

**Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas**

**Facultad de Construcciones**

**Departamento de Ingeniería Hidráulica**



## **TRABAJO DE DIPLOMA**

### **TÍTULO**

**Análisis de la curva de filtración y estabilidad de taludes de  
la presa Zaza.**

**Autor: Isaac Machado Morffi**

**Tutor: Ing. Elizabeth Rangel**

**Santa Clara**

**Curso**

**2016-2017**

**"Año 58 de la Revolución."**

## **PENSAMIENTO**

“El camino siempre será difícil y requerirá el esfuerzo inteligente de todos.”

Fidel castro

**DEDICATORIA**

***A mis padres,***

*Por su paciencia, apoyo incondicional, por depositar toda su confianza en mí, y  
estar presente en los momentos más difíciles.*

***A toda mi familia,***

*Por darme aliento y alegría en los momentos de cansancio.*

***A mi novia,***

*Por estar a mi lado, por tener paciencia y confiar en cada una de mis  
decisiones.*

**AGRADECIMIENTOS**

A todos aquellos que de una forma u otra han contribuido a la culminación de mis estudios, a aquellos que de una manera desinteresada brindaron sus conocimientos y su apoyo en los momentos oportunos.

## **RESUMEN**

Después de construida la Pequeña Central Hidroeléctrica (PCHE) en la toma de agua de la presa Zaza, se ha observado que las filtraciones a través de la cortina que salen por las canaletas de drenaje pluvial en una cota muy superior a la salida prevista, situación está provocada por la obstrucción de los drenes de la cortina durante el proceso constructivo de la PCHE.

El presente trabajo realiza un análisis de las filtraciones, determinándose la línea de corriente superior (LCS) para diferentes niveles de agua en el embalse, simulando los drenes trabajando en buen estado y en mal estado de funcionamiento. A partir de la LCS se calculó la estabilidad de taludes para los casos analizados.

Los cálculos fueron realizados teniendo en cuenta un estudio geológico reciente del cuerpo de la cortina y de la base de la misma, mediante el empleo del paquete de programas GEO-STUDIO, los cuales tienen su base de solución en el método de los elementos finitos.

## **ABSTRACT**

After build the Small one Central Hydroelectric (PCHE) in the taking of water of the dam Zaza, it has been observed that the filtrations through the curtain that leave for the trough of pluvial drainage in a very superior bench to the previous exit, situation this provoked for one of the obstruction of the drenes of the curtain during the constructive process of the PCHE.

The present work carries out an analysis of the filtrations, being determined the line of superior current (LCS) for different levels of water in the dam, simulating the drenes working in good state and in not well operation state. Starting from the LCS the stability of banks was calculated for the analyzed cases.

The calculations were carried out keeping in mind a recent geologic study of the body of the curtain and of the base of the same one, through of the use of the package of programs GEO-STUDIO, which have their solution base in the method of the finite elements.

PENSAMIENTO .....	ii
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTOS .....	iv
RESUMEN .....	v
ABSTRACT .....	vi
INTRODUCCIÓN .....	9
CAPÍTULO I: Revisión bibliográfica, estudio de antecedentes de las filtraciones y estabilidad de taludes en las presas de tierra.....	13
1.1 Presas de Materiales Compactados. Generalidades. ....	13
1.2 Características generales sobre el flujo que circula a través de las cortinas de las presas de tierra. ....	14
1.3 Vulnerabilidad de las presas a través de las filtraciones.....	18
1.4 Características generales sobre el deslizamiento de taludes en cortinas de presa de tierra. 23	
1.5 Principales características de las fallas graves o catastróficas.....	24
1.6 Clasificación de los problemas de estabilidad en presas de tierra .....	26
1.7 Métodos teóricos para el estudio de la estabilidad de taludes en presas de tierra .....	27
1.8 Conceptualización de la modelación para la aplicación en el estudio de presas de tierra 29	
1.9 Conclusiones parciales.....	33
CAPÍTULO II: ANÁLISIS DE LAS FILTRACIONES Y ESTABILIDAD DE TALUDES EN LA CORTINA DE LA PRESA.....	34
2.1 Características generales sobre la presa Zaza .....	34
2.2 Análisis del estudio ingeniero geológico de la cortina .....	36

2.3	Análisis para el cálculo de la línea de corriente superior. ....	41
2.4	Análisis para la implementación de los modelos geométricos. ....	42
2.5	Conformación de la geometría y del mallado para los casos de cálculo. ....	43
2.6	Análisis de cálculo de estabilidad de taludes.....	46
2.7	Análisis de estabilidad en la zona afectada.....	48
2.8	Conformación de la geometría para el caso de estabilidad de taludes.....	49
2.9	Conclusiones parciales del capítulo.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
CAPÍTULO III: Análisis de la modelación de la cortina de la presa Zaza .....		54
3.1	Caracterización del dominio para la modelación y de la zona de estudio .....	54
3.2	Modelación y secuencia de análisis para interpretar los resultados.....	54
3.3	Resultados alcanzados en las modelaciones para el cálculo de la LCS.....	56
3.4	Resultados alcanzados en la modelación para deslizamiento de taludes.....	59
3.5	Conclusiones parciales del capítulo.....	65
CONCLUSIONES GENERALES.....		66
3.6	Recomendaciones .....	67
Bibliografía:.....		68
3.7	Anexos .....	69

## INTRODUCCIÓN

Las presas de tierras son una de las estructuras ingenierilmente más complejas por las características de los materiales utilizados en su construcción, tanto sus complejidades basadas 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 morfologías y dimensiones para la sección típica (Hdez, 2016).

Las filtraciones superiores a los valores estimados en el diseño, se pueden comprometer la función principal de las presas en muy corto plazo, almacenar agua y por ende un colapso de la cortina. La causa de la misma está asociada a la presencia de aberturas 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.

Una de las principales desventajas de las presas de material suelto consiste en las filtraciones tanto en el cuerpo de la presa como en su cimentación. Las filtraciones producen distintos efectos como pérdida de agua, presiones internas con componentes opuestas al efecto estabilizador del peso, disminución de la cohesión y su resistencia al rozamiento y erosión interna progresiva (sifonamiento) de la presa o su cimentación (Ulloa, 2016).

En Cuba existen diversos embalses o presas de importancia destinados a la reserva y suministro de agua a los diferentes sectores del país, de ellos las 3 más grandes entre las que se encuentran son Alacranes, Mayarí y Zaza, de las cuales esta última será objeto de estudio en el siguiente trabajo de investigación.

Normalmente, el estudio de filtraciones en presas ha sido llevado a cabo utilizando soluciones analíticas que consideran geometría y propiedades hidrogeológicas simples, así como programas de modelación numérica que sólo consideran la zona saturada del flujo. Sin embargo, recientemente se han desarrollado nuevas herramientas computacionales que permiten simular tanto la zona saturada como

---

no saturada del flujo lo que hace más completo, y por ende más confiable, este tipo de análisis (Flores, 2009).

### **SITUACIÓN PROBLEMÁTICA.**

En la cortina de la presa Zaza se están presentando filtraciones en cotas superiores a las observadas anteriormente, en la zona de la Toma de Agua donde se construyó una Pequeña Central Hidroeléctrica (PCHE). Se necesita conocer la posición de la curva de filtración de la presa en la zona de la PCH, así como realizar un análisis profundo de la estabilidad de los taludes de dicha presa.

### **PROBLEMA CIENTÍFICO**

¿Cómo realizar el análisis de la curva de filtración y de estabilidad de taludes en la cortina de la presa Zaza en el talud aguas abajo en la zona de la PCHE?

### **HIPÓTESIS**

Si se realiza un análisis de la curva de filtración y de la estabilidad de taludes en el talud aguas abajo de la cortina de la presa Zaza en la zona de la toma de agua entonces se podrá evaluar el comportamiento y seguridad de la sección transversal para evitar un fallo de la misma.

### **OBJETIVO GENERAL**

Analizar la estabilidad estática del talud aguas debajo en la sección de la cortina de la presa Zaza en la zona de la toma de agua considerando las condiciones creadas por la construcción de la PCHE.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Realizar una revisión bibliográfica como fundamentación teórica de la problemática planteada para el análisis de la estabilidad estática e interna de cortinas de presa de tierra.
2. Efectuar los cálculos de la curva de filtración para diferentes escenarios posibles en la sección de la presa Zaza.
3. Realizar los cálculos de estabilidad en el talud aguas debajo de la cortina de la presa Zaza y analizar los resultados de los cálculos para dar las recomendaciones ingenieriles necesarias.

---

**Para el logro de esta investigación se trazaron las siguientes tareas:**

- Redactar una síntesis posterior al proceso bibliográfico en la que se comenta brevemente los principales aportes científico-técnicos, principales tendencias, personalidades y entidades corporativas líderes a nivel nacional e internacional.
- Se realizara la modelación del programa GeoStudio con el objetivo de simular la línea de corriente superior de la presa Zaza.
- Realización de los cálculos que darán a conocer el comportamiento de una posible falla interna en el talud aguas abajo de la presa en la zona de la PCHE.
- Se analizara y se compararan los resultados obtenidos para así intervenir en caso crítico de falla del talud aguas abajo de la cortina en la zona de la PCHE.

**VIABILIDAD**

La investigación es viable, pues se cuenta con el apoyo de la dirección de proyectos de la Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos (EIPH), además se desea analizar las condiciones en las que se encuentra la cortina de la presa Zaza en la actualidad, tanto la estabilidad de taludes como las filtraciones en la cortina en la toma de agua.

**RESULTADOS ESPERADOS**

Esta investigación brindará una amplia información sobre las condiciones en las que se encuentra la cortina de la presa Zaza, sirviendo de ayuda a la realización de un plan para lograr revertir o minimizar los daños causados, además de prevenir fallas futuras en su explotación.

**MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN**

Se pretenden emplear métodos de investigación teóricos, empíricos como el empleo de sitios en internet y software.

## **ESTRUCTURA DE LA TESIS**

La tesis contará de tres capítulos con sus conclusiones parciales cada uno. El capítulo I describe el marco teórico referencial donde se usarán los principales criterios y conceptos que existen sobre el tema estableciéndose la discusión necesaria para su ordenamiento. En el capítulo II se pretende realizar un análisis de la estructura de la presa Zaza y del área a evaluar a partir de la utilización de los métodos y técnicas establecidos. El capítulo III presentará los resultados obtenidos y la propuesta de solución al problema de investigación.

Al concluir el tercer capítulo se harán las conclusiones generales a las que se arriben y aquellas recomendaciones a la dirección de la empresa IPH que pudieran ayudar a minimizar las dificultades detectadas a partir de la investigación.

En la sección de la bibliografía de la tesis, se relacionará toda la información referenciada en el texto y aquella consultada que además ayude al desarrollo y elaboración del marco teórico referencial y la investigación propia. Por último, se anexarán tablas, cálculos y gráficos que pudieran ser necesarios para una mejor comprensión de la tesis y que por sus características, no se incluyen en el cuerpo de la misma.

---

## **CAPÍTULO I: Revisión bibliográfica, estudio de antecedentes de las filtraciones y estabilidad de taludes en las presas de tierra.**

### **1.1 Presas de Materiales Compactados. Generalidades.**

Presa: Muro fabricado con piedra, hormigón o materiales sueltos, que se construyen habitualmente en una cerrada o desfiladero sobre un río, arroyo o canal con la finalidad de contener el agua en el cauce fluvial, para su posterior aprovechamiento en abastecimiento o regadío, para elevar su nivel con el objetivo de derivarla a canalizaciones de riego, o para la producción de energía mecánica al transformar la energía potencial del almacenamiento en energía cinética, y está nuevamente en dinámica al accionar la fuerza del agua un elemento móvil.

Las presas de tierra son una de las estructuras más antiguas construidas por el hombre. Para el almacenamiento de agua para riego, como lo atestigua la historia y los restos que sobreviven de las antiguas estructuras, se han usado desde los primeros días de la civilización. En nuestros días, como en el pasado, las presas de tierra continúan siendo el tipo más común de presa pequeña, principalmente porque en su construcción se utilizan materiales en su estado natural con un mínimo de tratamiento.

La compactación en presas fue aplicada en Europa a principios del siglo XIX. En Inglaterra, hacia 1820, se usaron rebaños de oveja; posteriormente, rodillos pesados de concreto o hierro. Dicha práctica fue llevada a California, EEUU, por ingenieros europeos y aplicada en 1860. En ese mismo estado se desarrolló el rodillo pata de cabra (1950), con clavos de durmientes de unos 15 cm de longitud. Los resultados fueron satisfactorios y en 1970 se compactó la presa Drum, con este tipo de rodillo.

En esa época no se conocía la influencia del contenido de las aguas del suelo en la compactación. Varias presas construidas en EEUU colocando la tierra sin controlar la humedad fallaron al entrar en operación; en la actualidad se supone que la estructura tenía capas compactadas en estado seco y otras húmedas construidas durante el período de lluvias. En EEUU nacieron varias tendencias al respecto, una proporcionando la colocación de la tierra con tal contenido de agua que era realmente lodo, y otra, aceptando el suelo en su condición natural, que en

las zonas áridas está muy próximo al estado seco. Por su interés histórico, son dignas de atención las notas de Sherard (1952) en su tesis doctoral sobre el comportamiento de las presas de tierra. Hasta que Proctor publicó en 1933 los resultados de sus estudios sobre compactación, los ingenieros comprendieron la importancia de ciertos parámetros como la humedad óptima y la energía de compactación en las propiedades mecánicas de los suelos (Jacinto).

## 1.2 Características generales sobre el flujo que circula a través de las cortinas de las presas de tierra.

La permeabilidad de los suelos depende de varios factores: viscosidad del fluido, distribución del tamaño de los poros, distribución granulométrica, relación de vacíos, rugosidad de las partículas minerales y grado de saturación del suelo. El valor del coeficiente de permeabilidad varía de acuerdo al tipo de suelo, la permeabilidad de los suelos no saturados es menor y crece rápidamente con el grado de saturación, la permeabilidad está relacionada con las propiedades del fluido que pasa a través del suelo.

Se define como red de flujo al lugar geométrico de los puntos de la presa con presión de agua igual a cero. Dicha red separa los suelos saturados de los no saturados, y fuera de la presa su continuación se denomina superficie de la lámina de agua, esto se muestra en la figura 1.

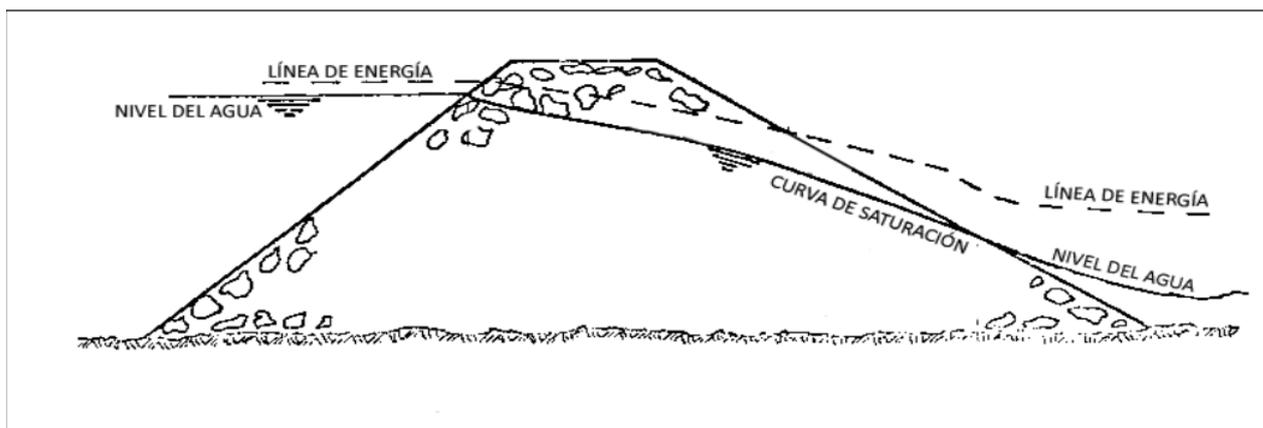


Figura 1. Red de flujo.

La localización de la red de flujo es importante porque:

- Se determina la altura de la salida del agua en el talud aguas abajo. Esta zona es la que tendrá mayor inestabilidad debido a las fuerzas de filtración (fenómeno de unravelling).
- La línea de saturación dentro de la presa corresponde a una condición de contorno necesaria para determinar la presión interna en los poros del material. Con la presión en los poros podemos calcular el gradiente hidráulico, y con estos las fuerzas de filtración actuando en el talud aguas abajo (Navarro, Informe Técnico, CIMNE IT-591, Noviembre 2009).

La particularidad del problema del flujo a través de las presas de tierra, flujo libre, radica en que en la región del flujo, que es la presa de tierra, no se conoce *a priori* una de las fronteras, de modo que no se satisface el prerrequisito básico para resolver el problema, que es el conocimiento de todas las fronteras de la región, para el trazo de la misma.

La línea de corriente superior no solo es la línea de flujo, sino que es también la línea de equipresión, en la que todos los puntos tienen la presión cero (o atmosférica en la escala absoluta de presiones). Por lo tanto, en la línea de corriente superior se cumplirán no solo las propiedades de las líneas de flujo, sino también las líneas de equipresión (Rolando Armas Novos, 1987).

Las filtraciones dependen de la carga hidráulica que origina la trayectoria del agua, dependiendo también de las características físicas del material. El flujo puede llegar a erosionar y socavar los terraplenes de la presa o su cimentación, ocasionando asentamientos, desprendimientos, etc.

