

**U**niversidad  
**O**riente



## TRABAJO DE DIPLOMA

**TÍTULO:** Estudio de las filtraciones en la Presa Cauto del Paso.

**Autor:** Yurianna Velázquez Ramírez.

Tesis presentada en opción al Título de Ingeniero Hidráulico

### Tutores:

Msc: Pedro Manuel Cabrera Castro.

Ing. Hubert Mauricio Socarrás Pérez.

Junio, 2019

***PENSAMIENTO***

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

***Theodore von Karman***

# **DEDICATORIA**

***A mis padres:***

***En especial a mi hermosa madre por ser más que una madre, padre y amiga; dedicarme tantos años de su vida e inculcarme buenos valores; por apoyarme en todo sin enojarse y demostrarme que siempre podemos ser mejores incluso cuando estamos en presencia de las adversidades de la vida Zaida Ramírez Ramírez.***

***A mi papá por inculcarme que, aunque el camino es largo no me rinda porque el esfuerzo siempre es retribuido, Manuel Velázquez Ginarte***

***Mi hermana Arianna Arias Ramírez por ser el mejor regalo que la vida me dio; siempre mi segunda madre y pilar fundamental en mi camino; nunca dejó de alentarme y apoyarme sobre todo en mi formación vocacional.***

## **AGRADECIMIENTOS**

**A Dios por darme la fuerza para continuar en la larga faena y no dejarme rendir cuando el camino se torna muy difícil.**

**A mi heroína Zaida Ramírez Ramírez por ser más que una madre y estar siempre con una sonrisa y sus brazos para mí, a pesar de mucho sacrificio todos estos años. Y a mi papá Manuel Velázquez por no dejar de confiar en mí.**

**A mi hermana Arianna Arias Ramírez por conformar una columna fundamental en mi vida, a mis sobrinas Claudia Isabela y Lía Amanda por impulsarme a ser mejor cada día.**

**A Raúl Verdecia por tantas horas de esfuerzo y paciencia durante el transcurso del desarrollo del trabajo de diploma.**

**Al claustro de profesores que de una manera u otra han contribuido con mi formación vocacional, en especial a Onel Pérez Hernández y Alain Peneque Martínez por guiarme desde el principio de mis estudios en la universidad.**

**A mis tutores Pedro Cabrera Castro y Hubert Socarrás Pérez por dedicarme tiempo y mucha paciencia.**

**A mis amigos y compañeros que sin ellos no hubiese podido continuar Lianyi, Yariagnis, Yisel, Yailen, Pedro Luis, Yoan, Marcos, Yudit, Surelis, Dayalis, Diosbel, Axel, Roxana, Raisa, Mailen y en especial con mucho cariño más que amigo familia por contribuirme y apoyarme muchos años William Jiménez.**

**A toda mi familia y esas personas especiales que de una manera u otra me han ayudado en todo a Lourdes Balgas, Lourdes Correa, Diana Jiménez, Neida Correa, Litze Correa, Aracelis Quintana y Francisco Martínez, Lisandra Tamayo, Leusnier Martínez, en fin, a todos muchas gracias, por estar ahí para mí cuando más los necesité.**

## **RESUMEN**

En Cuba la necesidad de la acumulación de agua en períodos secos y la abundancia en los húmedos condujo a evolucionar en la construcción de las presas de tierra con materiales locales, paso fundamental en el avance de la Ingeniería Hidráulica. Durante el período de explotación algunas de estas presas presentan afectaciones de filtraciones que ponen en peligro su estabilidad. En la provincia Granma; la Presa Cauto del Paso se ha visto afectada desde los primeros años de su construcción; ocurrieron deslizamientos y se obstruyeron los piezómetros instalados; desconociendo la línea de corriente superior (LCS), y el gasto de filtración que atraviesa el cuerpo de la cortina.

En el presente trabajo se realiza un estudio de las filtraciones identificadas en estas presa, a partir de obtener la LCS mediante el método de Arthur Casagrande y el análisis de estabilidad de taludes por los métodos de Bishop y Chugaev para comprobar los factores de seguridad, con el apoyo de una hoja de cálculo de Excel. Finalmente se realizaron estudios químicos a muestras de agua, tomadas en diferentes puntos del embalse para analizar posible lavado de material, poniendo de manifiesto la presencia de lavado de suelo en la presa. Los factores de seguridad obtenidos no indican peligro eminente de que ocurra deslizamiento.

## **ABSTRACT**

In Cuba the need for the accumulation of water in dry periods and the abundance in wet ones led to evolve in the construction of earth dams with local materials, a fundamental step in the advance of Hydraulic Engineering. During the period of exploitation, some of these dams show affectations of leaks that endanger their stability. In the Granma province; the Cauto del Paso Dam has been affected since the first years of its construction; landslides occurred and the installed piezometers were clogged; ignoring the upper current line (LCS), and the filtration expense that goes through the body of the curtain.

In the present work a study of the filtrations identified in these prey is made, from obtaining the LCS by means of the method of Arthur Casagrande and the analysis of stability of slopes by the methods of Bishop and Chugaev to verify the factors of security, with the support of an Excel spreadsheet. Finally, chemical studies were carried out on water samples taken at different points in the reservoir to analyze possible material washing, revealing the presence of soil washing in the dam. The safety factors obtained do not indicate an eminent danger of slippage occurring.

## ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I: Estado del arte sobre filtraciones y estabilidad en presas de tierra.....	6
1.1 La Ingeniería Hidráulica y las presas de tierra.....	6
1.2 Fallas en presas de tierra. Generalidades.....	9
1.2.1 Fallas por estabilidad de taludes.....	9
1.2.2 Fallas durante la construcción.....	10
1.2.3 Fallas durante la explotación del embalse.....	11
1.2.4 Fallas por desembalse rápido. ....	11
1.2.5 Fallas por licuación .....	12
1.2.6 Fallas por pérdidas por filtración .....	12
1.2.7 Las fallas por Sifonamiento.....	13
1.3 Evolución histórica del estudio de las filtraciones. ....	13
1.3.1 Estudio de las filtraciones en cortinas de materiales locales. ....	13
1.3.2 Efecto del flujo sobre la estabilidad de taludes.....	16
1.3.3 Teoría de la línea de corriente superior (LCS) (Condiciones de entrada y salida). 17	
1.3.4 Métodos para la determinación de la Línea de Corriente Superior (LCS).....	18
1.3.4.1 Solución de Dupuit.....	18
1.3.4.2 Solución de Schaffernak y Van Iterson.....	19
1.3.4.3 Solución de Kozeny .....	20
1.3.4.4 Solución Arthur Casagrande .....	20
1.4 Medidas o soluciones técnicas contra las filtraciones en presas de tierra.....	22
1.4.1 Drenajes .....	22
1.4.2 Prisma de piedra.....	22
1.4.3 Colchón de drenaje.....	22
1.4.4 Drenaje de franja .....	22
1.4.5 Drenaje central .....	23
1.4.6 Filtros.....	23
1.5 Evolución histórica del estudio de la estabilidad de taludes en presas de tierra.....	24

