRAHN, J. 2004. Stability Modeling with slope/W an Engineering Methodology.

LINKS, L. B. D. L. A. R. C. 2002. Small dams, guidelines for design, construction and monitoring.

LÓPEZ PINEDA, G. 2010. Introducción a la modelación de redes de flujo mediante el uso del programa GeoStudio/SEEP 2007.

LÓPEZ PINEDA, G. 2010. Introducción al uso del programa GeoStudio/SLOPE 2007.

M, P., K, U. & A, T 2000. Linear versus Non-linear Failure envelopes in LEM and FEM slope stability Analysis.

MARTÍNEZ RODRÍGUEZ, A. 1995. Análisis de la seguridad de taludes.

PLAVECINO RAMOS, A. E. 2015. Modelación bidimensional del flujo generado por la rotura de una presa de tierra, utilizando el programa IBER.

QUEVEDO SOTOLONGO, G. 1994. Coeficiente de Seguridad. Estabilidad a corto y largo plazo. Fenómeno de inestabilidad de taludes. Cálculo de la estabilidad al deslizamiento.

R., F. B. 2000b. "Flujo de agua a través de suelos"

RAÚL, F. B. 2000a. Efecto del flujo de agua en la estabilidad de taludes.

S.A.C, C. M. L. C. 2005. Estudio de Estabilidad de Taludes del Tajo Lomo de Corvina- Mina Panchita.

SAN ROMAN P., N., DÍAZ P., T. & MARRERO A., O. 2008. Geología Cortina Presa "Alacranes. ". Santa Clara.

SHERARD, J. L., R.J. WOODWARD, S.F. GIZIENSKI, Y W. A. 1963. Clevenga, Earth and Earth-Rock Dams.

STEAD, D., EBERHARDT, E. & COGGAN, J. S. 2006. "Developments in the characterization of complex rock slope deformation and failure using numerical modelling techniques".

SUAREZ, J. 1998. Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales. In: BUCARAMANGA., E. U. (ed.).

SUAREZ, J. 2009. Deslizamientos: Análisis Geotécnico.

TANAKA, T. S., T. 1993. Progressive failure and scale effect of trap-door problems with granular materials.

TORO FLORES, M. Á. 2009. Evaluación de Filtraciones en Presas. Modelación Numérica de Flujo en medios Porosos Saturados y No Saturados.

UGAI, K. 1989. A Method of Calculation of total factor of safety of slopes by Elasto-Plastic FEM.

VALLARINO CÁNOVAS DEL CASTILLO, E. 1998. Tratado básico de presas. Tomo I.

WANG, Y., CAO, Z. & AU, S.-K. 2011. Practical reliability analysis of slope stability by advanced Monte Carlo simulations in a spreadsheet.