Todo lo referido a este tema es de suma importancia por lo que no debe de dejarse de tratarse ni el más mínimo detalle, la falta de su conocimiento puede traer consigo efectos catastróficos en la cortina de la presa, por lo que es necesario tener el conocimiento de la red de flujo existente en las cortinas y en caso de que se obtengan filtraciones no deseadas darle las soluciones previas al asunto.

La evaluación de filtraciones a través de la presa, así como de la zona subyacente a ella, ha sido estudiada de diversas maneras y con distintos enfoques según las consecuencias que ellas pueden producir. Entre los efectos no deseados de las

filtraciones, los problemas en la estabilidad de la presa, pérdida de agua en el embalse o descarga de sustancias contaminantes.

Normalmente, el estudio de estas filtraciones ha sido llevado a cabo utilizando soluciones analíticas que consideran geometría y propiedades hidrogeológicas simples, así como programas de modelación numérica que sólo consideran la zona saturada del flujo. Sin embargo, recientemente se han desarrollado nuevas herramientas computacionales que permiten simular tanto la zona saturada como no saturada del flujo lo que hace más completo, y por ende más confiable, este tipo de análisis.

Además de las diferencias en las consideraciones de flujo (saturado y no saturado), estas herramientas han sido desarrolladas con distintos fines o campos de aplicación, como son la hidrogeología, ingeniería agronómica y geotecnia. En cada una de estas ramas de la ingeniería se han desarrollado herramientas con objetivos específicos de cada área, las que han ido evolucionando y en la actualidad pueden ser usadas indistintamente en uno u otro campo.

Así, tanto la aparición de estas nuevas herramientas como sus diferencias, y con las metodologías tradicionales en sus respuestas frente a escenarios ya estudiados, como por ejemplo el caso de flujo a través de muros homogéneos, y escenarios donde la inclusión de estas nuevas técnicas sea interesante, debido por ejemplo a que representan de mejor manera aspectos físicos del problema (Flores, 2009).

Para el estudio numérico de la filtración en las presas de materiales sueltos se pueden utilizar métodos clásicos de flujo de fluidos en materiales porosos, pero no los basados en la ecuación lineal de Darcy, ya que ésta sólo es válida para velocidades bajas (usuales en suelos poco porosos). El gran tamaño del material granular de las presas de materiales sueltos produce que las velocidades de filtración en el interior sean altas, y por lo tanto para su estudio no es válida la ecuación lineal de Darcy.

En 1856 Darcy demostró empíricamente que en el flujo de agua en suelos porosos existía linealidad entre la velocidad y el gradiente hidráulico. La expresión que desarrolló fue la descrita en la ecuación (ecuación 1).

$$V = k_i = \frac{k(H_1 - H_2)}{L} \quad (1)$$

Donde:

V: es la velocidad media de filtración en el medio poroso

K: es la permeabilidad del suelo

i: gradiente hidráulico

H1-H2: es la diferencia de alturas piezométricas entre los dos puntos por donde circula el flujo

L: es la distancia que recorre el flujo

La formulación de la ley de Darcy supuso un trabajo muy importante y complicado para la época en la que se realizó. A partir de aquel momento muchos investigadores analizaron su validez, y fruto de esos trabajos se determinó que dicha ley era válida para todo tipo de flujo en suelos, aunque dejaba de tener validez para velocidades de flujo muy elevadas.

Para los suelos como los limos y arenas medias se demostraron que eran totalmente válidas, mientras que para suelos de mayor permeabilidad a las arenas medias era necesaria determinar experimentalmente la relación entre velocidad y gradiente, una muestra de lo antes mencionado se presenta en la tabla 1.

Tabla 1. Resultados de pruebas de permeabilidad

Suelo	Tamaño D <sub>10</sub>	Permeabilidad	Darcy
	(cm.)	(μ/s)	
Grava gruesa	0,0820	1100	
Grava arenosa	0,0200	160	
Grava fina	0,0300	70	
Grava limosa	0,0060	4,6	

Arena gruesa	0,0110	1,1	A comprobar experimentalmente la validez de Darcy
Arena media	0,0020	0,29	Ley de Darcy Válida
Arena fina	0,0030	0,096	
Limo	0,0006	0,15	

### 1.3 Vulnerabilidad de las presas a través de las filtraciones.

Es de suma importancia el estudio de las filtraciones que circulan por el centro de la cortina, como también tener el conocimiento y control de esta a lo largo de su explotación, con el fin de evitar o mitigar el colapso de la cortina con antelación.

La Comisión Internacional de Grandes Presas (ICOLD) define como rotura: la rotura o movimiento de una parte de la presa o de su cimiento, de tal manera que la obra no puede retener el agua. En general el resultado será una salida de un volumen de agua importante, entrañando riesgo para las personas o los bienes aguas abajo".

Según esta comisión las causas más frecuentes de rotura en presas de materiales sueltos, después del sobrevertido por coronación, son las que se derivan de las condiciones del terreno de su cimiento.

- ✓ Erosión en el cimiento
- ✓ Erosión en el contacto presa-cimiento

En terrenos potencialmente erosionables es esencial el control de las filtraciones que proceden del embalse, control orientado a reducir su caudal y su gradiente y a proteger su salida aguas abajo mediante dispositivos adecuados.

En todas estas situaciones está presente la acción del agua infiltrada del embalse. Los tratamientos de la cimentación estarán orientados pues a su reducción y al control de las fugas remanentes(Concepción, 2013).

La exposición de los problemas referidos por cada término muestra que los procesos están estrechamente relacionados, lo que prueba la validez de estudiarlos integralmente. La ocurrencia de un fenómeno puede dar lugar a otro, y a su vez estos presentar fronteras difusas. Un ejemplo es lo expuesto en cuanto a las filtraciones, donde puede ocurrir solo el flujo del agua, pero es muy probable que esto no sea así y en un momento dado, muy difícil de predecir, comenzar a producirse problemas de sifonamiento o de estabilidad, los que a su vez, incrementan el flujo del agua, interactuando los procesos en más de un sentido.

Una filtración excesiva a causa de un defecto puede derivar el aumento de la presión intersticial, lavado del material, con repercusión creciente. Por eso es casi más interesante que la magnitud de la filtración su constancia o variación. Una filtración incluso notable, pero invariable puede no ser peligrosa. En cambio, puede ser alarmante una pérdida pequeña en su comienzo que va aumentando con el tiempo, porque ello es señal del lavado del material. Sobre todo, si el agua sale turbia, denota que hay disolución o arrastre, con lo que el camino de la filtración se va agrandando. Las filtraciones han de observarse tanto integral como individualmente.

Varios factores inciden en la inestabilidad de taludes y la erosión hídrica, desde meteorológicos e hidrológicos hasta geológicos y geotécnicos. Sin duda, el agua juega un papel prominente. Los suelos y rocas son materiales porosos, saturados o parcialmente saturados por el agua. Esta, al fluir a través de los poros del suelo, ocasiona fuerzas de arrastre a su esqueleto sólido, las que se conocen como fuerzas de filtración, mismas que hacen cambiar el estado de esfuerzos y deformaciones de los materiales. Los esfuerzos cortantes generados pueden rebasar las resistencias, propiciando grandes desplazamientos o hasta fallas totales en la masa de los materiales.

Aun cuando no sean tan grandes como para originar fallas masivas, las fuerzas de filtración pueden llegar a arrastrar partículas de suelo hacia la superficie de terreno. Esto ocurre con mayor frecuencia en suelos granulares como gravas o arenas. Si la pérdida de los materiales no se controla adecuadamente, el arrastre de los mismos deja ductos o cavidades en la masa de suelo.

Si este proceso se evoluciona, es posible que se formen ductos continuos a lo largo de líneas de corriente del flujo de agua, causando erosiones de gran magnitud. Este fenómeno se conoce como tubificación retrógrada. Su presencia en laderas es el responsable de erosión por filtración y su ocurrencia en presas o bordos pueden traer como consecuencia daños todavía mayores que pueden ser incluso catastróficos (Arroyo, 1 de febrero 2011).

El flujo de agua y fuerzas de filtración (figura 2) se pueden determinar mediante algoritmos numéricos. Para ello se tienen que realizar pruebas de laboratorio y campo para puntualizar los parámetros de conductividad hidráulica de los materiales. Son de gran ayuda las observaciones en campo de niveles piezométricos. Con base en estos análisis, se puede definir la variación de fuerzas de filtración en un talud, la que sirve para subsecuentes estudios de estabilidad de talud y tubificación retrógrada.

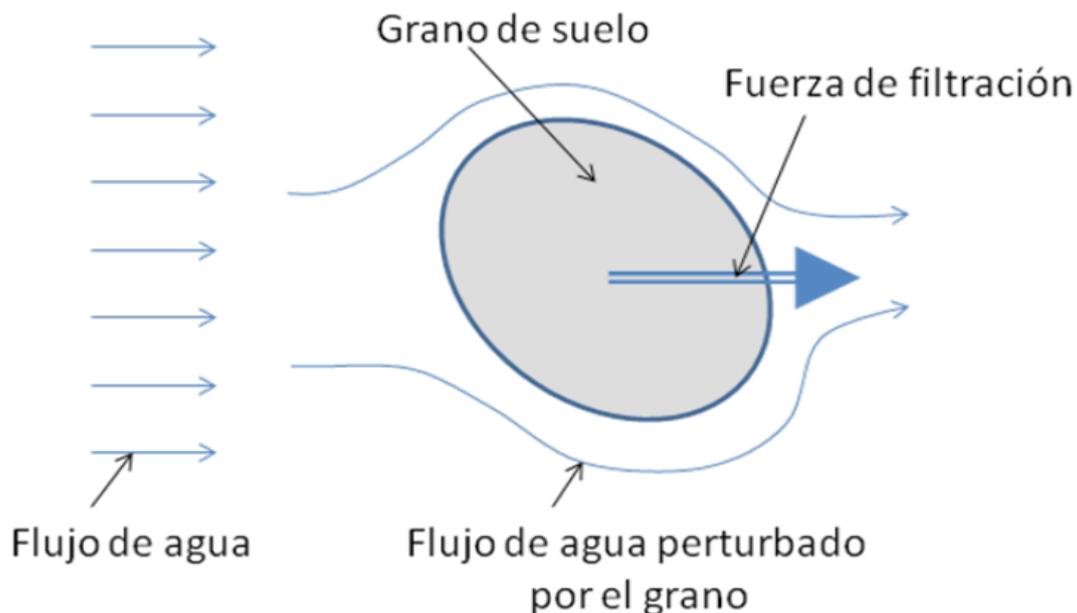


Figura 2. Esquema de un grano de suelo sujeto al flujo de agua y fuerzas de filtración.

La tubificación (figura 3) es el término que más se emplea, aunque frecuentemente en forma ambigua, para describir los problemas asociados con fuerzas de filtración. La definimos como el proceso de remoción de partículas de suelo bajo un gradiente hidráulico saliente, con el resultado de la formación de un ducto desde la salida del agua. El fenómeno así definido se refiere en la literatura como tubificación

retrógrada, ya que el proceso siempre sucede desde el lado aguas abajo hacia aguas arriba en contra de la dirección del flujo de agua. En ocasiones, este término se ha usado indebidamente como sinónimo de levantamiento, erosión interna o migración.

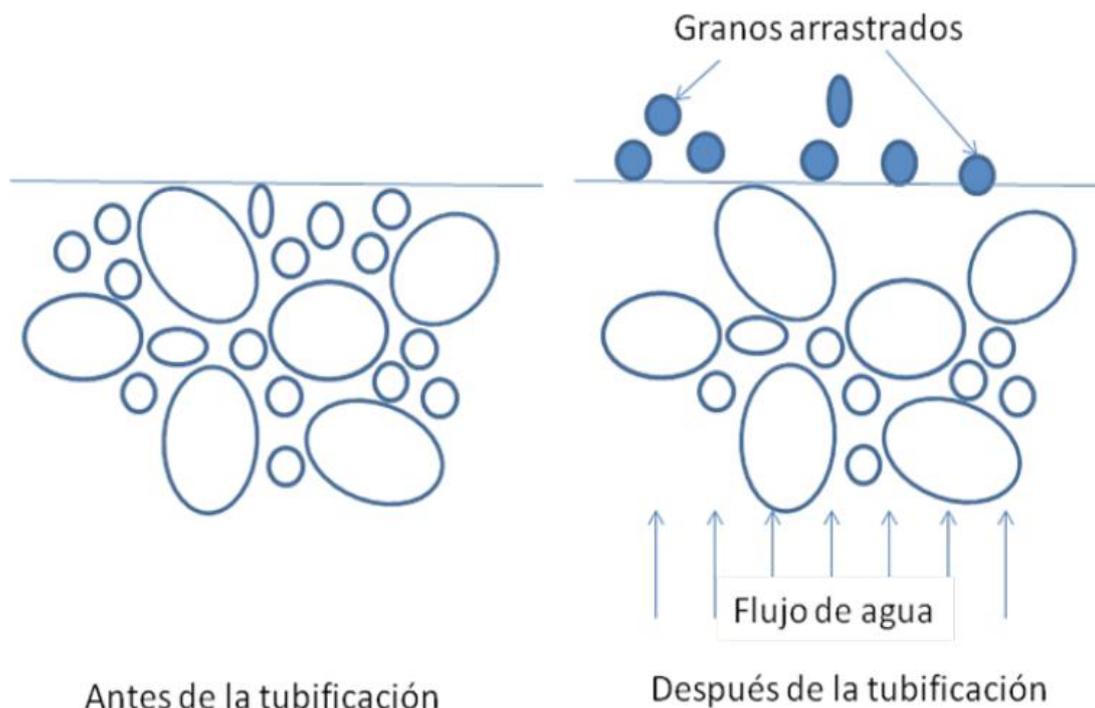


Figura 3. Arrastre de granos de suelo por efecto de tubificación retrograda.

Levantamiento es el movimiento de un bloque de suelo en la superficie de suelo bajo efectos de gradiente hidráulico. Puede ocurrir en suelos cohesivo y granular. Generalmente se acompaña por lloradero en taludes, ebullición de arena y volcán de arena, entre otras evidencias. El problema se presenta en taludes aguas abajo o pies de taludes aguas abajo donde sobresalen flujos de salida.

En algunos casos la velocidad a la salida de las filtraciones en el lado de aguas abajo llega a ser suficiente para provocar en esta parte el arrastre de la partículas de suelo, iniciando así la formación de un ducto o tubo que progresa aguas arriba, hasta que alcanza a establecer la comunicación hacia ambos lados de la presa; al entrar el agua y empezar a fluir a través de este tubo provoca el arrastre del material de sus paredes, ampliando considerablemente la sección del tubo. El trabajo erosivo del agua progresa rápidamente, pudiendo llegar a provocar la falla completa de la presa.

A continuación se presenta en las (figura 4, 5, 6) el desarrollo de la tabulación de una presa de tierra.

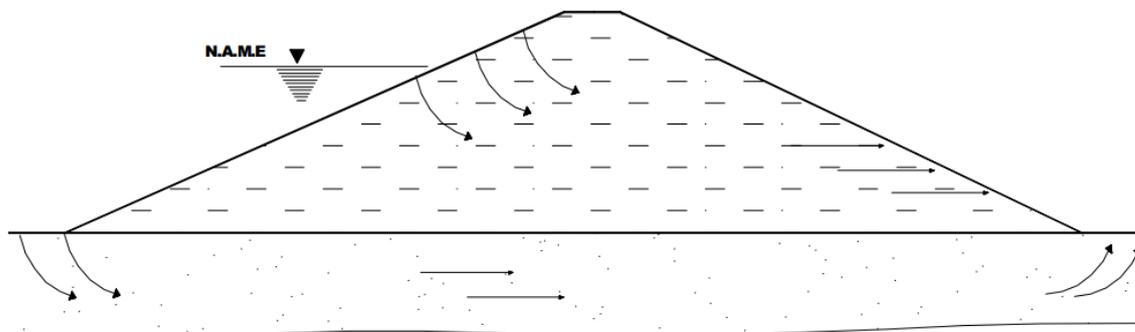


Figura 4. Filtraciones

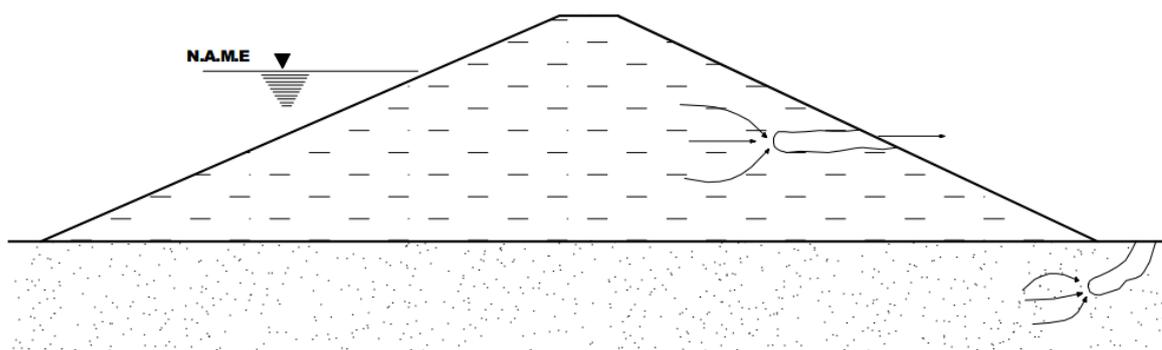


Figura 5. Iniciación de tubo

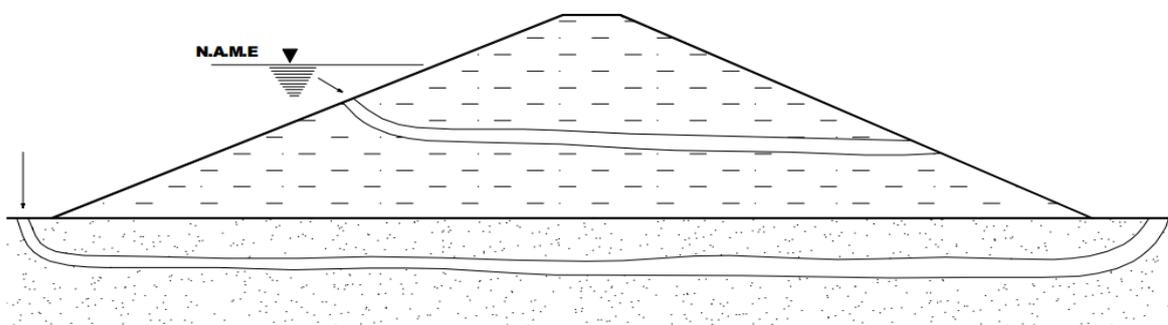


Figura 6. Tubificación completa.