1.5.1 Generalidades de los métodos de análisis de estabilidad de taludes .....	27
1.5.2 Métodos teóricos para el estudio de la estabilidad de taludes en presas de tierra.	28
1.5.2.1 Método sueco o de las dovelas. Generalidades. ....	28
1.5.2.2 Método sueco o de las dovelas (Fellenius).....	29
1.5.2.3 Método de Bishop Simplificado.....	31
1.5.2.4 Método de Chugaev.....	32
1.5.2.5 Método de Janbu.....	32
1.5.2.6 Método de Spencer.....	33
1.6 Muestreo químico de las filtraciones en la Presa Cauto del Paso.....	34
CAPÍTULO II: Características de la Presa Cauto del Paso y Métodos de cálculo. ....	36
2.1 Principales características de la presa.....	36
2.2 Métodos de cálculo.....	41
2.2.1 Solución de Arthur Casagrande para la Línea de Corriente Superior (LCS).....	41
2.2.2 Métodos de Bishop y Chugaev para la estabilidad de taludes.....	43
2.3 Análisis químicos de filtraciones en la Presa Cauto del Paso.....	47
CAPÍTULO III. Análisis de los resultados .....	49
3.1 Línea de Corriente Superior (LCS). ....	49
3.2 Estabilidad de taludes .....	50
3.3 Resultados de los análisis químicos a las muestras de agua. ....	52
CONCLUSIONES.....	54
RECOMENDACIONES.....	55
BIBLIOGRAFÍA.....	56
ANEXOS.....	58

## INTRODUCCIÓN

Las presas de tierra y la práctica de la ingeniería asociada a estas, han jugado un papel importante en la historia de la civilización, permitiendo al hombre equilibrar en parte, la irregular distribución espacial y temporal del agua en el planeta, contribuyendo al desarrollo a partir de sus múltiples propósitos, como regulación de avenidas, generación de energía eléctrica, acumulación de agua para riego, control de inundaciones, desarrollo de la pesca, turismo y navegación, suministro de agua a la población, la agricultura e industrias, e incluso la incorporación de espacios para la recreación. Estas obras de vital importancia han evolucionado hacia estructuras de retención cada vez más altas, que han dado lugar a su vez a embalses más voluminosos. Esta situación genera, sin lugar a dudas, un factor de riesgo para vidas y bienes de quienes habitan aguas abajo.

El desarrollo y la gran explotación de los recursos naturales han traído como consecuencia el agotamiento de estos recursos y por lo tanto la necesidad de nuevas fuentes alternativas de energías, de ahí el creciente desarrollo de la hidroenergía.

Las presas de tierra están compuestas por varios objetos de obras que trabajan en conjunto, el aliviadero, obra de toma y obras para evitar o mitigar los efectos de las filtraciones, así como pared de suelo. En su construcción se utiliza una amplia gama de materiales que van desde arcillas, hormigón armado, hasta materiales artificiales como el PVC, estos aseguran la durabilidad de la obra y un buen funcionamiento de las mismas.

En Cuba a partir del triunfo de la Revolución se lleva a cabo el programa de la Voluntad Hidráulica planteado por el comandante en Jefe Fidel Castro Ruz, que asegura el empleo eficiente y ordenado de los recursos hídricos. Dando cumplimiento a esto se comienzan las labores de construcción de varias obras hidráulicas para diversos fines, fundamentalmente las presas de tierra.

Al igual que en otros países tropicales, en nuestro país las cortinas de las presas de tierra se construyen de materiales locales ya que las condiciones lo permiten, además del ahorro de materiales, de tiempo y otros recursos, disminuye así el tiempo de ejecución de la obra, además la ventaja de la utilización de los materiales

excavados en el aliviadero y otras estructuras, este tipo de material de construcción favorece la aparición de filtraciones a través de los estratos compactados que pueden o no ser de interés según las afectaciones que presenten.

Las cortinas de materiales locales por lo general tienen buena estabilidad, presentando taludes tendidos a ambos lados del eje. Pero la posibilidad de que se produzca un fallo existe aun teniendo en cuenta los requisitos de seguridad desde la etapa de planeamiento, ejecución y explotación.

Según el tipo de material local utilizado en la cortina y sus características físico-químicas, varían de uno a otro los parámetros óptimos para el trabajo, la compactación y la humedad del terreno juegan un papel fundamental durante la ejecución de la obra de materiales locales en la reducción del índice de poros, especificándose una humedad por encima de la óptima y una compactación mayor que el 95%.

De no cumplir con estos parámetros puede producirse un proceso de filtración importante a través de la masa de suelo que forma la cortina, conllevando al arrastre de partículas sólidas que en caso de no recibir la debida atención pueden llegar a ser el causante del fallo de la obra, la pérdida de vidas humanas y ocasionar grandes afectaciones a la economía.

Las filtraciones son las causantes del sifonamiento químico o mecánico que es una de las principales causas de los fallos catastróficos en cualquier tipo de presa, por eso es de gran importancia su control de modo sistemático, que no es más que la vigilancia técnica de la obra.

La Presa Cauto del Paso está situada en la provincia Granma a 30 km al noroeste de la ciudad de Bayamo, en la Cuenca Cauto, en la confluencia de los ríos Bayamo y Cauto, es una zona llana en la formación geológica Cauto, con características típicas de arcillas-arenosas, arcillas pesadas, arcillas limosas y muy cambiantes en su estratificación, existen también bolsones de arena. Destinada fundamentalmente al riego en la agricultura.

Esta presa fue construida entre 1988 y 1992, es la tercera del país por su capacidad de almacenamiento de 333 millones de metros cúbicos y puede entregar 330 millones cada año. Posee una cortina homogénea de arcilla con una longitud de

3.708 km y una longitud de diques de 18.00 km, aliviadero principal (10 compuertas de 29 toneladas cada una).

Tiene como obra de protección contra las filtraciones una pared en el suelo de 2613 m, compuesta por trinchera de bentonita-cemento y pilotes secantes.