La erosión hídrica de suelos se ha tratado tradicionalmente en el tópic de la conservación de cuenca. De la perspectiva de una cuenca hidrológica, el proceso

de erosión se puede dividir en tres tipos. El primero de ellos ocurre en áreas de gran extensión y relativamente planas. La erosión se denomina laminar, ya que el agua escurre dentro del régimen laminar. El segundo tipo se refiere a la erosión de laderas, en que juega un papel importante la fuerza de gravedad. Se movilizan grandes deslizamientos de ladera pero el área afectada es reducida. El tercero tiene que ver con la erosión de suelo en los cauces por los cuales las corrientes de agua conducen todas las aportaciones de sedimento en una cuenca hasta su salida.

La erosión en las laderas no se ha estudiado con mucho detalle en el pasado. Sin embargo, estudios recientes muestran su importancia. Se ha descubierto que las fallas masivas de los márgenes de río contribuyen a 85% del total de sedimentos. Otras investigaciones indican un porcentaje alto de sedimentos, entre 30 y 80%. Se debe a cárcavas que vienen siendo una forma de falla de talud.

Como se había mencionado, la erosión en taludes tiene su origen en la inestabilidad masiva y la tubificación retrógrada. Los análisis que toman en cuenta fuerzas de filtración han mostrado su utilidad en estos estudios.

#### **1.4 Características generales sobre el deslizamiento de taludes en cortinas de presa de tierra.**

Se comprende bajo el nombre genérico de taludes cualquier superficie inclinada respecto a la horizontal que haya de adoptar permanentemente la estructura de tierra. Se clasifican en taludes naturales, denominados también laderas, y taludes artificiales, dentro de los que se encuentran los cortes y terraplenes.

En el transcurso de la historia las presas de tierra se construirían (1968) hasta alturas que sobrepasaban de los 500 pies (152.40 m) arriba de sus cimentaciones; y cientos de grandes presas de tierra compactada se construyeron en los pasados 20 años sin haberse registrado ninguna falla. Sin embargo, las fallas de presas pequeñas siguen siendo cosa común. Aunque es probable que algunas de estas fallas sean el resultado de un mal proyecto, muchas de ellas han sido causadas por falta de cuidados en la construcción. Los métodos correctos de construcción incluyen la preparación adecuada de la cimentación y la colocación de materiales

en la presa con el grado necesario de compactación, siguiendo un procedimiento establecido de prueba y control (Jacinto).

Los deslizamientos son unas de las causas frecuentes de fallo de las presas de tierra. Constituyen un fenómeno espectacular y peligroso, a la vez que son susceptibles de un tratamiento analítico detallado. Por estos motivos han recibido una atención grande por parte de los ingenieros que proyectan presas. Los métodos de análisis de estabilidad que se utilizan en la actualidad han tomado como criterio de ajuste de sus resultados los deslizamientos ocurridos en presas y diques (Rolando Armas Novos, 1987).

Un deslizamiento ocurre cuando a lo largo de una determinada superficie de falla se ejercen esfuerzos de cortantes mayores que la resistencia que puede movilizar el suelo en esa misma superficie.

Los taludes son componentes estructurales fundamentales de presas y bordos. La inestabilidad de los taludes influye directamente en la seguridad y el funcionamiento de estas estructuras hidráulicas. Las laderas naturales, al tiempo de crear paisajes espectaculares, pueden padecer deslizamientos masivos que obstruyen corrientes de río.

Si los taludes o laderas se localizan en la cercanía de poblaciones, o bien las descargas de los embalses, como consecuencia del desbordamiento de presas o bordos provocan inundaciones, se pueden presentar cuantiosas pérdidas de material y vida humana. Por otro lado, la erosión hídrica es el causante principal de pérdidas de suelo en cuencas hidrográficas. Ante una mayor frecuencia de la presencia de condiciones hidrometeorológicas adversas, la erosión hídrica viene agravándose considerablemente.

## **1.5 Principales características de las fallas graves o catastróficas**

Se puede definir que la falla por estabilidad de taludes ocurre cuando a lo largo de una superficie, siendo la más utilizada la circular en el plano, los esfuerzos tangenciales actuantes superan la resistencia a cortante. En la figura 7 se muestra la superficie de falla circular que forma la falla ocurrida en un talud.

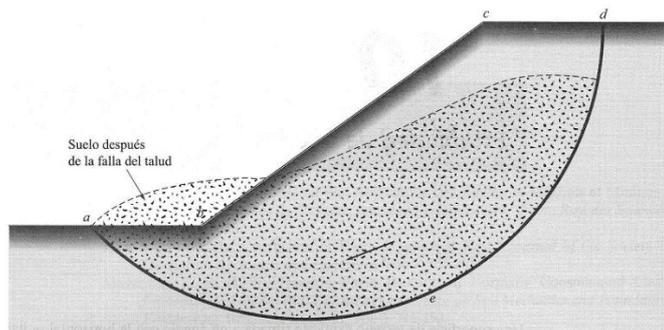


Figura 7. Falla de un talud

### Tipos de Superficies de falla de taludes

En general la superficie de falla, siempre considerando la falla circular del talud puede ser de los siguientes tipos:

- Falla superficial de un talud (figura 8)
- Falla de pie de talud (figura 9)
- Falla de base o profunda (figura 10)



Figura 8. Falla superficial de un talud.

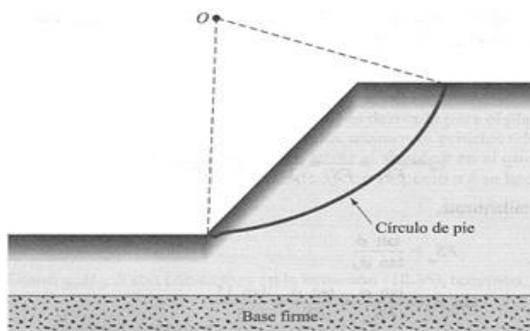


Figura 9. Falla de pie de talud.

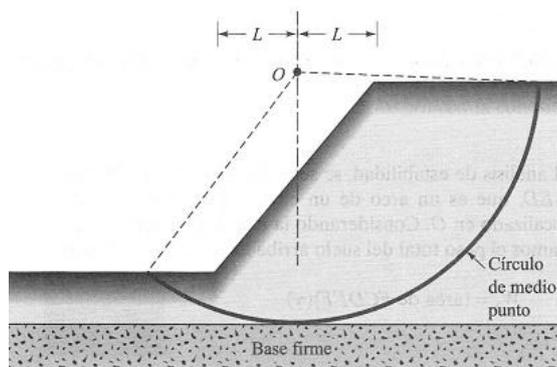


Figura 10. Falla de base.

La magnitud de las fallas en presas de materiales locales varía, desde lo que pudiera llamarse una catástrofe, que produce grandes pérdidas en vidas y bienes, hasta deterioros más o menos ligeros, que inclusive pudieran no requerir ningún trabajo de reconstrucción. Pueden producirse naturalmente una o la cuyos efectos aguas abajo son fáciles de adivinar, o producirse la destrucción total o casi total de la estructura. Se presentaran en el anexo número uno algunos de los diferentes tipos de falla según (Novoa, Habana 1990. Cuba. ).

## 1.6 Clasificación de los problemas de estabilidad en presas de tierra

Los problemas en el proyecto de una presa de materiales locales asociados al cálculo y diseño de la misma, se pueden clasificar en tres grupos: (Gil, 1998).

- a) **La estabilidad de tipo estático**, entendiéndose por tal la necesidad de que el coeficiente de seguridad, frente a un deslizamiento total o parcial que afecte a la presa o a su cimentación, sea aceptable, bajo las fuerzas másicas que actúan de una forma permanente, como son el peso propio de la obra, las fuerzas de filtración y de la presión intersticial del agua en las diversas circunstancias que se presentan normalmente en la vida de la presa. Este tema está ligado fundamentalmente con la resistencia al esfuerzo cortante de los materiales que la componen, de una forma menos acusada con la deformabilidad y permeabilidad de los mismos.
  
- b) **La estabilidad de tipo interno**, llamando así a la permanencia de la funcionabilidad de cada una de las partes de la presa en especial la del núcleo o pantalla de impermeabilización. Problemas como la fisuración, erosión externa, pero principalmente la interna o sifonamiento, preocupan cada vez más a los técnicos de presas. La dispersabilidad de los materiales, su deformabilidad, su colapsabilidad, la geometría de la sección y de los contornos de la obra, juegan un papel decisivo en su correcto funcionamiento.

- c) **La estabilidad de tipo dinámico**, en aquellos casos en los que la sismicidad del emplazamiento sea de tener en cuenta, si bien la mayor parte de las veces esta sollicitación se transforma en otra de tipo estático equivalente, en casos especiales o importantes; es preciso efectuar un análisis verdaderamente dinámico del comportamiento de la obra.

## 1.7 Métodos teóricos para el estudio de la estabilidad de taludes en presas de tierra

Los métodos de análisis para la estabilidad de taludes se catalogan hoy entre los de *análisis límite*, que consisten todos en imaginar un mecanismo de falla para el talud y aplicar a este los criterios de resistencia del material, de manera de ver si, con tal resistencia, hay o no posibilidad de que el mecanismo supuesto llegue a presentarse.

Para hacer el análisis de la estabilidad de taludes en suelos que tienen cohesión y fricción, es necesario dividir la masa deslizante en dovelas. El cálculo del factor de seguridad para una superficie de deslizamiento cualquiera implica la solución de un problema indeterminado desde el punto de vista de esta temática. A continuación se mencionaran algunos de estos métodos, los cuales brindan una información más detallada en, (Rolando Armas Novos, 1987), (Sentmanat, 2016).

- a) **Método de las dovelas:** Cuando se está en presencia de suelos  $c-\phi$  y se considera una superficie de falla circular el procedimiento se complica pues los esfuerzos efectivos a lo largo de la superficie de falla no son iguales y por tanto tampoco permanece constante la resistencia a cortante del suelo a lo largo de dicha superficie de falla. Fellenius propuso el llamado método de las dovelas para resolver dicha problemática, en el cual se divide en pequeñas rebanadas o dovelas en el suelo contenido entre la superficie de falla y la corona del talud y el propio talud.

- b) **Método de Fellenius:** Fellenius consideró la hipótesis de que  $\beta = \alpha$ .

**c) Método 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  $\Delta T$  tiene la dirección horizontal como  $\Delta E$ .

**d) Método de Janbu:** El método simplificado de Janbu se basa en la suposición de que las fuerzas entre dovelas son horizontales y no tienen en cuenta las fuerzas de cortante. Janbu considera que las superficies de falla no necesariamente son circulares y establece un factor de corrección  $f_0$ . El factor  $f_0$  depende de la curvatura de la superficie de falla.

Estos factores de corrección son solamente aproximados y se basan en análisis de 30 a 40 casos. 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.

**e) Método de Spencer:** El método de Spencer es un método que satisface totalmente el equilibrio tanto de momentos como de esfuerzos. El procedimiento de Spencer (1967) se basa en la suposición de que las fuerzas entre dovelas son paralelas las unas con las otras, o sea, que tienen el mismo ángulo de inclinación.

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  $\theta$ .

Para resolver las ecuaciones  $F$  y  $\theta$ , 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  $\theta$  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.

## 1.8 Conceptualización de la modelación para la aplicación en el estudio de presas de tierra

### Introducción a la modelación

En el campo de la ingeniería, el hombre ha tenido que enfrentarse a un grupo de fenómenos donde por limitaciones del conocimiento o por la carencia de una infraestructura técnica adecuada, no ha podido encontrar la respuesta en el problema real. Esto ha propiciado que tenga que recurrir a su capacidad creativa y lograr una abstracción de este problema, obteniendo modelos sobre los cuales se trabajan buscando una respuesta analítica, que por muy precisa que ella sea, los resultados obtenidos serán indicativos del problema real, en la medida que el modelo represente fielmente sus propiedades esenciales (Valdez, 2010).

Para todo objeto de modelación debemos tener presente el análisis del problema real, el modelo de las cargas, del material y de la estructura, así como los métodos de diseño y seguridad aplicados a la solución del modelo del problema real. A continuación se muestra en la figura 11, el esquema o concepción general de la modelación.

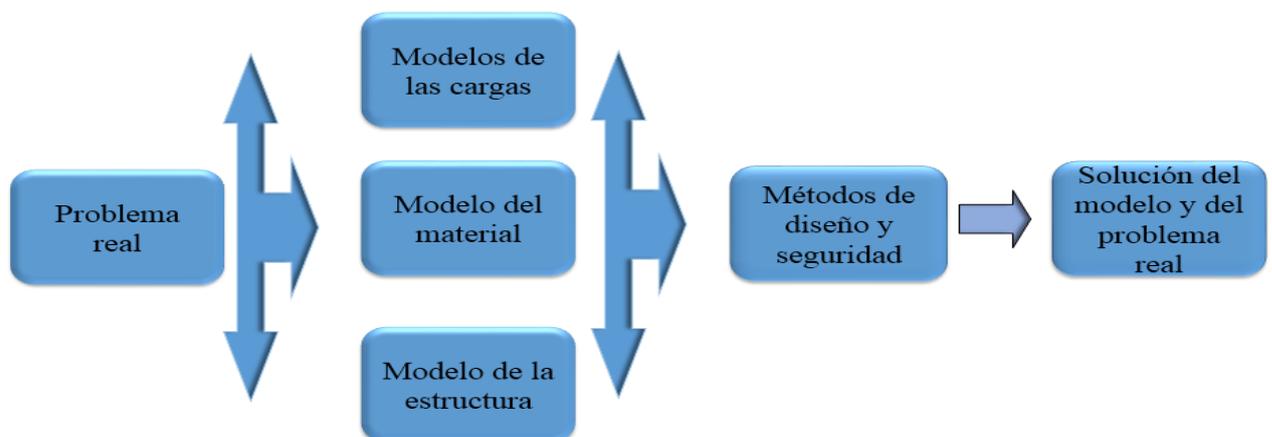


Figura 11. Gráfico sobre la Concepción General de la Modelación.

Modelar una estructura es idealizar una estructura real por medio de un modelo teórico factible de ser analizado mediante procedimientos de cálculo disponibles. La modelación incluye la definición de diversas propiedades de los elementos que componen al modelo. Esto implica la recolección de datos y la suposición de otras propiedades, como son las propiedades elásticas de los materiales incluyendo el suelo de cimentación y las propiedades geométricas de las distintas secciones.

A partir de la aplicación del método de los elementos finitos se desarrolla el análisis tenso-deformacional de la cortina y se le da solución a la misma. Se realiza una caracterización de los problemas de la estabilidad interna por medio de los distintos estados de carga que se ve sometida la obra y la forma de modelación por un cálculo en elementos finitos, teniendo en cuenta la geometría de la sección, cargas actuantes y propiedades tenso-deformacionales del suelo. Se pueden definir las características de los estados de cargas y sus casos de carga necesarios para modelar la cortina y analizar las condiciones de inestabilidad interna teniendo en cuenta los factores que la originan.

Fundamentos del método de los elementos finitos

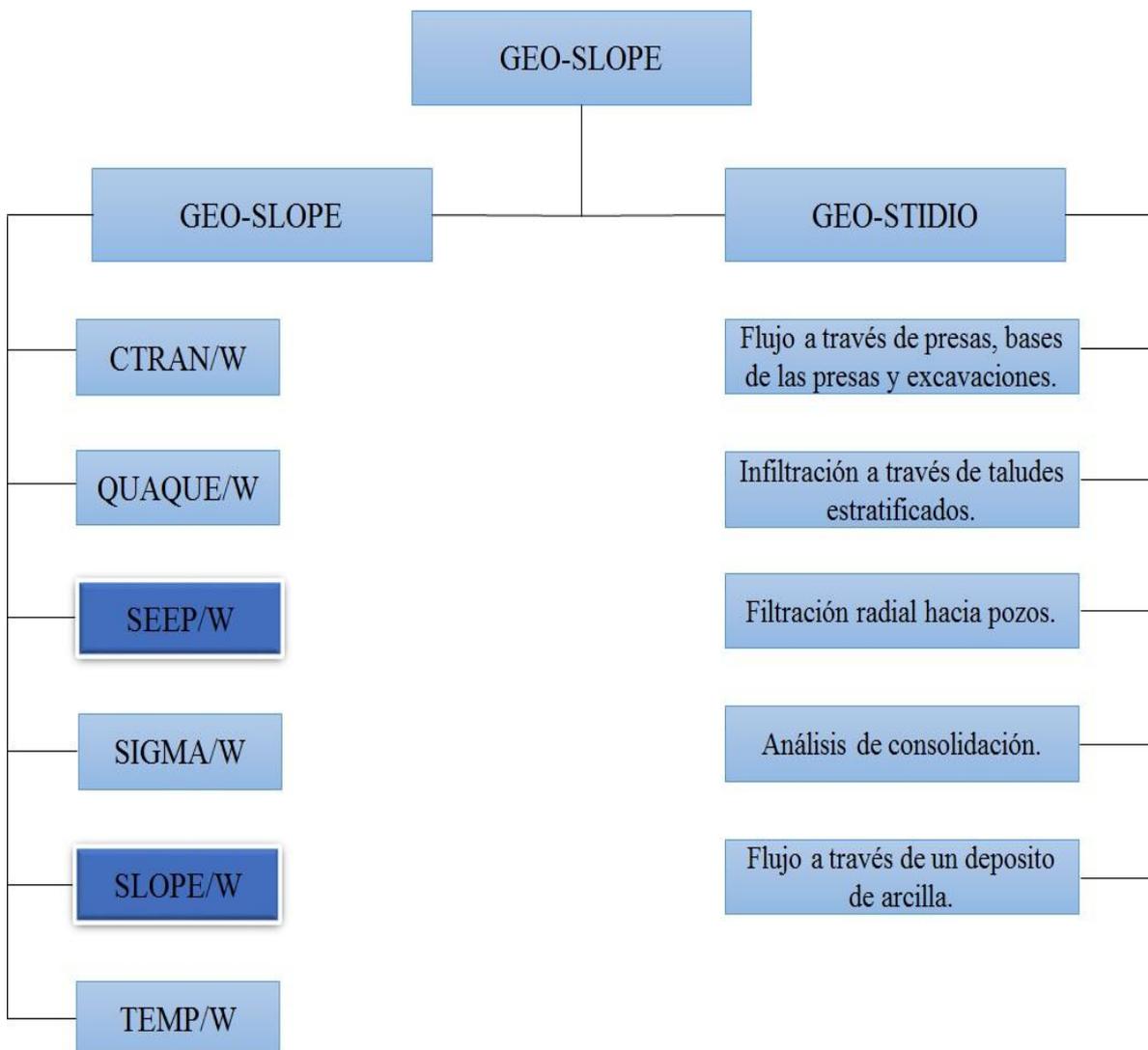
Se trata de un método general para la solución de problemas de contorno gobernados por ecuaciones diferenciales ordinarias o parciales. En esencia se trata de una técnica que sustituye el problema diferencial por otro algebraico, aproximadamente equivalente, para el cual se conocen técnicas generales de resolución.

La forma de trabajo de estos elementos consiste en aplicar ecuaciones de compatibilidad y comportamiento para obtener una relación entre la fuerza aplicada sobre el elemento y los desplazamientos de los nodos. Esta relación se expresa mediante lo que se denomina matriz elemental y que dependen del número de nodos, la situación de estos, el material constituyente, la geometría del elemento y el tipo de problema.

Una de las ventajas de este método es su facilidad de implementación en un programa computacional, que a su vez es una condición básica para su utilización ya que para el tratamiento de un problema en particular debe efectuarse un número

muy elevado de operaciones para resolver sistemas algebraicos del orden de cientos o miles de ecuaciones. No obstante, esta cantidad no es una limitación con las computadoras estándar de hoy.

Para crear nuestros modelos virtuales nos apoyaremos de manera específica en el programa GEO-SLOPE, el cual se verá representado en la figura 12, que es un programa de análisis, elástico lineal y de segundo orden de estructuras, por medio de métodos de elementos finitos que incluye un pos procesador gráfico para la presentación de resultados. Actualmente es uno de los más utilizados entre los calculistas, investigadores y estudiantes. El programa permite una visualización gráfica de los valores tensionales, esfuerzos y deformaciones.



---

Figura 12. Representación gráfica en detalle de la composición del Software empleado.

A partir de los objetivos trazados en nuestra investigación la problemática a abordar se satisface con la utilización de los Subsistemas resaltados en la figura 12 y a continuación daremos una breve explicación de ellos.

- El Subsistema **SEEPW** se utiliza para determinar el flujo en medios porosos, fenómeno de filtración en medios porosos en estructuras de tierra y en estructuras de hormigón armado para conocer el flujo por debajo de estas
- El Subsistema **SLOPEW** puede usarse en la solución de los siguientes problemas:
  - Análisis de estabilidad de taludes en suelos heterogéneos basado en la aplicación de métodos numéricos e incluye el análisis del método sueco por diversos métodos, dentro de los cuales podemos encontrar el método clásico de Fellenius, el método de Bishop y el método de Janbu de acuerdo a las diferentes formas de superficies de falla.

## 1.9 Conclusiones parciales

Al concluir el proceso de revisión bibliográfica del presente capítulo se alcanzan las siguientes conclusiones:

- 1) Se destaca una breve reseña generalizada sobre la implementación de las presas de tierra en el mundo.
- 2) Se da a conocer la evolución y el estado actual del estudio de la estabilidad de taludes y las filtraciones en presas de tierra, y a pesar del progreso de las investigaciones, existe un gran espacio entre la teoría y la solución de los problemas prácticos.
- 3) Se logra identificar los principales autores y centros investigativos, así como empresas o corporaciones y programas computacionales, a partir de los documentos científicos e investigaciones relacionadas con las patologías de filtraciones en presas de tierra a nivel nacional e internacional que fueron compilados.
- 4) Con la bibliografía consultada podemos localizar los principales métodos de estudio a lo que refiera la estabilidad de taludes y el comportamiento de las filtraciones en las presas de tierra.

---

## **CAPÍTULO II: ANÁLISIS DE LAS FILTRACIONES Y ESTABILIDAD DE TALUDES EN LA CORTINA DE LA PRESA.**

### **2.1 Características generales sobre la presa Zaza**

El embalse de mayor importancia económica y de mayor magnitud por el volumen de agua acumulada en Cuba es la presa Zaza, la misma necesita una atención precisa y estricta en cuanto a la seguridad por la magnitud de las pérdidas que se producirían de ocurrir una avería, así como por el riesgo para la vida de la población ubicada aguas abajo de la presa.

Fue construida a finales de la década de los 60, principio de los 70, con una cortina homogénea de arcilla de 35,0 m de altura máxima, cota de corona 42,5 m, NAN 39,0 m y NAM 40,55 m. El talud aguas arriba de 1:3 y aguas abajo 1:2,5, con una banqueta intermedia de 31 m de ancho por donde pasaría la Autopista Sur, la misma se construyó con el objetivo de abastecer la agricultura, específicamente el sembrado de arroz y a la ciudad de Santi Spíritus y parte de Villa Clara.

Para la década de los 80 con el objetivo de evitar un deslizamiento en el talud aguas debajo de la cortina se realizó un cambio de sección en la misma, agregando una sobrecarga a lo largo de toda la cortina con una cota de 35 m y una pendiente 1:4,5, dejando un filtro recostado en el talud anterior con salidas a través de zanjas espaciadas a 20m. Para el año 2009 se construyó una Pequeña Central Hidroeléctrica (PCHE) en el estacionado 13+45 de la cortina, como muestra la figura 13, debido a su construcción se obstruyeron los drenes de la presa cercanos a ella.

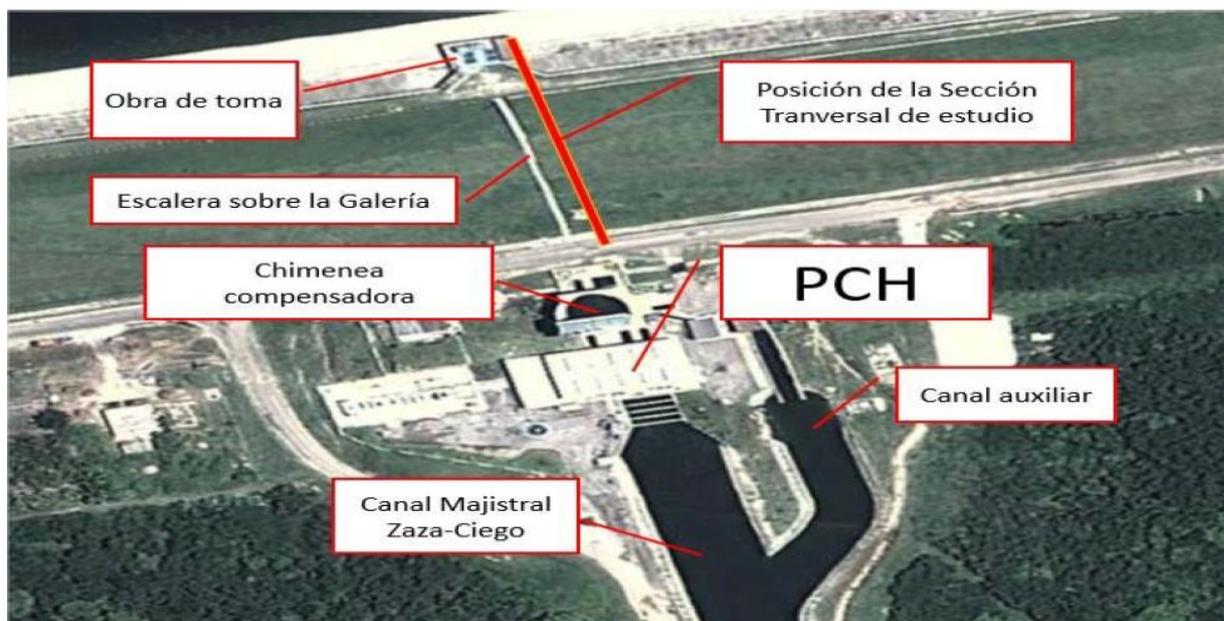


Figura 13. Vista satelital de la zona en estudio.(Hdez, 2016)

A partir del día 20 del mes de junio del 2012, se comenzaron a registrar filtraciones que emergieron en la canaleta preparada para las aguas pluviales, de inmediato se le fue informado al IPH con la misión de realizar un análisis de las causas de dichas filtraciones, como resultado de la investigación por diferentes vías, se demostró que existe una obstrucción de los drenajes previstos en la cortina de la presa, debido a la construcción de la PCHE y por tanto es necesario conocer las condiciones de la cortina para estar preparado en caso de falla.

La zona de estudio comprende el tramo ubicado en la cortina entre los estacionados 10+00 a la 16+00 aproximadamente, a ambos lados de la galería de la obra de toma, área que tiene como punto central las coordenadas X: 670031.495, Y: 220623.242.

El área de estudio inicialmente se limitó a las anomalías que detectó la geofísica y en el desarrollo de los trabajos se amplió la franja de la margen izquierda, llegando hasta una distancia de 350 m , en el sitio en que terminó la pared en suelo, en la margen izquierda (Pérez., 2000).

La zona a la izquierda de la galería es la que presenta más anomalías de la observación de los piezómetros en esa área, producto de la subida las cotas a valores alarmantes.

## 2.2 Análisis del estudio ingeniero geológico de la cortina

En el estudio ingeniero geológico de los suelos se caracterizaron estos desde el punto de vista físico-mecánico en el estado de yacencia actual y con las condiciones que poseen in situ. Las características de construcción de los piezómetros llevan al resultado de tener una respuesta diferente a las calas de observación hidrogeológica cuando cambia el nivel de embalse, esto se confirma con las medidas simultáneas de los piezómetros y de las Calas en la zona de estudio (Yera., 2001).

### Resultados de la perforación

Al no contar con estudios precedentes sólidos que brindaran una base investigativa efectiva, con un acercamiento importante al esclarecimiento de las condiciones ingeniero geológicas, fue necesario colocar las perforaciones de manera que nos fueran acercando al conocimiento general del área, teniendo como complemento además los datos que nos iban suministrando los métodos geofísicos en campo.

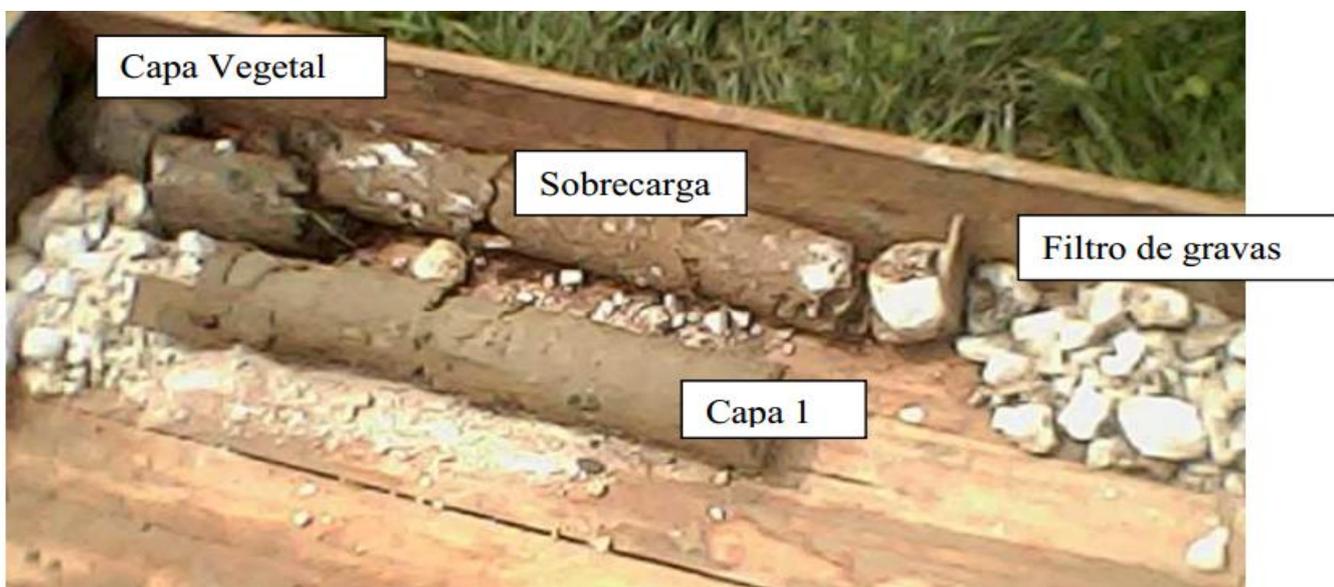


Figura 14. Foto de una cala ubicada en el pie de talud.(Pérez., 2000)

Los filtros en esta zona se construyeron de forma que tres consecutivos eran de arena y el cuarto de piedra de hormigón y todos espaciados a 20.0 m.



Figura 15. Foto de una cala tipo de la berma con sobrecarga y debajo el material de la cortina, no se observa el material filtrante (arena y gravas) de transición (Pérez., 2000).

### **Descripción ingeniero geológica de las capas**

Para la separación de las capas ingeniero geológicas se consideró el origen de los suelos, las características tacto visuales, como color, textura y consistencia, así como la posición que ocupa en la cortina, esta división pretende simplificar el esquema de cálculo y además se agruparon de acuerdo a las propiedades físico mecánicas de los suelos (MSc. Ing. Neldo San Román Pérez, Santa Clara, Noviembre de 2014).

A continuación se describen las capas caracterizadas en el corte.

**Capa vegetal.** Material arcilloso de color carmelita con algunas gravas y contenido variable de arena, presenta restos de raíces y contenido de materia orgánica, la potencia es de 30 cm, en ocasiones se cortó por debajo del lecho filtrante en la cortina original, en los sitios en que no se retiró debidamente.

**Material de la sobrecarga.** Formado por una arena arcillosa, de color amarillento a blanco, limosa, con abundantes gravas de caliza, en ocasiones las gravas son de sílice o pedernal y los fragmentos de rocas son extremadamente duros y compactos, alcanza la mayor potencia en la berma, este material procede del

préstamo ubicado en la margen derecha del canal, más próximo a la cortina (Préstamo 100).

Clasifica por el SUCS como SC.

Este material se utilizó en la construcción de la base de la autopista y posteriormente como sobrecarga para estabilizar los deslizamientos, al parecer del mismo préstamo.

Los resultados geotécnicos del material de sobrecarga aparecen en la Tabla 5.2.

**Lecho filtrante.** Está formado por dos capas de material permeable que funcionan como una captación de la línea de corriente superior de la red de flujo, colocada en la parte superior en contacto con la sobrecarga el material más fino arenoso y a continuación un material gravoso que contacto con el material de la cortina. Este material fue cortado por la mayoría de las Calas de la berma y del pie de loa sobrecarga al lado de la canal de drenaje.

**Arena:** Material que está formado por una arena de granos medios a finos con limos y arcillas hasta un 20%, de color carmelita obscuro de 50 cm de espesor.

**Gravas:** son de calizas muy duras de color blanco, con un tamaño de las gravas de hasta 50 mm.

La geomorfología de la región a grandes rasgos no expresa una relación muy directa entre los tipos litológicos presentes y el relieve. Sabemos que en las zonas de mayor elevación aparecen sedimentos terrígenos carbonatados, asociados a la formación Arroyo Palma, predominando los arcillosos y margosos, con un desarrollo importante de la fase de suelos. Ya hacia las zonas más bajas se depositan los sedimentos aluviales asociados al río Zaza, predominando los de tipo limoso y limo arcilloso con alguna presencia de arena. Ambos tipos se articulan de una forma prácticamente imperceptible, sin contrastes en la manifestación del relieve, con pendientes que presentan muy poca variación, siendo diseccionadas ambas por una serie de corrientes superficiales que drenan en varias direcciones.