Después de la puesta en explotación, aguas abajo del embalse y en lugares cercanos al pie de talud aparecieron encharcamientos provocados por flujos de filtración, creando lagunas que no permitían ejecutar correctamente las inspecciones visuales técnicas. Los piezómetros instalados se obstruyeron por diferentes causas y no se pudo conocer la Línea de Corriente Superior (LCS) y determinar al valor teórico del flujo de filtraciones a través del cuerpo de la cortina y la base.

En los primeros años de explotación, se produjeron deslizamientos y sifonamientos en diferentes lugares del talud húmedo, en las laderas de la cañada aledaña a la obra de toma derecha y aguas abajo de la cortina entre esta y el río Cauto. Para controlar estos fenómenos, se canalizaron parte de las filtraciones, se construyeron vertedores para medirlas y se construyeron filtros invertidos en la margen derecha del río Cauto, aguas abajo de cortina. Además, se tendieron los taludes en la cañada. Estos momentos se hace evidente la necesidad de determinar y preparar otros puntos que permitan un mayor control de las filtraciones.

### **Situación problemática**

La no adecuada identificación de los piezómetros instalados en la Presa Cauto del Paso durante su construcción, dificultan la determinación la línea de corriente superior y el valor teórico del flujo de filtraciones a través del cuerpo de la cortina y la base, como consecuencia evaluar sus afectaciones y control de estas filtraciones.

### **Problema de investigación**

¿Cómo demostrar la existencia del flujo de filtraciones en la cortina y dique izquierdo de la Presa Cauto del Paso, así como las afectaciones que pudiera generar en la estabilidad de la presa, para recomendar medidas para su control?

### **Objeto de investigación**

Las presas de tierra.

## **Objetivo General**

Analizar las filtraciones que se producen en la cortina de la Presa Cauto del Paso, identificando la magnitud de sus afectaciones, proponiendo medidas para un mejor control de las mismas.

## **Objetivos Específicos:**

1. Realizar una revisión bibliográfica sobre filtraciones y estabilidad de taludes en presas de tierra.
2. Determinar la Línea de Corriente Superior (LCS) que permita la construcción de la red piezométrica de las filtraciones al pie de la cortina de la presa. Analizar la estabilidad de taludes.
3. Realizar el análisis químico del flujo de filtración para predecir riesgos por sifonamiento químico.

## **Campo de acción**

Filtraciones en la cortina de las presas de tierra.

## **Hipótesis**

Si se identifica la ubicación del flujo de filtraciones en la cortina y dique izquierdo de la Presa Cauto del Paso, se podrían predecir las afectaciones que estas generan y proponer medidas para su control y reducción.

## **Tareas de investigación**

1. Búsqueda bibliográfica sobre los procesos de filtraciones en presas de tierra.
2. Desarrollar el cálculo de las filtraciones mediante el método de Arthur Casagrande para la LCS, la estabilidad de taludes mediante el método de Bishop y Chugaev para obtener los factores de seguridad.
3. Realizar los análisis químicos de calidad del agua.

Los métodos a utilizar son

**Análisis- Síntesis:** Este método se basa en los procesos cognoscitivos y permite la descomposición del fenómeno o proceso que se estudia en los principales elementos que lo conforman para determinar sus particularidades y simultáneamente mediante la síntesis se integran permitiendo descubrir relaciones y características.

**Observaciones:** Permite conocer la realidad mediante la percepción directa de los objetos y fenómenos en sus condiciones naturales, a partir del objetivo previamente establecido y utilizando métodos científicos.

**Mediciones:** Permite conocer de forma cuantitativa la realidad de un objeto o fenómeno dándole seguimiento en un período de tiempo determinado.

**Consulta a expertos:** Permite aclarar dudas que surgen durante el proceso investigativo y conocer algunos de los antecedentes del objeto de estudio.

### **Aporte de la investigación**

La investigación aportará elementos de control técnico que permitirá evaluar el comportamiento de las filtraciones, si existe lavado de los elementos químicos del cuerpo de la presa y la posibilidad de que esta falle por sifonamiento; además de disponer de una herramienta y nuevas formas de trabajo que pueda aplicarse en la vigilancia técnica de este tipo de obra.

## **CAPÍTULO I: Estado del arte sobre filtraciones y estabilidad en presas de tierra.**

El capítulo muestra un bosquejo bibliográfico del estado actual del conocimiento sobre el análisis de las filtraciones y la estabilidad de taludes en las presas de tierra, exponiéndose los conceptos principales, evolución histórica e importancia de los estudios del tema, se hace referencia a los métodos más usados a nivel mundial.

### **1.1 La Ingeniería Hidráulica y las presas de tierra.**

La Ingeniería Hidráulica es de suma importancia en nuestro tiempo. La misma se ocupa de la proyección y ejecución de obras relacionadas con el agua, para el propio uso de este fluido, así como la obtención de energía hidráulica, irrigación, potabilización, canalización u otras, también para la construcción de estructuras en mares, ríos, lagos, o entornos, similares incluyendo, presas, represas, diques, canales, puertos, muelles, rompeolas, entre otras muchas construcciones. La investigación es muy valiosa para los ingenieros hidráulicos, dado que la ingeniería hidráulica se sustenta casi en un 90%, en resultados experimentales (Fernández, 2015).

La energía producida gracias al agua es esencial para el día a día de cada persona; esta rama de la ciencia existe prácticamente desde la historia de la humanidad, ya que la lucha del ser humano para sobrevivir lo llevo a controlar la fuerza del agua para canalizar ríos y basar la economía en la agricultura.

En 1795 se creó el primer modelo físico hidráulico, gracias al ingeniero Luis Jerónimo en un tramo del río Garona (España-Francia.), años más tarde descubrieron la relación que existía entre la fuerza de la inercia y la fuerza de fricción interna, ya que estas premisas eran de gran importancia a la hora de elaborar el diseño de los modelos hidráulicos.

Los Ingenieros Hidráulicos tienen entre sus tareas equilibrar los excesos de unos lugares con las carencias de otros, para que esto sea posible requiere disponer de presas y canales, cuyo papel es crucial. Los trasvases que se ejecutan en Cuba en la actualidad son un ejemplo en este sentido. Por lo que dentro de la Ingeniería Hidráulica el diseño y construcción de presas cobran relevancia y dentro de los tipos existentes las de tierra, por sus particularidades y su amplio uso.

Las presas de materiales sueltos, como también se conocen, son materiales artificiales construidos para permitir la contención de las aguas, su almacenamiento o su regulación. Este tipo de presa fue la más utilizada en la antigüedad. En los siglos XIX y XX tuvieron un uso bastante difundido debido al rápido desarrollo de la técnica para los trabajos con tierra y roca, por la gran variedad de esquemas constructivos que permite utilizar prácticamente cualquier suelo que se encuentre en la zona, desde materiales de grano fino hasta suelos rocosos previamente fracturados.

Las presas de tierra son relativamente económicas ya que en su construcción se emplean los suelos naturales existentes en la zona o con un mínimo de procesamiento; las más exitosas utilizan materiales como arena, limo, polvo de roca arcilla y grava. Su construcción se basa en el almacenamiento de agua provenientes de un río o quebradas, que posteriormente podría ser utilizadas de diversas formas o combinación de estas: para consumo humano, generación de electricidad, regadío; así como también para aumentar la profundidad de diversos ríos y hacerlos más navegables y controlar el caudal del agua durante los períodos de inundaciones. Es por eso, que hoy en día son de suma importancia y deben ser estables y seguras. (Estrada, 2008)

Las ventajas y desventajas de las presas de tierra, quedan resumidas en:

**Ventajas.**

- Aplicables en distintos tipos de sitio (Valles amplios o gargantas estrechas).
- Adaptable a un amplio rango de condiciones de cimentación, desde rocas competentes hasta formaciones de suelos blandos y comprensibles o permeables.
- El diseño es flexible, muchas posibilidades de aprovechar los materiales y las condiciones.
- La construcción es mecanizada y continua.
- Los costos unitarios del terraplén suben más lentamente que los del concreto.
- Bien diseñada se puede ajustar con seguridad a un apreciable grado de asentamiento-deformación.

**Desventajas.**

- Muy vulnerables por sobrevertido.

- Hay que garantizar realce para crecidas.
- Vertedero suficiente.
- Vertedero separado.
- Vulnerable filtración y erosión interna en la presa o en la fundación.

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

Las presas de tierra tienen que ser seguras y estables durante todas las fases de construcción y de la operación del vaso. Para lograrlo, deben satisfacer con los siguientes requisitos: (Ahedo, 2003).

1. El terraplén debe estar asegurado contra el desbordamiento durante las avenidas de proyecto, disponiendo suficiente capacidad en el vertedero de excedencias y en la otra toma.
2. Los taludes de los terraplenes deben ser estables durante su construcción y en todas las condiciones que se presenten durante la operación del vaso de almacenamiento, incluyendo su rápido desembalse en el caso de las presas de almacenamiento.
3. El terraplén debe proyectarse de manera que no produzca esfuerzos excesivos en la cimentación.
4. Se deben controlar las filtraciones a través del terraplén, de la cimentación y los estribos, para que no se produzca erosión interna y por lo mismo no existan derrumbes en el área donde las filtraciones emergen. La cantidad de agua perdida por filtración debe controlarse para que no interfiera con las funciones proyectadas para la obra.
5. El terraplén debe estar asegurado contra el efecto de desbordamiento por el oleaje.

6. El talud de aguas arriba debe estar protegido contra la erosión producida por el oleaje, la corona y el talud de aguas abajo deben estar protegidos contra la erosión producida por el viento y la lluvia.

## 1.2 Fallas en presas de tierra. Generalidades.

Las posibilidades de que ocurran fallas en presas de tierra está determinada atendiendo a las características de cada obra. (Velázquez, 2016)

### 1.2.1 Fallas por estabilidad de taludes.

El surgimiento de la mecánica de suelos el pasado siglo, ha permitido el estudio de los taludes y su inclusión en normas y regulaciones a partir de conocer mejor las características hidromecánicas de los suelos (Novoa y Mentas, 1987).

Puede decirse que un talud ha fallado cuando se produce un deslizamiento del suelo que lo conforma. Estos deslizamientos pueden ser superficiales o movimientos del cuerpo del talud (ver anexos). Los deslizamientos superficiales no ocurren de manera repentina sino en un largo período de tiempo cuando el material que se encuentra en la superficie exterior del talud se desliza hacia abajo. El segundo caso se produce cuando el deslizamiento provoca una transición brusca entre la superficie exterior y el cuerpo del talud a través de una superficie generalmente circular conocida como superficie de falla, como se muestra en la fig. 1.1 (Flores Berenguer, 2016)

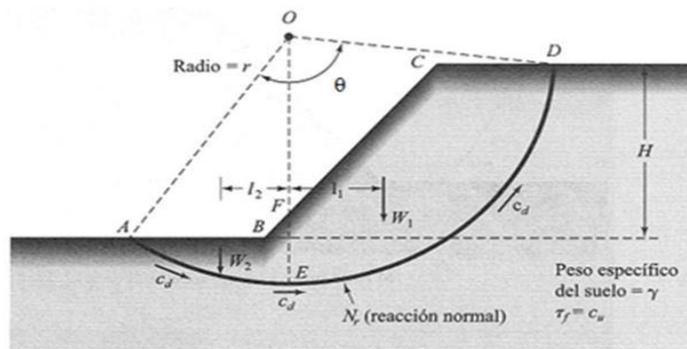


Figura 1.1 Superficie de falla circular. Análisis de estabilidad de un talud. (Berenguer, 2016)

Según (Quevedo, 1994) la falla de los taludes está relacionada con dos causas fundamentales:

- Aumento de los esfuerzos actuantes a lo largo de una superficie.

- Disminución de los esfuerzos resistentes a cortante a lo largo de la misma superficie.

Ambos fenómenos están estrechamente relacionados con la ocurrencia de precipitaciones, ya al producirse el aumento en la humedad del suelo disminuye la succión y la tensión efectiva, y, por tanto, la estabilidad del talud. En las presas de tierra, a la posible presencia de las precipitaciones es necesario añadir el flujo del agua a través de la cortina como consecuencia de la permeabilidad propia del suelo, algo que está condicionado por el nivel de aguas normales y el drenaje utilizado, es por ello que el análisis de estabilidad de taludes en este tipo de obra se realiza de acuerdo a los tres estados de carga que ellas pueden experimentar, existiendo así tres tipos de fallas por deslizamiento fundamentales. Las fallas ocurren principalmente en los primeros años de vida de la presa. Casi una tercera parte de las mismas ocurren durante el primer año y más de la mitad durante los primeros 5 años. (Quevedo, 2016)

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

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

### **1.2.2 Fallas durante la construcción**

Este tipo de falla ocurre antes de poner en explotación la presa, estando vacía y está relacionada fundamentalmente con las altas presiones de poros generadas durante la construcción en la cortina y la cimentación, que provocan una disminución de la resistencia a cortante del suelo. Son menos frecuentes que las que ocurren durante la explotación de la presa y nunca han sido catastróficas.