Los trabajos geofísicos se basaron en métodos geoeléctricos de superficie, que se ejecutaron sobre la red de perfiles antes mencionada. Comenzaron por el Sondeo Eléctrico Vertical (SEV) que permitió el estudio de los horizontes geoeléctricos asociados a las litologías presentes, con la determinación de sus potencias. Este

método se realizó en su modalidad Slumberger y por lo general se ejecutaron cada 50 m con un AB máximo de 620 m.

De esta manera se avanzó de lo general a lo particular, cuando se concentraron las perforaciones en el área más afectada y se realizaron las pruebas hidrogeológicas, que se basaron en la ejecución de inyección de agua a diferentes escalones de presión, con régimen no estabilizado del gasto absorbido, tomando generalmente el esquema largo (tipo M, con tres escalones), con cargas que fluctuaron regularmente entre las 1.0 y 4.0 atm , esquema que tuvo en cuenta los materiales presentes, la altura máxima de la cortina en el sector de las filtraciones (14.5 m) y el cálculo de la absorción específica atendiendo a la clasificación de Jahthe (absorción de 0.5 litros en un minuto, en un metro, a la presión de 3 atmósferas), por medio de estas investigaciones se obtuvieron los datos del suelo de la obra que se muestran en la tabla 2 (Pérez., 2000).

Tabla 2 Resultados de las investigaciones ingeniero-geológicas (Pérez., 2000).

PARÁMETROS	RESUMEN GEOTÉCNICO. VALORES NORMATIVOS								
CAPAS	UM	CORTINA	1	2	3	3 a	3 b	5	PRT
Grava	%	9	14	47	16	6	63	3	28
Arena	%	47	25	19	30	14	22	49	23
Limo	%	15	34	19	28	30	11	22	28
Arcilla	%	29	27	16	26	51	8	27	20
Límite Líquido	%	40.2	31.4	30.5	34.9	69.7	30.5	52.6	29.8
Límite Plástico	%	19.2	17.8	16.4	17.4	26.7	16.4	22.6	17.7
Índice Plástico	%	21.0	13.7	14.1	17.5	43.0	14.1	30.0	11.6
Humedad Natural	%	22.6			18.9	39.7			16.5
Densidad Húmeda	g/cm <sup>3</sup>	2.00			2.08	1.81			2.10
Densidad Seca	g/cm <sup>3</sup>	1.63			1.75	1.30			1.82

PARÁMETROS	RESUMEN GEOTÉCNICO. VALORES NORMATIVOS								
Relac. de Vacíos	-	0.667			0.576	1.093			0.49 2
Saturación	%	90			90	97			84
Peso Específico	-	2.72			2.75	2.71			2.72
Humedad Óptima	%								15.5
Densidad Húmeda	g/cm <sup>3</sup>								2.10
Densidad Seca	g/cm <sup>3</sup>								1.82
Relac. Vacíos	-								0.49 4
Saturación	%								85
Cohesión Lento	Kg/cm <sup>2</sup>	0.29			0.27	0.32			-
Ángulo Fricción L.	°Sex.	17			19	9			-
Cohesión Rápido	Kg/cm <sup>2</sup>	0.56			1.19	10			0.30
Áng. Fricción Ráp.		11			12	0.69			30
Mód. Deformación	Kg/cm <sup>2</sup>	167			279	272			341
Coef. Compresib.	Cm <sup>2</sup> /kg	0.0111			0.0126	0.0067			0.00 54
Coef. Consolid.	Cm <sup>2</sup> /seg	0.00629			0.00085	0.00163			0.00 125
Clasificación	-	CL	CL	GC	CL	CH	GC	CH	CL

## 2.3 Análisis para el cálculo de la línea de corriente superior.

Existen condiciones que son cuestionadas por los ingenieros que realizan experiencias de laboratorio o lo que observan lo que ocurre en el campo, planteándose que en muchos casos no se cumplan. La mayor parte de esas interpretaciones están motivadas a confundir la línea de corriente superior, LCS con la línea de saturación del suelo, la cual se encuentra ligeramente por encima de la línea de corriente superior, debido al efecto de capilaridad. A continuación en la tabla 3 se exponen algunos autores que desarrollaron hipótesis sobre la confección de esta y algunas características de sus teorías. Para un análisis más detallado sobre el tema lo podemos encontrar en, (Sentmanat, 2016), (Novoa, Habana 1990. Cuba. ).

Tabla 3. Características de las soluciones expuestas por diversos autores.

Autores	Características
<b>J. Dupuit</b>	Proporciona soluciones satisfactorias para algunos problemas de flujo no confinado, para pequeñas inclinaciones de la LCS las líneas pueden considerarse horizontales. El gradiente hidráulico es igual a la pendiente de la LCS en el punto que se tracen.
<b>Schaffernak y Van Iterson</b>	No hay necesidad de trazar la red de flujo para calcular el gasto de filtración. La fórmula de la tangente da buenos resultados cuando la LCS es bastante tendida, la totalidad de las presas homogéneas caben en esta situación.
<b>J. Kozeny</b>	Las familias de líneas de flujo y equipotenciales son dos familias de parábolas de mismo foco. Es aplicada a una sección de presa con drenaje de tipo de colchón.
<b>A. Casagrande</b>	En ellas se obtiene un alto valor práctico, útiles para todos los casos en que el ángulo $\alpha$ tiene valores comprendidos entre 60 y 80.

## 2.4 Análisis para la implementación de los modelos geométricos.

La obra en estudio se analizara en el programa GeoStudio, donde es necesario realizar una discretización completa, donde el medio continuo se divide en elementos interconectados por un número finito de nodos en los cuales actúan las resultantes de los sistemas de cargas que solicitan al continuo.

En la conformación de la geometría de la estructura se contó con planos digitalizados en el programa GeoStudio los cuales fueron exportados al AutoCAD con el objetivo de obtener las medidas a escala real. Atendiendo a la complejidad de la geometría de cada uno de los objetos de obra que se quieren modelar sobre la base de su forma y dimensiones, considerando las limitaciones de los medios de cómputo.

Tabla 4. Características de los casos de cálculo para el estudio del comportamiento de la cortina

<b>Nº</b>	<b>Nombre del modelo</b>	<b>Características</b>	<b>Objetivo</b>
1	La cortina de la presa	Contiene una longitud a todo lo ancho de la base de unos 231.36 m y una altura máxima en su eje central de 34.6 m	Evaluar el comportamiento de la sección. Determinar la densidad de la malla para la modelación.
2	Primera capa de suelo debajo de la cortina	La sección está compuesta por una longitud de 231.36 m y un espesor de 8.51 m.	Evaluar el comportamiento de la sección.
3	Sobrecarga situada en el talud aguas debajo de la cortina.	Sección parcial de la sobrecarga contiene una longitud de 65.62 m y un espesor máximo de 4.28 m.	Evaluar el comportamiento de la sección, para analizar el estado más crítico de falla.
4	Filtro o dren de la cortina.	Sección parcial con 37.48 m de longitud y 1.5 m de espesor.	Obtener el comportamiento de la sección por filtraciones.

## 2.5 Conformación de la geometría y del mallado para los casos de cálculo.

Para la colocación del mallado se tomó el corte de la sección típica completo de la cortina de la presa, pues no es necesario dividirlo por tramos. Esta sección tiene como principal característica que es la que presenta problemas de filtración debido a la obstrucción de los drenes, en general la cortina presenta una longitud a todo lo ancho de 231.36 m y una altura máxima medido en el eje central de la corona de 34.6 m. Otra característica en su construcción se utilizó un suelo generalmente homogéneo compuesto por una arcilla grava-arenosa, el talud agua arriba tiene una pendiente de 1:3, mientras que el talud aguas abajo presenta una pendiente de 1:2.5 con una sobrecarga con talud 1:4.5 como se muestra en la siguiente figura.

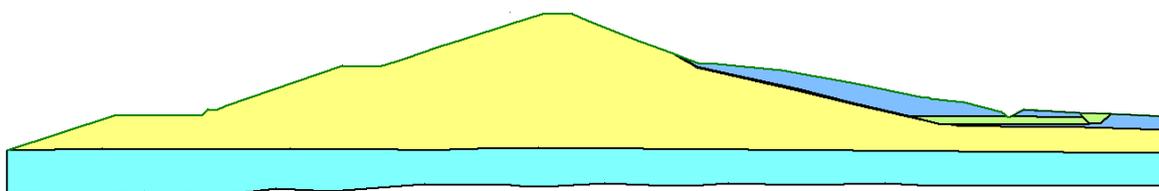


Figura 16. Sección típica de la cortina de la presa.

Se creó un modelo con las dimensiones reales de la obra. Las dimensiones de los sólidos que conforman el modelo se logró realizando varias corridas de prueba con mallas distintas en el que la discretización varió entre 1m, 3m o 5m aproximadamente. La discretización para el caso de estudio que se abordará en este trabajo se tomará en función del nivel de exactitud con que se quieran obtener los resultados y de las facilidades informáticas con que se dispongan para su realización.

Para lograr obtener la discretización idónea de las corridas mencionadas anteriormente, se confeccionó una tabla donde se registraron la cantidad de elementos y nodos que conformaron el modelo en 2D con sus respectivos tiempos de corrida.

Tabla 5. Discretización de los modelos de prueba y gasto en cada sección.

Discretización de los elementos	Cantidad de sólidos	Número de nodos	Tiempo de corrida	Gasto de filtración	
				A	B
1 m	5051	14932	$5.19 * 10^{-2}$	$3.970 * 10^{-6}$	$2.512 * 10^{-6}$
3 m	622	1881	$2.46 * 10^{-2}$	$3.981 * 10^{-6}$	$2.509 * 10^{-6}$
5 m	276	809	$1.56 * 10^{-2}$	$3.985 * 10^{-6}$	$2.477 * 10^{-6}$

Para la modelación de la sección se trabajará con un mallado para de espaciamiento de 1 m pues es donde se registra el menor gasto de entrada y el mayor gasto de salida por las canaletas de aguas pluviales, en el anexo 2 se darán a conocer como el margen de error disminuye a medida de que va disminuyendo la longitud de la discretización y como el menor error se torna en la discretización para 1 m. En la figura 17 se mostrara como queda representado la discretización para esa longitud.

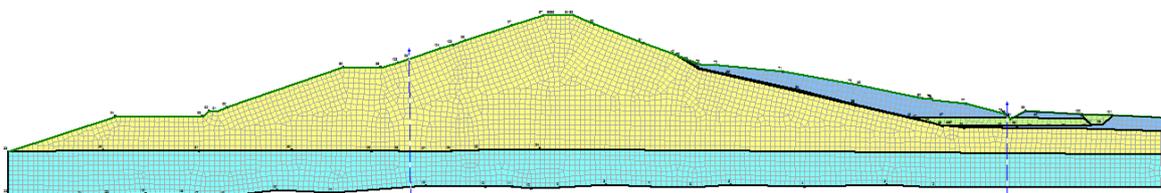


Figura 17. Modelo geométrico de una sección de 231.36 m de longitud discretizada a 1 m con sus vínculos de apoyo. (5051 sólidos y 14932 nodos).

El análisis se realizará para diferentes niveles de agua en los que se han encontrado las filtraciones y para su nivel de aguas normales, por lo que se tendrán en cuenta las cargas hidráulicas que incluyen para su funcionamiento. En las siguientes imágenes se mostraran los distintos niveles de aguas para el cual será el caso de estudio en el presente trabajo.

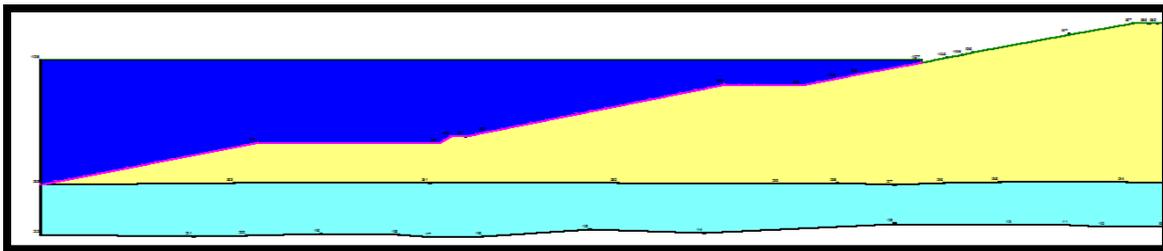


Figura 19. Sección típica para un nivel de agua con cota de 37.5 msnm.

La figura anterior muestra el nivel de agua en el que se encontraba la presa en el para el año 2012 cuando los geólogos comenzaron a detectar las filtraciones por las canaletas de aguas pluviales por lo que realizaron un estudio geofísico detectando así la posición de la línea de corriente superior.

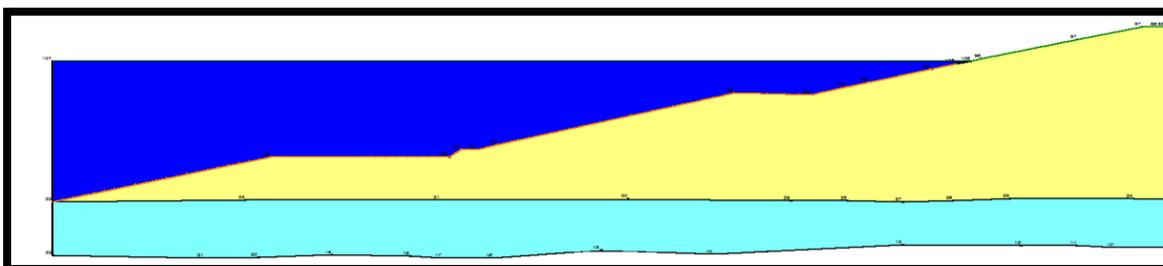


Figura 20. Sección típica para un nivel de agua con cota de 39 msnm.

Se realizara el análisis de la línea de corriente superior para el nivel de agua mostrado en la figura 20 siendo esta el nivel de aguas normales de la presa.

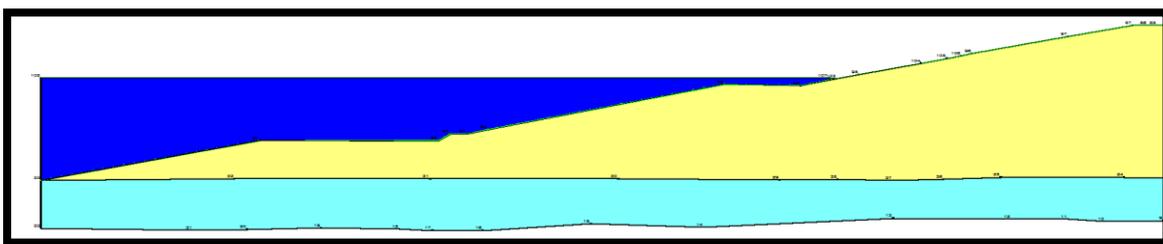


Figura 18. Sección típica para un nivel de agua con cota de 32.5 msnm.

Con el paso del tiempo y a su vez el aumento del deterioro del lecho filtrante de la cortina de la presa en el talud aguas debajo de la cortina han mostrado la continuidad de las filtraciones a pesar del descenso del agua en el embalse a un nivel de 32.5 msnm.

En la tabla a continuación se mostrara las cargas hidráulicas para los diferentes niveles de aguas.

Tabla 6. Cargas hidráulicas para cada nivel de agua

Nivel de agua	Carga hidráulica
32.5 msnm	17.918 m
37.5 msnm	20.675 m
39,0 msnm	21.501 m

## 2.6 Análisis de cálculo de estabilidad de taludes

Para hacer el análisis de estabilidad de taludes en suelos que tienen cohesión y fricción como en el caso de estudio, es necesario dividir la masa deslizante en dovelas. El cálculo del factor de seguridad para una superficie de deslizamiento cualquiera implica la solución de un problema determinado desde el punto de vista de la estática.

Son un caso particular de los métodos de equilibrio límite. En estos métodos el coeficiente de seguridad de un talud se busca tanteando posibles líneas de rotura. Para cada línea de rotura que se postule se podrá calcular un determinado coeficiente de seguridad y tras tantear buen número de posibles líneas de rotura, para estar suficientemente seguro de que se ha cubierto bien el abanico de posibles roturas, entonces se asigna al talud el coeficiente de seguridad correspondiente a la línea de rotura pésima tanteada.

El método de cálculo del coeficiente de seguridad correspondiente a una determinada línea de rotura se basa en dividir la masa deslizante en rebanadas o plantear, para cada rebanada, aislada del resto, las ecuaciones de equilibrio. A continuación en la tabla 7 se hará referencia de los distintos autores que estudiaron el tema y sus respectivas características (Julian, 2014).

Tabla 7. Características de las soluciones expuestas por diversos autores.

<b>Autores</b>	<b>Características</b>
<b>Fellenius-May</b>	Es aplicable a líneas de rotura circulares y la ecuación básica es la del equilibrio de momentos respecto al centro del círculo, la presión de contacto es similar al peso de cada rebanada, no se cumple normalmente en taludes con grandes presiones intersticiales.
<b>Bishop</b>	Todas las fuerzas que actúan son nulas (Método simplificado) luego, mediante un cálculo iterativo, ir ajustando valores razonables de estas fuerzas tratando de cumplir el equilibrio horizontal que no se formuló para resolver el problema.
<b>Janbu</b>	Está basado en satisfacer el equilibrio horizontal y el vertical, las fuerzas que actúan son nulas y las fuerzas entre rebanadas actúan aproximadamente a un tercio de la altura. No tiene solución matemática exacta.
<b>Morgenstern-Price.</b>	Se propuso un procedimiento capaz de satisfacer todas las ecuaciones de equilibrio, se supuso que la componente tangencial era una fracción de la componente horizontal. Es fijar, con criterios ingenieriles cual es la forma de la inclinación en las dovelas.
<b>Spencer</b>	Supuso que la función sea una constante, lo que significa que todas las fuerzas de empuje entre rebanadas serían paralelas.