Se han presentado sobre todo en presas cimentadas sobre arcillas blandas, con una gran parte de la superficie de falla a través de ese material, por tanto, siendo una falla profunda. Pueden ser rápidas o lentas, dependiendo si el material de la cimentación es homogéneo o presenta estratificaciones que favorece el movimiento. (Quevedo, 2016)

### 1.2.3 Fallas durante la explotación del embalse.

Estas fallas ocurren terminada la construcción de la presa y llenada la misma, lo que provoca el establecimiento de las filtraciones por debajo de la Línea de Corriente Superior (LCS) en la cortina de la presa, ocurriendo siempre en el talud aguas abajo, cuando la presa se encuentra llena de agua y aparecen filtraciones por debajo de la línea de corriente superior en la cortina. Este tipo de falla puede o no ser superficial, producto de grandes precipitaciones, o profunda cuando la presa está totalmente llena y el flujo de agua a través de la cortina aumenta las presiones neutras provocando el fallo plástico. (Quevedo, 2016)

### 1.2.4 Fallas por desembalse rápido.

Este tipo de falla siempre ocurre en el talud aguas arriba, cuando se produce un desembalse rápido. Este descenso del nivel de agua se produce más rápido que el descenso de la LCS, por lo que el suelo pasa de estado sumergido a saturado muy abruptamente, pero manteniendo la presión de agua en los poros, ver figura 1.2

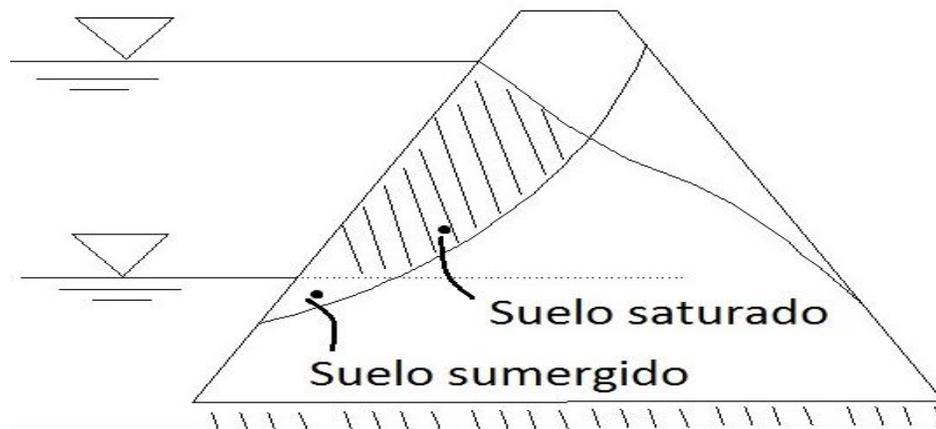


Figura 1.2 Paso del suelo de sumergido a saturado en cortina de presa de tierra. (Quevedo, 2016)

En resumen, en las presas de tierra, la estabilidad de taludes está determinada por factores geométricos (altura e inclinación), factores geotécnicos (características físico-mecánicas del suelo), y factores hidrogeológicos (presencia de agua en el suelo). Del estudio de este tipo de fallo se han podido obtener las siguientes generalidades (Quevedo, 2016).

- Siempre ocurren en el talud aguas arriba y pueden ser de gran magnitud.

- El fenómeno no se repite, ya que en el primer deslizamiento en un vaciado rápido se disipa gran parte de las presiones neutras.
- Nunca han provocado el colapso de la presa, pero frecuentemente han causado peligro al topar con conductos o galerías.
- Un estudio realizado por Sherard en 1953 en 12 presas, mostró que las fallas se presentan en casos en que el nivel del agua estuvo descendiendo a razón de 10 a 12 cm/día.
- Han ocurrido generalmente la primera vez que se hace la operación de vaciado rápido de forma importante.
- El fallo se asocia con la presencia de un material arcilloso en el cuerpo de la cortina o en la cimentación.
- Este tipo de fallo suele ser relativamente lento.
- La superficie de falla que se desarrolla es frecuentemente profunda.

### **1.2.5 Fallas por licuación**

Este tipo de falla es el fenómeno que puede presentarse en limos con índice de plasticidad (IP) < 6 y arenas no plásticas con diámetro efectivo de los poros ( $D_{10}$ ) < 0.1mm y coeficiente de uniformidad ( $C_u$ ) < 5. Además de las características anteriores de los suelos propensos a la licuación, los mismos deben estar saturados y ocurrir un sismo que provoque un incremento rápido de las presiones de poros con la consiguiente disminución de la resistencia a cortante de dicho suelo, el crecimiento de las presiones de los poros continua, llega a anular el esfuerzo efectivo y por tanto el suelo pierde toda su resistencia a cortante, comportándose como un líquido, de ahí proviene su nombre licuación. La medida a tener en cuenta para evitar este tipo de falla, es la de no cimentar una presa sobre un suelo propenso a la licuación.

### **1.2.6 Fallas por pérdidas por filtración**

Estas fallas son graves, las mismas pueden dañar la función principal para el que son construidas las presas de tierra, que es el almacenamiento de agua. Su causa principal está asociada a la presencia de carso o cavernas en el vaso de la presa, provocan pérdidas de agua muy superiores de las que ocurren debido a las filtraciones a través de la cortina de la presa.

### **1.2.7 Las fallas por Sifonamiento**

Se produce cuando una fuga de agua se concentra y erosiona en el suelo progresivamente hasta formar un conducto que une al embalse con el pie del talud aguas abajo. El sifonamiento constituye la causa más frecuente de fallo catastrófico en las presas después del desbordamiento.

El mayor número de fallos por esta causa se ha registrado en presas viejas o mal construidas y, debido a que es casi siempre catastrófico, es difícil reconstruir su secuencia y mecanismo.

### **1.3 Evolución histórica del estudio de las filtraciones.**

Con el trascurso de los años y la puesta en marcha de las construcciones de presas de tierra para el aprovechamiento del recurso agua en sí; aparecen consigo los problemas de filtraciones, y de ahí el paso a su estudio. Uno de los factores que influye principalmente en la estabilidad de taludes es la presencia de agua en el suelo. Según Flores- Berrones (2005), los efectos del flujo del agua sobre los taludes pueden ser:

1. La erosión interna (tubificación) por remoción de las partículas del suelo, pudiendo originar conductos de agua que, al agrandarse rápidamente, pueden originar la falla de la cortina.
2. Aumento de las fuerzas de flujo que, aunadas a la fuerza de gravedad, pueden hacer que el factor de seguridad disminuya considerablemente hasta producir la falla.
3. Aumento en las presiones de agua que conducirá a la disminución de esfuerzo efectivos y, por tanto, la disminución de la resistencia a cortante del suelo.

Es evidente la importancia que tiene el estudio de las filtraciones a través de la cortina en las presas de tierra, ya que las mismas pueden traer muchas consecuencias negativas para el embalse.

#### **1.3.1 Estudio de las filtraciones en cortinas de materiales locales.**

Aunque se usen materiales impermeables de buena calidad en la construcción de cortinas de materiales locales siempre va a existir un flujo de agua que circula desde el talud mojado hacia el talud seco con una cierta velocidad y descendiendo a medida que atraviesa el cuerpo de la cortina.

La velocidad con la que circula el flujo dentro del cuerpo de la cortina se llama velocidad de filtración. Cuando la velocidad es de tal magnitud que vence la resistencia del material a través del cual circula, comienza a arrastrar las partículas finas y a moverla hacia el talud seco por donde pueden comenzar a emerger, este fenómeno se denomina sifonamiento mecánico, siendo éste un peligro para la estabilidad de la presa. El sifonamiento químico ocurre cuando se disuelve alguno de las componentes del terreno. (Mejias, 2017)

La situación de la Curva de Corriente Superior (CCS) debe vigilarse sistemáticamente ya que es de gran importancia para la estabilidad de la cortina, para esto se toma las medidas necesarias para mantenerla por debajo de los valores de cálculo de proyecto.

La filtración no ocurre solo a través del cuerpo de la cortina, sino también por la base de la misma y de las obras de hormigón por los contactos entre el hormigón y la tierra y a través del hormigón. Tanto los núcleos de arcilla, diafragmas y las pantallas tienen como finalidad disminuir la altura de la LCS o sea que actúan contra las fuerzas de filtración. Además de estas obras en todas las cortinas se construyen dispositivos de drenaje que tienen como función no permitir que el agua de filtración que llegue a emerger por el talud seco y sacar el agua de drenaje fuera del cuerpo de la cortina, la construcción de un prisma de drenaje en la parte inferior del talud seco es una de estas soluciones. Las filtraciones por debajo de las obras de hormigón provocan el fenómeno conocido por subpresión el cual debe controlarse pues según su magnitud puede llegar a afectar la estabilidad de la obra. Las filtraciones a través de la cimentación tienen que ser reducidas mediante cualquier elemento contra filtraciones, parcial o total, de las ya mencionadas para evitar las fallas por sifonamiento mecánico. Especial atención debe tenerse durante la investigación ingeniero geológica en la detección de formaciones cársicas, fallas y suelos dispersivos.

Para evitar la falla por agrietamiento se construyen terraplenes de baja permeabilidad, que reducen las pérdidas por filtración a través del mismo. Para disminuir aún más las pérdidas por filtración a través de la cortina, garantizando las

recomendaciones y criterios para evitar el agrietamiento y el sifonamiento el proyectista y el constructor, tendrán en cuenta las exigencias de compactación con humedades (2 ó 3 %) ligeramente superiores a la óptima del Proctor Estándar en cualquier tipo de suelo.

Para garantizar la seguridad y la economía en una estructura del tipo de cortina de materiales locales, es indispensable conocer la influencia del chorro de filtración sobre la cortina, la posición de la curva de filtración, el punto de salida del chorro de filtración, la altura de la elevación por capilaridad del agua, la composición química de los suelos y del agua que se filtra. (Mejias, 2017)

Para la solución de los problemas de filtración en las cortinas de materiales locales existen métodos hidromecánicos, hidráulicos y experimentales que han sido obtenidos para el caso de propiedades isotrópicas, pero para casos en que esta propiedad no se presente, habrá que introducir correctivos en las soluciones obtenidas.

Para los casos de presas de tierra cuyo objetivo principal sea el almacenamiento, constituiría una falla grave, aunque no catastrófica, la infiltración del agua del embalse, ya sea a través de la cimentación o de la cortina, que impida que el mismo alcance su objetivo de almacenar agua. La micro presa Cuatro Caminos de Falcón, construida a finales de los años 70 del siglo pasado, en el municipio La Lisa, ciudad de la Habana, Cuba, que no llegó a almacenar agua por encontrarse en zona cársica el embalse.

Para el cálculo de la filtración se puede aplicar varios métodos. Unos de estos métodos son más aproximados que otros, pero en general toda la red de filtración se construye en la hipótesis de que el suelo de un estrato dado por donde se filtra el agua es uniforme en su permeabilidad. En realidad, en los estratos de suelos naturales, la permeabilidad varía de punto a punto, especialmente a lo largo de líneas normales a los límites del estrato. Por ello, la diferencia entre una red de filtración esquematizada y otra exacta es comúnmente pequeña, comparada con la diferencia entre la fluencia del agua en el suelo real y la que indica la red de filtración exacta. La universalidad de esta circunstancia hace que los refinamientos en la

construcción de redes de filtración, como los estudios detallados sobre modelos físicos o matemáticos no se justifiquen desde el punto de vista práctico para proyectos de obras pequeñas.

### **1.3.2 Efecto del flujo sobre la estabilidad de taludes.**

Las presiones hidrodinámicas y las fuerzas de filtración que existen en la zona de flujo de agua ejercen una poderosa influencia sobre la estabilidad de los taludes; esta influencia es generalmente de carácter negativo; es decir que cuando un talud está sujeto a flujo, su estabilidad se ve normalmente disminuida, respecto al caso en que se considere seco al talud. El primer método aproximado para conocer la forma de la LCS y el gasto en una presa de sección homogénea o en el corazón impermeable de otra de sección diferente, fue presentado simultáneamente por Schaffernak y Van Iterson. (Juárez Badillo, 1969)

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

En investigación realizada por (Flores, 2016), se refiere al análisis de estabilidad de cortinas de tierra para presas, las condiciones de flujo a las cuales pueden estar sujetas son varias:

- Flujo no establecido, como el que ocurre durante el primer llenado o después de un vaciado rápido.
- Flujo establecido, como el que ocurre tiempo después de estar operando una presa.
- Flujo antrópico, como el que ocurre cuando la permeabilidad horizontal defiere de la vertical.
- Cualquiera de las condiciones anteriores, considerando además las fuerzas de un sismo.