## 2.7 Análisis de estabilidad en la zona afectada

El análisis de estos importantes parámetros se basó en los datos aportados por la investigación ingeniero geológicos, en cuanto a la estimación de las propiedades de los suelos presentes en la base, así como de las propiedades del material empleado en la cortina como se mostraran en la tabla 8 se tomó como punto de partida además el diseño de la cortina en este sector de la presa.

Tabla 8. Datos proporcionados por el análisis geológico de los suelos.

Región	Kf(m/seg)	C(KPa)	$\Phi$	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )
<b>Cortina</b>	$2.36 * 10^{-7}$	15.3	15.62°	20.64
<b>Sobre carga</b>	$6 * 10^{-5}$	20	20°	17.5
<b>Filtro</b>	0.001	20	20°	20.2
<b>Suelo nat. 1</b>	$5.79 * 10^{-6}$	20	17.6°	20.33

A partir de estos datos primarios, se realizó la modelación de su estabilidad y deformación, con el empleo de programas realizados para tales efectos.

Para crear los modelos virtuales el análisis se apoyó de manera específica en el programa GEO-SLOPE, que es un programa de análisis elástico lineal y de segundo orden de estructuras, por medio de métodos de elementos finitos que incluye un pos procesador gráfico para la presentación de resultados. Actualmente es uno de los más utilizados entre los calculistas, investigadores y estudiantes.

El programa permite una visualización gráfica de los valores tensionales, esfuerzos-deformaciones. A partir del Subsistema SLOPEW pudo emplearse en la solución de los análisis de estabilidad de taludes en suelos heterogéneos basado en la aplicación de métodos numéricos que incluye el análisis del método sueco por diversos métodos, dentro de los cuales podemos encontrar el método clásico de

Fellenius, el método de Bishop y el método de Janbu de acuerdo a las diferentes formas de superficies de falla

## 2.8 Conformación de la geometría para el caso de estabilidad de taludes

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.

De igual manera que el apéndice de filtración, en el cálculo de la estabilidad de taludes se realizó para un nivel de agua de cota 32.5 msnm, 37.5 msnm y 39 msnm respectivamente, donde se dio a conocer las coordenadas de la malla de los centros de la superficie (surface grid) y las coordenadas del radio de la superficie (surface radius) para conocer así los círculos de falla en cada una de las secciones.

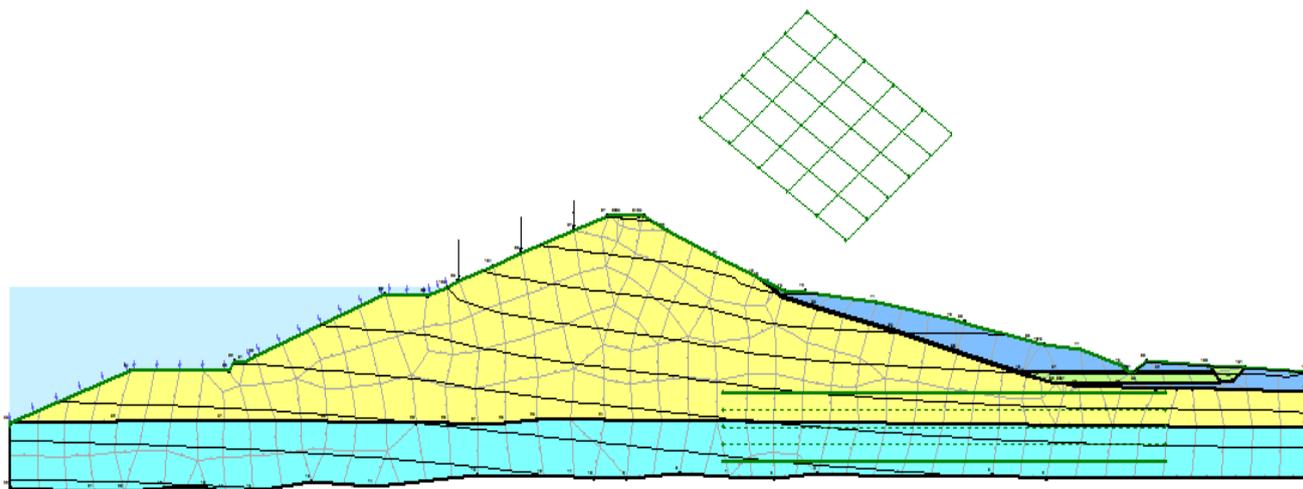


Figura 21. Sección para el deslizamiento de taludes con un nivel de agua de 32.5 msnm.

Tabla 9. Coordenadas de los puntos de la reja y el radio para los círculos de falla para un nivel de agua de 32.5 msnm.

<b>Puntos de la esquina de la reja</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>
Superior izquierdo	142	54
Inferior izquierdo	123	40
Inferior derecho	149	24
Incrementado	5	5
<b>Puntos de la esquina del radio</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>
Superior izquierdo	127	4
Inferior izquierdo	127	-5
Superior derecho	206	4
Inferior derecho	206	-5
incrementado	4	

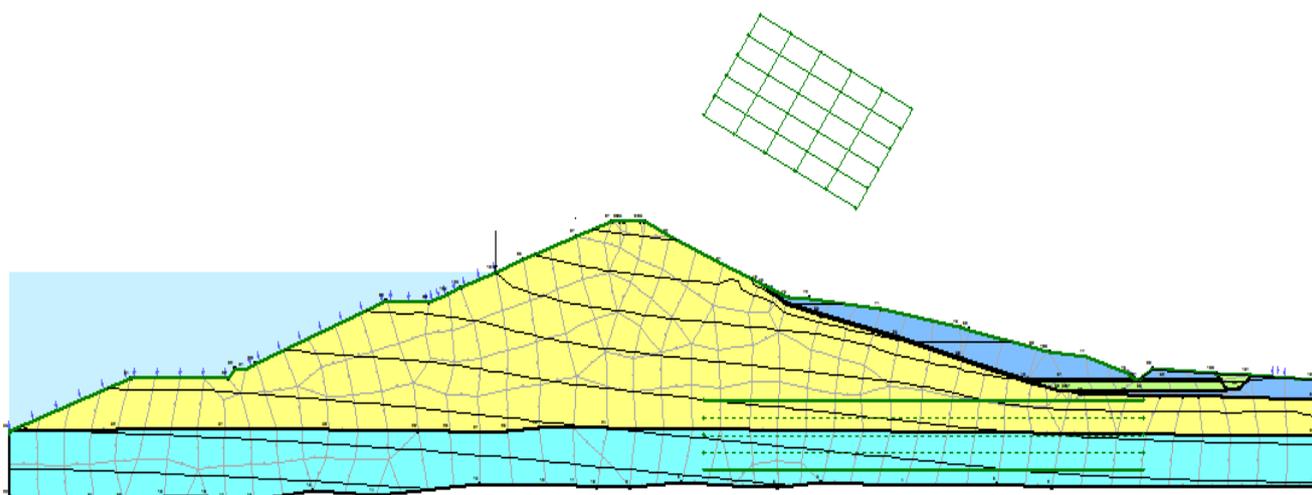


Figura 22. Sección para el deslizamiento de taludes con nivel de agua de 37.5 msnm.

Tabla 10. Coordenadas de los puntos de la reja y el radio para los círculos de falla para un nivel de agua de 37.5 msnm.

<b>Puntos de la esquina de la reja</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>
Superior izquierdo	133	54
Inferior izquierdo	123	41
Inferior derecho	150	29
Incrementado	5	5
<b>Puntos de la esquina del radio</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>
Superior izquierdo	123	4
Inferior izquierdo	123	-5
Superior derecho	201	4
Inferior derecho	201	-5
incrementado	4	

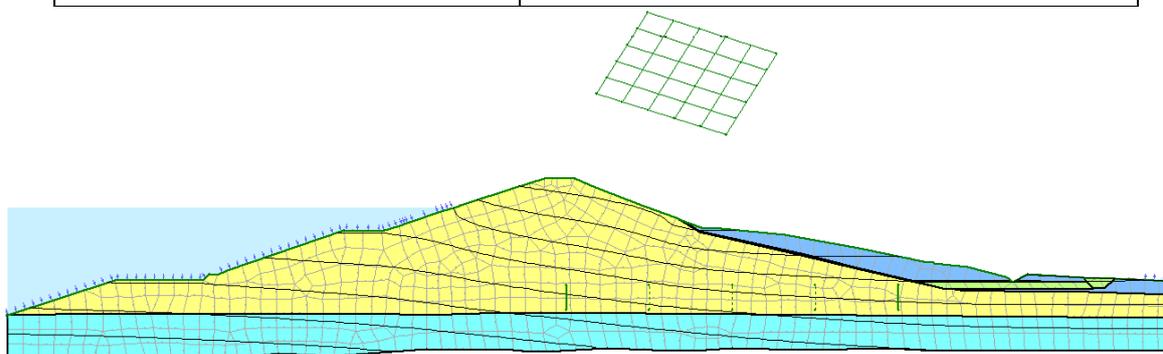


Figura 23. Sección para el deslizamiento de taludes con un NAN de 39 msnm.

Tabla 11. Coordenadas de los puntos de la reja y el radio para los círculos de falla para un NAN de 39 msnm.

<b>Puntos de la esquina de la reja</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>
Superior izquierdo	127.123	60.503
Inferior izquierdo	117.041	44.227
Inferior derecho	142.792	36.028
Incrementado	5	5
<b>Puntos de la esquina del radio</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>
Superior izquierdo	111	1
Inferior izquierdo	177	1
Superior derecho	111	6
Inferior derecho	177	6
incrementado	4	

## 2.9 Conclusiones parciales

- 1) Son definidos los parámetros relacionados al proceso de filtraciones que condicionan el comportamiento de la LCS en el cuerpo de la estructura al paso del agua por la cortina de la presa.
- 2) El estudio realizado a partir de las particularidades de los métodos de análisis de estabilidad de taludes mencionados en el capítulo, permite apreciar que los mismos se basan fundamentalmente en realizar el análisis utilizando la superficie circular como superficie de falla y a partir de ahí definir todas las fuerzas que actúan en cada dovela para llegar a determinar la estabilidad del talud como toda su estructura.
- 3) Se define una metodología para la inspección de estas obras hidráulicas, desglosada y explicada por etapas, que puede emplearse para cualquier otra obra en específico, poniendo al servicio de la empresa este documento, con el cual no contaban para inspeccionar de forma periódica sus embalses.

---

## **CAPÍTULO III: Análisis de la modelación de la cortina de la presa Zaza**

### **3.1 Caracterización del dominio para la modelación y de la zona de estudio**

Una vez seleccionada la sección típica transversal de la obra que define la zona de interés y la estrategia de integración de la información en el área de estudio, se determina el proceso de redistribución de las tensiones para el comportamiento de la sección típica correspondiente al área de estudio

De manera que la zona de estudio se considera ingenierilmente por el autor para ejecutar el modelo, solo para la sección transversal correspondiente al centro del área de estudio, dado que la geometría es prácticamente igual en las secciones de los dos extremos restantes, al no existir cambios de pendiente en los taludes o diferentes tipos de material en las secciones transversales.

### **3.2 Modelación y secuencia de análisis para interpretar los resultados**

Para darle respuesta ingenieril a las principales afectaciones encontradas en el embalse Zaza, mencionadas anteriormente en el capítulo 2 se realizó la modelación de la sección típica de la cortina donde se ponen de manifiesto los problemas de filtraciones y estabilidad de taludes. Para ello está compuesto por una serie de subprogramas integrados en uno solo para conformar un solo paquete tecnológico en dependencia del uso e interrelación que se pretenda alcanzar, el cual permitirá hacer comparaciones entre los principales métodos de análisis de estabilidad de taludes para posteriormente arribar a conclusiones.

Este programa tiene una base matemático-física fundamentada donde su algoritmo de trabajo permite que el sistema parta de un estado tensional inicial y por sucesivos incrementos internos de la carga se alcanzan valores límites que pueden ser o no admisibles al realizar la comparación con el comportamiento en el terreno. Además, este módulo cuenta con un preprocesador para introducir todos los datos y seleccionar geometría, modelos, etc. y un post-procesador que brinda la

información referente a cada incremento de carga en cuanto a tensión y deformación en dependencia del interés del operador y del dominio que posea en el uso de esta herramienta computacional.

Posteriormente con el uso del programa SEEP/W se analizó la curva de filtración y las redes de flujo dentro de la cortina, con el objetivo de obtener el comportamiento de las mismas y poder conocer el gasto de agua aproximado que fluye por el interior de la estructura y el comportamiento del material empleado en el modelo en condiciones de semi-saturado y saturado, para los distintos niveles de agua.

Luego se analizó la estabilidad de los taludes en suelos heterogéneos con el uso del programa SLOPE/W basado en la aplicación de métodos numéricos que incluye el análisis del método sueco, por diversos métodos antes mencionados en el presente capítulo. Presentando una misma secuencia para un nivel de agua en las que aparece la patología en la figura 24 según los parámetros físico-mecánicos de los materiales utilizados en la cortina del embalse.

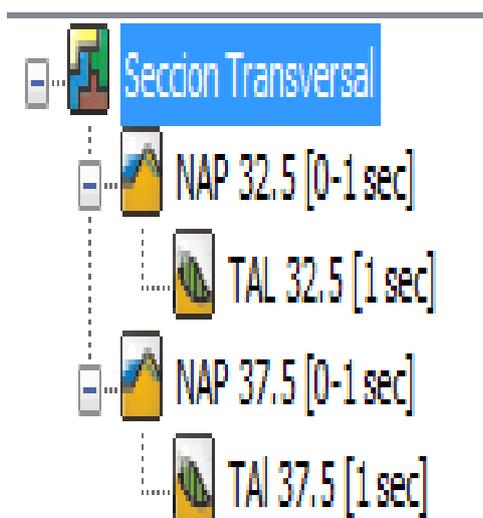


Figura 24. Esquema de modelación empleado en el estudio del embalse Zaza mediante el programa computacional GeoStudio 2007

### 3.3 Resultados alcanzados en las modelaciones para el cálculo de la LCS

Para el análisis de los resultados de los niveles de agua se determinará la LCS en el cuerpo de la cortina basada en las formulaciones por el Método de Elementos Finitos (MEF) y en el Método de Cálculo de Casagrande, estimando el comportamiento de la curva de filtraciones como se muestra en la figura 25, la cual nos expresará el funcionamiento de la LCS con el sistema de drenaje en perfecto estado y posteriormente se ilustrará la misma con dicho sistema en mal funcionamiento ilustrado en la figura 26, todo ello para un nivel de aguas normales de 32.5 msnm siendo este nivel en el cual los especialistas que siguen la vida de la presa comenzaron a encontrar las filtraciones.

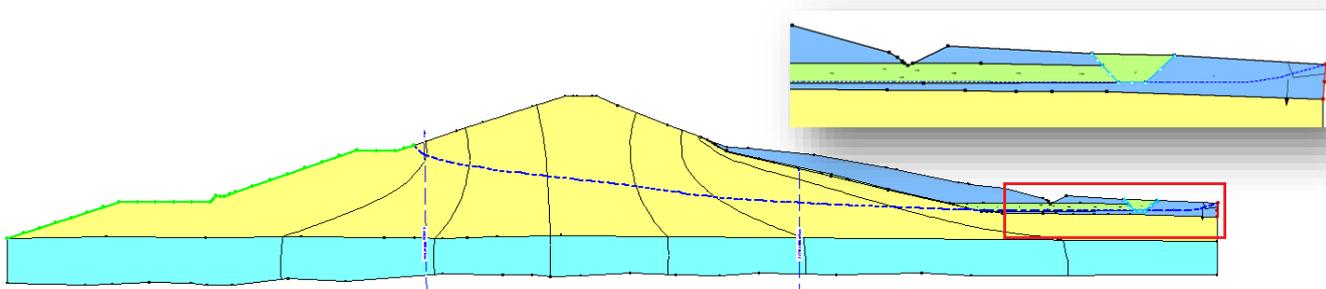


Figura 25. Resultados de la modelación de la LCS para un nivel de agua de 32.5 msnm. Drenaje en perfecto estado.

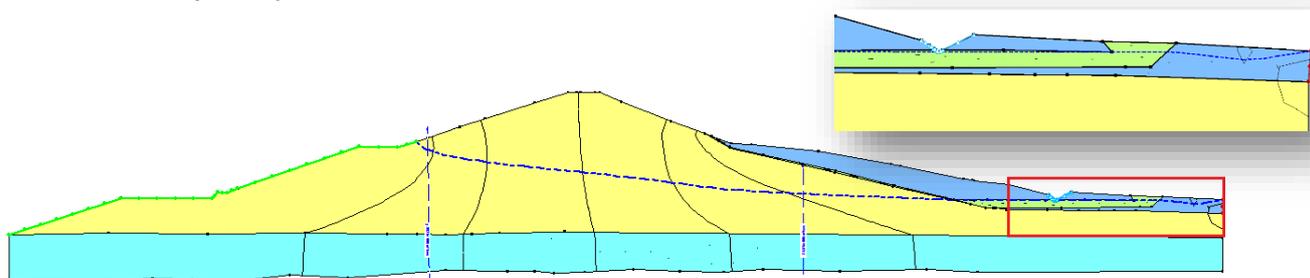


Figura 26. Resultados de la modelación de la LCS para un nivel de agua de 32.5 msnm. Drenaje obstruido.

Leyenda.

↑  
| - Calas de control del caudal que pasa por el interior de la cortina.

Al igual que en el caso anterior se realizará el análisis para cuando el embalse se encuentra a un nivel de 37.5 m, lo que significaría un aumento progresivo de la línea de corriente superior en la zona del filtro. De igual manera se simulará para un buen

funcionamiento de los drenes como muestra la figura 27 y para cuando estos no están funcionando en su totalidad, figura 28.

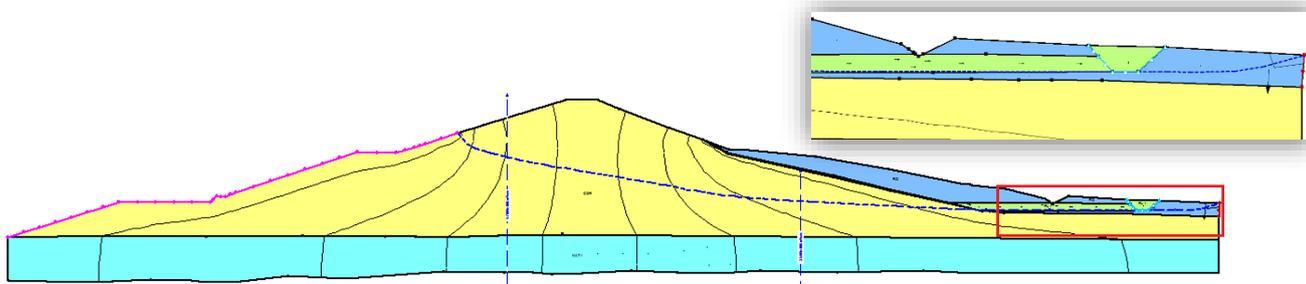


Figura 27. Resultados de la modelación de la LCS para un nivel de agua de 37.5 msnm. Drenaje en perfecto estado.

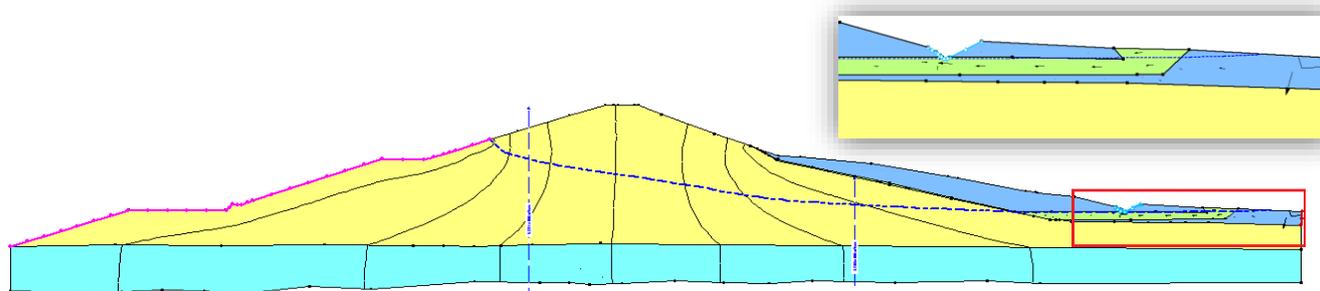


Figura 28. Resultados de la modelación de la LCS para un nivel de agua de 37.5 msnm. Drenaje obstruido.

Una vez comprobado en los casos anteriores se necesitó saber el comportamiento del agua para cuando el embalse se encuentra en su nivel de aguas normales, es decir, para cuando el agua se encuentra a 39 m, como se mostrará en la figura 29.

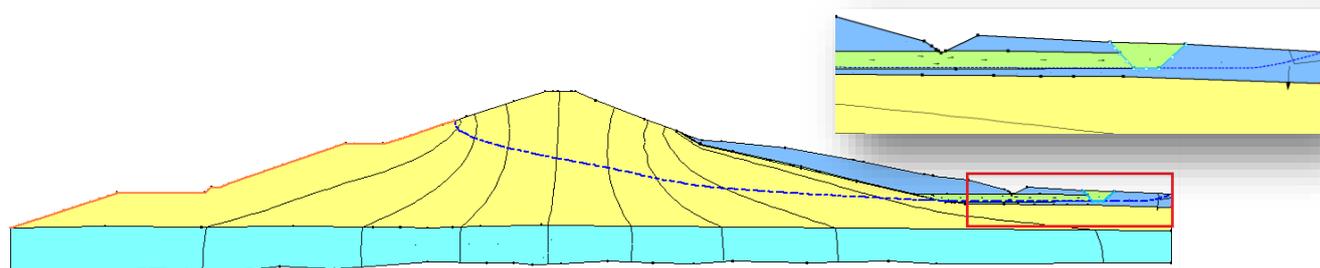


Figura 29. Resultados de la modelación de la LCS para un nivel de agua de 39 msnm. Drenaje en perfecto estado.

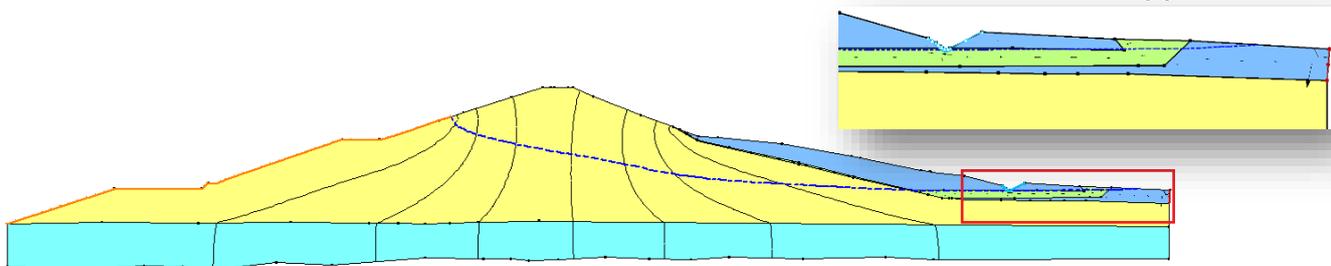


Figura 30. Resultados de la modelación de la LCS para un nivel de agua de 39 msnm. Drenaje obstruido.

Se puede observar con claridad para los tres niveles de agua, el aumento de la línea de corriente superior en la zona afectada una vez obstruidos los drenes, y como el agua busca la salida por el canal colector de aguas pluviales. También podemos apreciar el cambio de caudales en su interior a través de las calas de control cuyos datos serán expuestos a continuación en la tabla 12, y como es progresivo el aumento del caudal de salida en las canaletas de aguas pluviales como se muestra en la tabla 13.

Tabla 12. Control de los caudales internos en el interior de la cortina para distintos niveles del agua.

Nivel del agua	Drenes	Secciones de control
32.5 msnm	En buen estado	$4.445 * 10^{-6} \text{m}^3/\text{s}$
		$2.779 * 10^{-6} \text{m}^3/\text{s}$
	Mal estado	$3.985 * 10^{-6} \text{m}^3/\text{s}$
		$2.477 * 10^{-6} \text{m}^3/\text{s}$
37.5 msnm	En buen estado	$5.700 * 10^{-6} \text{m}^3/\text{s}$
		$3.549 * 10^{-6} \text{m}^3/\text{s}$
	Mal estado	$5.221 * 10^{-6} \text{m}^3/\text{s}$
		$3.236 * 10^{-6} \text{m}^3/\text{s}$
39 msnm	En buen estado	$6.090 * 10^{-6} \text{m}^3/\text{s}$
		$6.090 * 10^{-6} \text{m}^3/\text{s}$
	Mal estado	$5.601 * 10^{-6} \text{m}^3/\text{s}$
		$5.601 * 10^{-6} \text{m}^3/\text{s}$

Junto con la modelación se determinó posteriormente cuanto era el caudal de salida del agua por las canaletas de aguas pluviales.

Tabla 13. Caudal de salida en las canaletas de aguas pluviales.

Nivel de agua	Caudal de salida
32.5 msnm	$3.981 * 10^{-6} \text{m}^3/\text{s}$
37.5 msnm	$5.209 * 10^{-6} \text{m}^3/\text{s}$
39 msnm	$5.601 * 10^{-6} \text{m}^3/\text{s}$

### 3.4 Resultados alcanzados en la modelación para deslizamiento de taludes

Para el análisis de la modelación para el deslizamiento de taludes se trabajó con la misma sección antes empleada, la simulación se realizó para los distintos autores comprendidos en el programa (Bishop, Janbu, Morgenstern-Price y el ordinario) y para los distintos niveles de agua, al igual que en el apéndice anterior para un buen funcionamiento de los drenes y cuando estos estén en mal estado siendo este último el caso real para las condiciones en las que se encuentra la cortina.

Posteriormente se destacarán los resultados de la modelación para cuando el nivel de agua se encuentra a 32.5 msnm mostrado en la figura 31 y la figura 32 respectivamente simulado para las dos condiciones en las que encontramos los drenes.

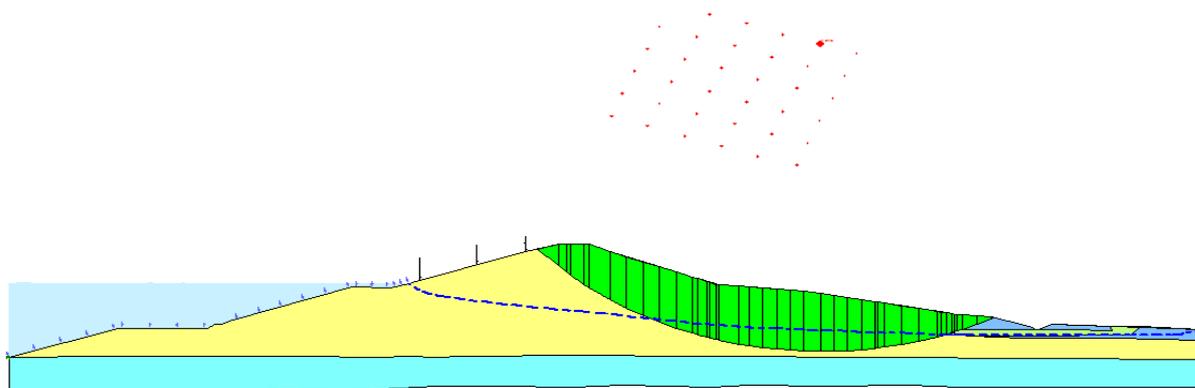


Figura 31. Representación gráfica de las fallas del talud para un nivel de 32.5 msnm con los drenes en buen estado.

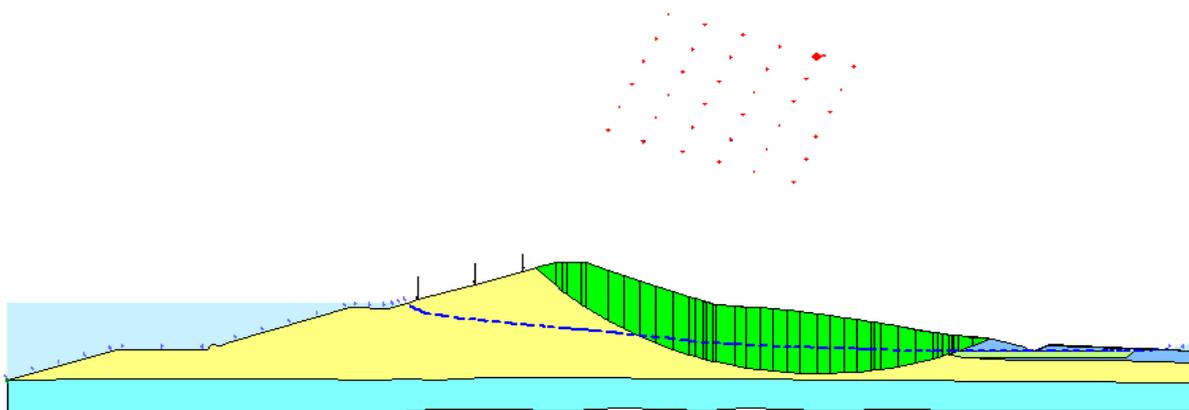


Figura 32. Representación gráfica de las fallas del talud para un nivel de 32.5 msnm con los drenes obstruidos.

Las modelaciones antes presentadas se simularon para el método de Morgenstern-Price, al realizarse las mismas por los demás metodologías muestran que el factor de seguridad no varía en cada caso por lo que no es necesario presentar las simulaciones para cada uno.

De lo planteado anteriormente se deduce, que la geometría adoptada para las secciones son lo suficientemente estables, pues no se encuentran posibles círculos de falla con factores de seguridad menores que los permisibles, ya que los valores de los factores de seguridad obtenidos son iguales o superiores a 1,5, considerado como el límite superior del valor permisible, lo que se relaciona con la construcción de la sobrecarga colocada en el talud aguas abajo de la cortina lo que aportó mayor seguridad a la sección. Se mostrarán en la tabla 14 algunos de los valores donde la sección es más vulnerable y señalando así el más crítico.

Tabla 14. Valores de factor de seguridad en los diferentes estado de la cortina para un nivel de agua de 32.5 msnm.

Nivel del agua	Drenes	Factor de seguridad	Coord. x	Coord. y	Radio
32.5 msnm	En buen estado	1.753	160.2	62.2	67.2
		1.590	162.6	67.6	72.6
		1.598	157.8	56.8	61.8
		1.610	165	73	78
		1.613	155.4	51.4	54.4
	En mal estado	1.701	157.8	75.4	73.9
		1.736	162.6	67.6	72.6
		1.738	165	73	78
		1.749	160.2	62.2	67.2
		1.760	157.8	75.4	80.4

Posteriormente se analizó la sección para un nivel de agua de 37.5 msnm, para los distintos casos en los que encontramos los drenes.

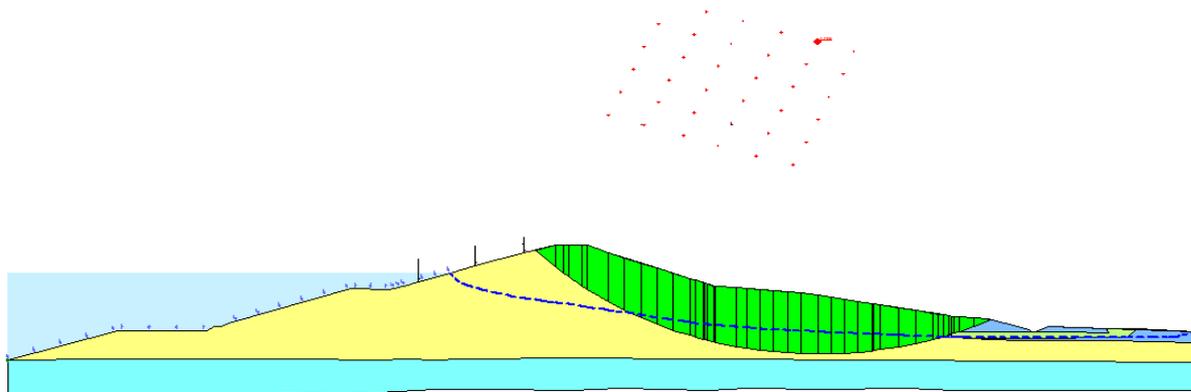


Figura 33. Representación gráfica de las fallas del talud para un nivel de 37.5 msnm con los drenes en buen estado.

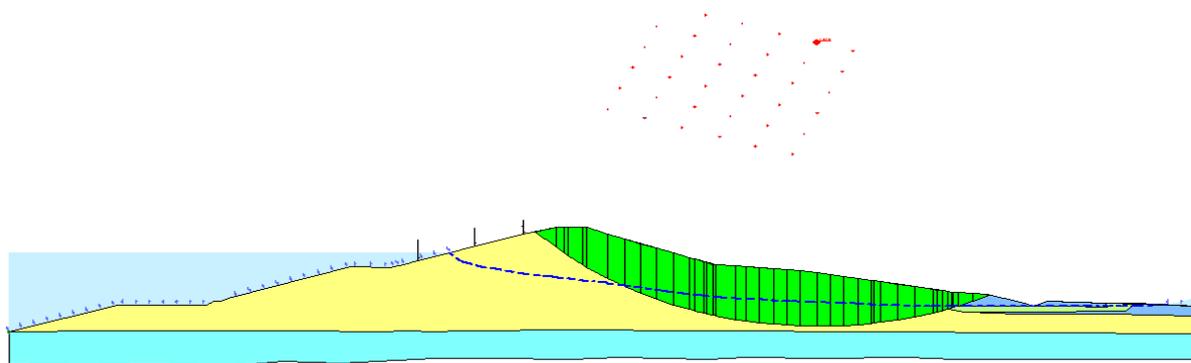


Figura 34. Representación gráfica de las fallas del talud para un nivel de 37.5 msnm con los drenes obstruidos.

A pesar de presentar un mayor nivel de agua la sección sigue siendo estable, pues el valor más crítico sobrepasa a 1.5, pero de igual manera los valores son más cercanos al límite superior del factor de seguridad. A continuación en la tabla 15 se presentaran algunos de los valores en los que son más críticas las fallas en la sección.

Tabla 15. Valores de factor de seguridad en los diferentes estado de la cortina para un nivel de agua de 37.5 msnm.

Nivel del agua	Drenes	Factor de seguridad	Coord. x	Coord. y	Radio
37.5 msnm	En buen estado	1.723	157.8	75.4	73.9
		1.758	162.6	67.6	72.6
		1.763	165	73	78
		1.770	160.2	62.2	67.2
		1.733	157.8	75.4	80.4
	En mal estado	1.670	157.8	75.4	73.9
		1.701	162.6	67.6	72.6
		1.704	165	73	78
		1.713	160.2	62.2	67.2
		1.719	157.8	75.4	80.4

En este caso se puede apreciar como el factor de seguridad disminuye cuando los drenes no están funcionando lo que presentaría algunas interrogantes para futuras investigaciones.