Los efectos del flujo de agua a través de la cortina de la presa se pueden analizar desde los puntos de vista, un producto de las filtraciones propiamente dicho, que pueden provocar erosión interna (turificación) por remoción de las partículas de suelo, pudiendo originar conductos de agua que, al agrandarse rápidamente pueden originar la falla de la cortina y pérdidas de agua producto de los gastos que circulan. El segundo efecto está relacionado con el aumento en las presiones del agua que conducirá a la disminución de los esfuerzos efectivos y, por tanto, disminución de la

resistencia al esfuerzo cortante disponible del suelo, así como aumento de las fuerzas de flujo que, aunadas a las fuerzas de gravedad, pueden hacer que el factor de seguridad de disminuya significativamente hasta alcanzar la falla del terraplén. (Mejias, 2017)

### 1.3.3 Teoría de la línea de corriente superior (LCS). (Condiciones de entrada y salida).

La teoría de las redes de flujo en presas de tierra se aplica precisamente al agua libre o gravitacional que se encuentra bajo el nivel freático. La red de flujo está compuesta por las líneas equipotenciales y las líneas de flujo, las primeras unen todos los puntos de una región con igual carga hidráulica y la segunda representa la trayectoria real y física que sigue el agua a través de la región del flujo, desde la zona de mayor potencial, y entre ellas se forman los canales de flujo (ver fig. 1.3).

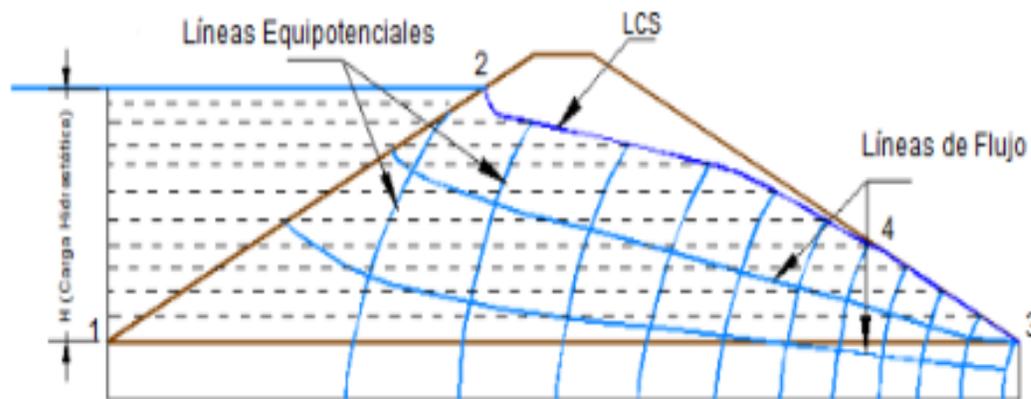


Figura 1.3 Red de flujo en presa de tierra. (Tenreiro, 2003)

La línea 1-2 es una línea equipotencial donde se produce el contacto entre el agua y el suelo permeable, mientras que la línea 1-3 es una línea de flujo. Ambas son fáciles de determinar, no siendo así para las restantes fronteras de la región. Por debajo de la línea 2-4, la cortina de la presa se encuentra en estado saturado y por encima de ella, salvo una estrecha región capilar, el suelo se encuentra en estado seco. Precisamente a esta línea se le conoce como Línea de Corriente Superior (LCS). Y es a la vez una línea de flujo y una línea equipotencial donde todas las presiones son iguales a cero. La línea 4-3 es de equipresión correspondiente a la presión atmosférica y se puede determinar fácilmente si se conoce el punto 4, por lo que es

la determinación de la LCS la clave para delimitar la región del flujo. (Novoa y Mentas, 1987)

Se pueden presentar diferentes casos en cuanto a la forma de la entrada de la LCS en presas de tierra, en función al ángulo de inclinación del talud aguas arriba como se muestra en la fig.1.4

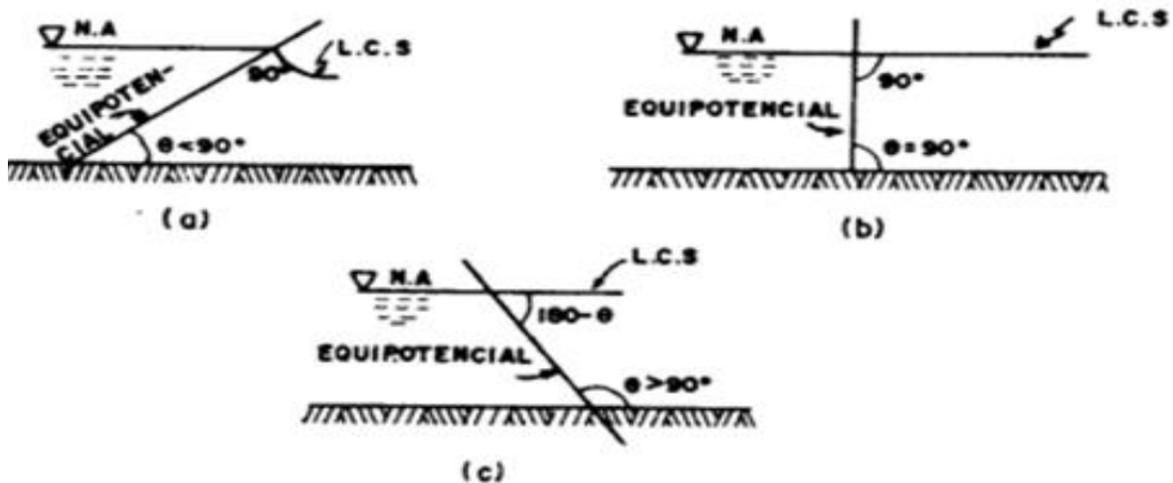


Figura 1.4 Condiciones de entrada de la LCS en presas de tierra.

### 1.3.4 Métodos para la determinación de la Línea de Corriente Superior (LCS).

Existen varios criterios para determinar la Línea de Corriente Superior, necesaria para poder determinar el gasto de filtración que circula por el cuerpo de la cortina (en este caso, materiales locales) y poder trazar la red de flujo. Estos criterios proporcionan la situación exacta de la Línea.

#### 1.3.4.1 Solución de Dupuit

En 1863 J. Dupuit estableció las bases para una solución aproximada para problemas de flujo no confinado, a partir las siguientes hipótesis:

- Para las pequeñas inclinaciones de la LCS, las líneas de flujo se pueden considerar horizontales y, consecuentemente, las equipotenciales como verticales.