En la figura 35 se modeló la sección para cuando esta alcanza el nivel de aguas normales, es decir, para cuando está a 39 msnm.

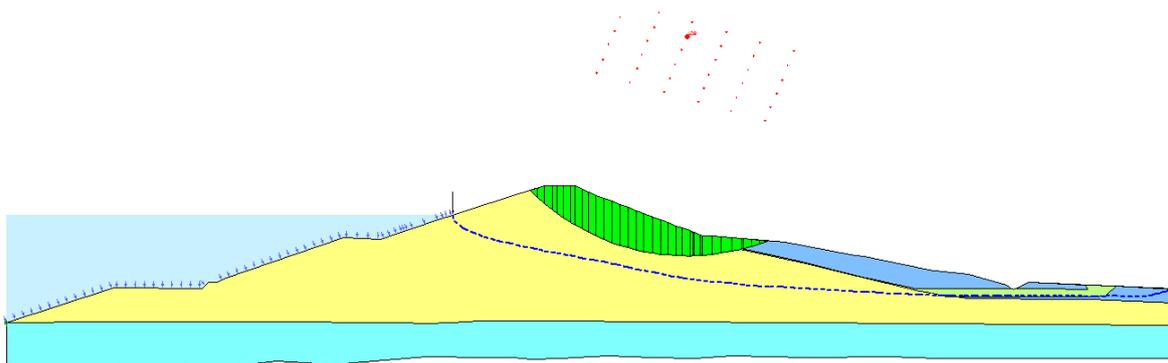


Figura 35. Representación gráfica de las fallas del talud para un nivel de 39 msnm con los drenes en buen estado.

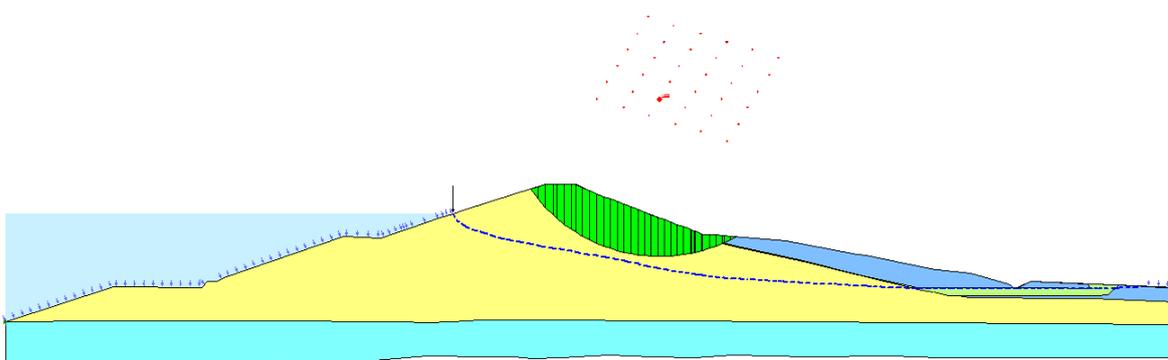


Figura 36. Representación gráfica de las fallas del talud para un nivel de 39 msnm con los drenes obstruidos.

Tabla 16. Valores de factor de seguridad en los diferentes estado de la cortina para un nivel de agua de 37.5 msnm.

Nivel del agua	Drenes	Factor de seguridad	Coord. x	Coord. y	Radio
	En buen estado	1.743	135.038	57.082	43.712
		1.755	148.318	53.236	52.682
		1.808	136.172	59.866	42.578
		1.836	39.411	49.592	39.339
		1.861	138.277	46.808	40.473

39 msnm	En mal estado	1.698	129.3558	44.203	31.142
		1.730	132.492	39.308	28.008
		1.749	135.407	123.969	41.593
		1.778	132.273	58.864	44.727
		1.807	131.374	47.458	29.126

Se le realizó la modelación para los diferentes métodos de estudio (ordinario, Bishop, Janbu, Morgenstern-Price) para cada nivel de agua en las distintas condiciones de los drenes, todo ello mostrado en el anexo 3.

A pesar de la disminución del Factor de Seguridad podemos apreciar que la cortina sigue siendo segura cuando se encuentra en su nivel de aguas normales, lo que le suministra al programa Geo-Studio la viabilidad para el presente trabajo de investigación.

## Conclusiones parciales del capítulo

- 1) En las modelaciones para los diferentes niveles de agua y para los diferentes estados de los drenes se puede apreciar como aumenta el nivel de la Línea de Corriente Superior en la Zona del filtro y como va disminuyendo el caudal que pasa por el interior de la cortina al encontrarse estos en mal estado.
- 2) Al realizar el análisis de la estabilidad de taludes para los diferentes escenarios se obtienen resultados que superan el valor normativo como criterio mínimo para el FS del talud, por lo que se ratifica como válida la solución ingenieril empleada en el talud aguas abajo de la cortina en el embalse Zaza.

---

## CONCLUSIONES GENERALES

Con el desarrollo del presente trabajo de diploma, basado en las experiencias anteriores y al ser esta una investigación de continuidad se proponen las siguientes conclusiones:

1. Se logró realizar una revisión bibliográfica detallada sobre el tema de investigación donde se encontraron diversos autores que han debatido con claridad lo relacionado con el análisis de la estabilidad estática e interna de cortinas de presas de tierra.
2. Se efectuó con la ayuda del programa computacional GEO-STUDIO los cálculos de la curva de filtración para los diferentes estados en los que se podrían encontrar los drenes, brindando la información del comportamiento del agua en la zona de los filtros y ver detalladamente su trayectoria hasta salir por las canaletas que recogen las aguas pluviales.
3. Quedó plasmado el nivel de la LCS y la salida del agua por las canaletas de drenaje pluvial una vez que dejaron de funcionar los drenes cuando se construyó la PCHE. y no por las zanjas colectoras previstas en el proyecto original.
4. Al modelar el proceso de la estabilidad de taludes se pudo apreciar cada uno de los valores del Factor de Seguridad destacándose consigo los más críticos en los diferentes estados, ya sea para distintos niveles de agua o con los drenes obstruidos y en buen estado. Se demostró como la sección sigue siendo estable pero es un argumento que no se puede dejar de seguir.

## **Recomendaciones**

- 1- Se deben restituir los drenes que se encuentran obstruidos por la construcción de la PCHE y la zanja colectora para la recogida de la aguas de filtración.
- 2- Se debe mantener una estrecha vigilancia del comportamiento de la LCS.

## Bibliografía:

- ARROYO, X. L. Y. V. 1 de febrero 2011. Impacto de fuerzas de filtración y tubificación retrograda a la inestabilidad de talud y erosión hídrica. . 12, 11.
- CONCEPCIÓN, D. R. C. 2013. *Aplicación de una Pared en Suelo para Solucionar Filtraciones en Presas de Tierra (Caso de Estudio: Presa Zaza)*. pre grado, Universidad Central “Marta Abreu” Las Villas.
- FLORES, M. Á. T. 2009. *Evaluación de Filtraciones en Presas. Modelación Numérica de Flujos en Medios Porosos Saturados y no Saturados*. Universidad de Chile Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Ingeniería Civil
- GIL, I. L. A. 1998. *La estabilidad de cortinas de presa de tierra mediante la deformación de los estado tenso-deformacionales y la aplicación de la teoría de seguridad*. Doctoral, Universidad Central Marta Abreu de las Villas.
- HDEZ, A. A. A. 2016. *Evaluación Dinámica del Talud Aguas Abajo de la Presa Zaza*. Universidad Central Marta Abreu de las Villas.
- JACINTO, E. R. S. *Estabilidad de Taludes en Presa de Tierra y Enrocamiento*. Pre-grado, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura
- JULIAN, A. H. 2014. *Metodología para el análisis de estabilidad de taludes*. Trabajo de Diploma, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.
- MSC. ING. NELDO SAN ROMÁN PÉREZ, E. S. P. E. I. O. R. A. Santa Clara, Noviembre de 2014. *FILTRACIONES PRESA ZAZA 1*.
- NAVARRO, C. T. Informe Técnico, CIMNE IT-591, Noviembre 2009 ANÁLISIS NUMÉRICO DEL PROCESO DE FILTRACIÓN EN PRESAS DE ESCOLLERA 1, 117.
- NOVOA, M. I. R. A. Habana 1990. Cuba. . *CRITERIOS PARA DISEÑAR PRESAS DE TIERRA: PRIORIDAD Y SECUENCIA* Ingeniería Civil. ISPJAE. .
- PÉREZ., I. T. D. 2000. SOLUCIÓN FILTRACIONES MARGEN IZQUIERDA PRESA ZAZA. *DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA GEOLÓGICA*, 1, 174.
- ROLANDO ARMAS NOVOS, E. H. M. 1987. Presa de tierra. *In: ISPAJE* (ed.).
- SENTMANAT, A. V. 2016. *Análisis de las filtraciones y la estabilidad de taludes en presas de tierra*. Pre grado, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.
- ULLOA, G. D. L. C. M. 2016. *Evaluación de Riesgos y Simulación de Soluciones Técnicas para Filtraciones en presas*. Pre Grado, Universidad Central “Marta Abreu” de laVillas.
- VALDEZ, I. A. B. 2010. *Evaluación de las patologías existentes en una obra Hidráulica: Caso de Estudio Embalse “Palmarito”*. Trabajo de Diploma, Universidad Central “Marta Abreu” Las Villas.
- YERA., I. E. M. D. P. T. H. 2001. *INVESTIGACIÓN FILTRACIONES MARGEN IZQUIERDA PRESA ZAZA. SEGUNDA ETAPA*.

## Anexos

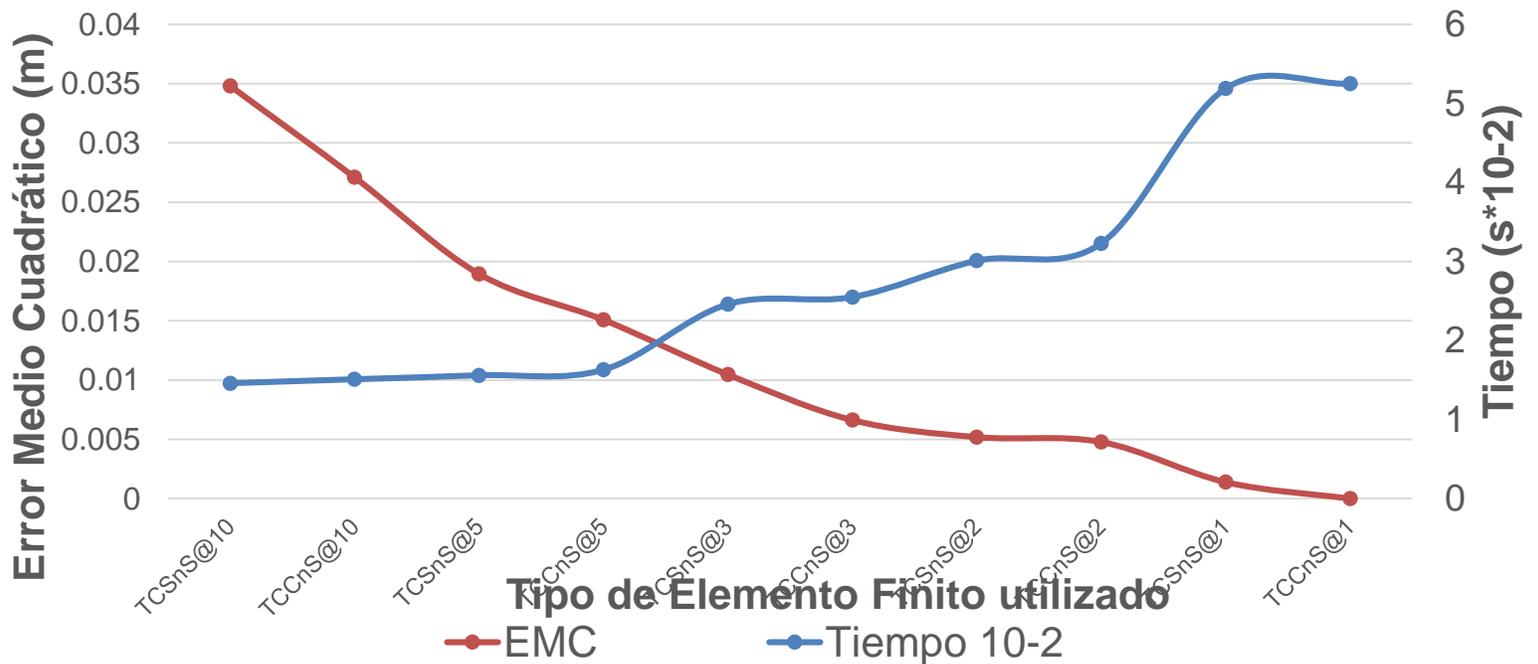
Anexo 1. Diferentes tipos de falla según (Novoa, Habana 1990. Cuba. )

Tipo de Falla	Características	Procedencia	Consecuencia	solución
<b>Fallas por rebase de la cortina.</b>	Desborde del agua por encima de la cortina y escurre por el talud aguas abajo.	Ocurre generalmente por una mala estimación del gasto correspondiente a la avenida máxima.	Erosión y ocurre generalmente por una mala estimación del gasto correspondiente a la avenida máxima.	Realizar estudios sistemáticos de cuencas y escurrimientos prolongados, prevención del recrecimiento de la cortina, colocación de bermas aguas arriba y debajo de la presa.
<b>Fallas por sifonamiento mecánico.</b>	Cuando el agua fluye a través del suelo, generando fuerzas erosivas que tienden a empujar las partículas arrastrándolas en la dirección de flujo.	Existen en la masa del suelo, en lugares en que se concentra el flujo de agua y donde la velocidad de filtración es mayor.	Particularmente críticos en lo referente a posibilidades de arrastre de partículas sólidas, provocando pequeños canales por los que el agua circula a mayor velocidad, aumentando siempre el diámetro de los canales ya formados hasta el colapso del borde.	Utilizar métodos de investigación que permitan detectar el tipo desuelo.
<b>Fallas por agrietamiento.</b>	Causados por asentamientos diferenciales en la cortina de la presa con la aparición de grietas y fisuras no muy grandes en la masa de tierra.	Se origina cuando la deformación de la cortina produce zonas de tracción, sea por deformación del propio cuerpo del terraplén o del terreno de cimentación.	Deformación y colapso en toda la zona del agrietamiento.	Utilizar suelos plásticos en la medida delo posible, $I_p \geq 15\%$ , compactarlos mismos con energías de compactación bajas, similares a las del Proctor Estándar
<b>Fallas por sismo.</b>		Principalmente producidas por licuación, movimiento sísmico en dirección transversal al eje de la cortina, temblores de tierra o grietas longitudinales en la corona de la cortina.		En zonas sujetas a actividad sísmica es preciso tener en cuenta los efectos que se producirán en la estabilidad de la presa, si se llegara a manifestar un fenómeno de dicha naturaleza. Existen procedimientos de cálculo para determinarla influencia de un sismo en la estabilidad de una presa.

Anexo 1. Discretización para un punto de la sección y margen de error para cada mallado.

Tipo de maya	Tamaño de la maya (m)	Tiempo $10^{-2}$	X	Y	Dif X	Dif Y	EMC
TCSnS@10	10	1,46	-0,00385809	0,034706821	-0,003560179	-0,03462373	0,034806281
TCCnS@10	10	1,51	-0,00057478	0,027179913	-0,00027687	-0,02709682	0,027098232
TCSnS@5	5	1,56	-0,005079426	0,018421516	-0,004781516	-0,01833842	0,018951532
TCCnS@5	5	1,63	-0,000315757	0,015164855	-1,78465E-05	-0,01508176	0,01508177
TCSnS@3	3	2,46	-0,006214089	-0,00871642	-0,005916179	-0,00863332	0,010465919
TCCnS@3	3	2,55	-0,004876014	0,004873622	-0,004578104	-0,00479053	0,006626324
TCSnS@2	2	3,01	-0,001807915	0,005050255	-0,001510005	-0,00496716	0,005191607
TCCnS@2	2	3,23	-0,004784199	0,001741587	-0,004486288	-0,00165849	0,00478303
TCSnS@1	1	5,19	-0,001558665	0,000675435	-0,001260755	-0,00059234	0,001392971
TCCnS@1	1	5,25	-0,00029791	-8,30959E-05			0

Curvas de error vs tipo de elemento vs tiempo.



Anexo 3. Factor de seguridad para los diferentes tipos de métodos.

<b>NA</b>	<b>Método</b>	<b>Drenes</b>	<b>Factor de Seguridad</b>
32.5 msnm	ordinario	Buen estado	1.575
		Mal estado	1.520
	Bishop	Buen estado	1.753
		Mal estado	1.701
	Janbu	Buen estado	1.580
		Mal estado	1.532
	Morgenstern-Price	Buen estado	1.754
		Mal estado	1.701
37.5 msnm	ordinario	Buen estado	1.538
		Mal estado	1.534
	Bishop	Buen estado	1.723
		Mal estado	1.669
	Janbu	Buen estado	1.549
		Mal estado	1.501
	Morgenstern-Price	Buen estado	1.723
		Mal estado	1.670
39 msnm	ordinario	Buen estado	1.526
		Mal estado	1.513
	Bishop	Buen estado	1.743
		Mal estado	1.698
	Janbu	Buen estado	1.544
		Mal estado	1.532
	Morgenstern-Price	Buen estado	1.743
		Mal estado	1.698