- El gradiente hidráulico es igual a la pendiente de la línea de corriente en el punto que se trate y es constante en cualquier punto de la vertical que se trace por él.

La ecuación que representa el gasto que circula en la sección transversal, considerando un espesor igual a la unidad perpendicular al plano del papel, según la teoría Dupuit es:

$$q = k/2S (h^2 - h_0^2) \quad (1.1)$$

En la teoría de Dupuit la LCS no es tangente al talud aguas abajo ni comienza perpendicular al talud aguas arriba, además, solo depende de la geometría de la sección y no de permeabilidad como se muestra en la fig. 1.5

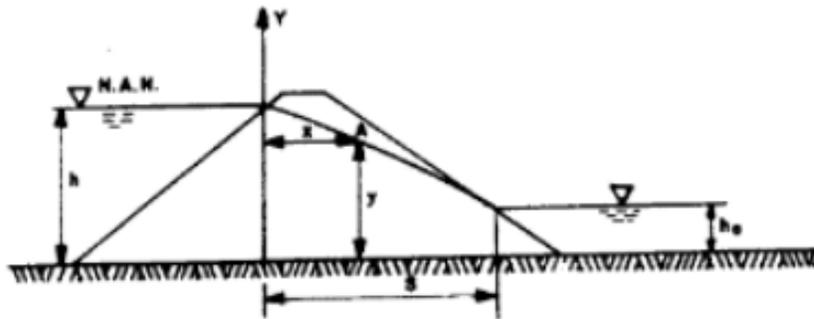


Figura 1.5 Línea de Corriente Superior en la teoría de Dupuit (Novoa y Mestas, 1987).

#### 1.3.4.2 Solución de Schaffernak y Van Iterson.

Schaffernak y Van Iterson propusieron en 1916, de manera independiente, determinar la posición de la LCS y mantener las hipótesis de Dupuit, pero imponiendo la condición de salida correcta para el caso de tirante nulo aguas debajo de la presa.

$$\alpha = d / \cos \Theta - \sqrt{(d^2 / \cos^2 \Theta) - (h^2 - \sin^2 \Theta)} \quad (1.2)$$

Expresión que permite calcular el valor de  $\alpha$  y situar el punto 4 de la LCS, siendo  $\Theta$  el ángulo de inclinación del talud aguas abajo. Esto permite trazar la LCS en función del gasto.

$$q (d-x) = K \frac{h^2 - y^2}{2} \quad (1.3)$$

Y la expresión del gasto en la sección transversal que pasa por el punto 4:

$$q = k \times \alpha \times \sin \Theta \times \tan \Theta. \quad (1.4)$$

Con las expresiones anteriores se puede calcular el gasto de filtración sin utilizar la red de flujo.

#### 1.3.4.3 Solución de Kozeny.

En 1931, J. Kozeny propuso una solución rigurosa para el caso en que el ángulo  $\Theta = 180^\circ$ . Retoma la teoría de Dupuit, al plantear que el gradiente hidráulico es igual a la pendiente de la LCS. Y plantea que las líneas equipotenciales y de flujo son una familia de parábolas de foco común y la ecuación para determinar la LCS está referida a un sistema de ejes rectangulares en el origen de este foco.

$$X = K \frac{y^2 - y_0^2}{2y_0} \quad (1.5)$$

Donde

$y_0$ : Es la ordenada en el origen de coordenadas de la LCS.

#### 1.3.4.4 Solución Arthur Casagrande.

Arthur Casagrande (1925-1940) extendió la solución rigurosa de Kozeny para arribar a soluciones aproximadas, pero de alto valor práctico, útiles para todos los casos en que el ángulo  $\Theta$  se encuentre entre los valores de  $60^\circ$  a  $180^\circ$ . Las particularidades de esta solución se muestran en la fig.1.6

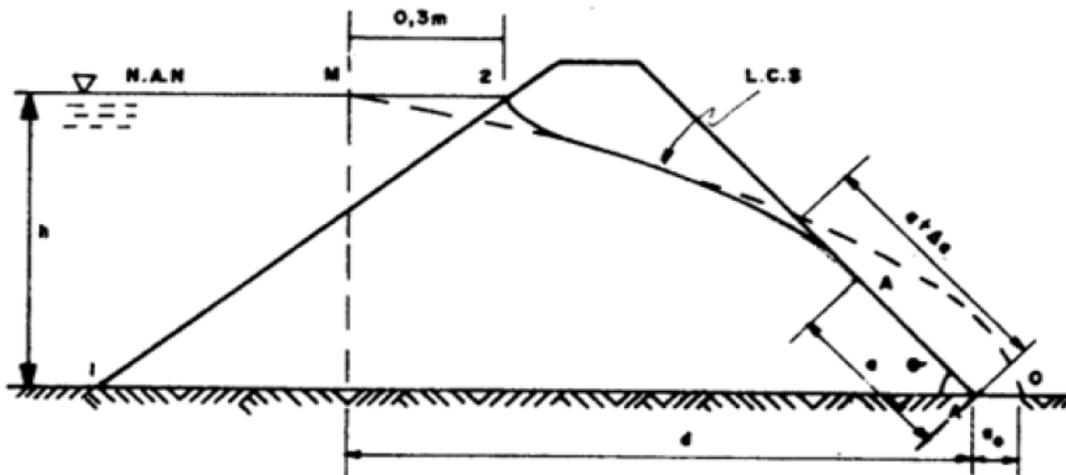


Figura 1.6 Sección para la solución de Casagrande

La solución consiste en adoptar como primera aproximación para la forma de la LCS la parábola básica de Kozeny, y así corregir en la etapa siguiente la entrada y salida de la curva a los taludes aguas arriba y aguas abajo respectivamente, a fin de lograr

que la línea trazada satisfaga ambas condiciones. Casagrande propone aplicar el siguiente procedimiento.

1. Se considera como foco de la parábola el pie del talud aguas abajo (punto A).
2. Con vista a tener en cuenta la condición de entrada, se supone conocido M (d; h)
3. La posición del punto o se determina colocando la distancia  $a_0$  (ecuación 1.6)

$$\alpha_0 = \frac{1}{2} (\sqrt{d^2 + h^2} - d) \quad (1.6)$$

4. Se colocan los puntos de la parábola y luego se plotean los puntos desde M hasta (ecuación 1.7)

$$x = \frac{y^2 - y_0^2}{2y_0} \quad (1.7)$$

5. Se determina la distancia  $\alpha + \Delta\alpha$  entre el pie del talud aguas abajo y la intersección de la parábola con el mismo.
6. Se determina la posición del punto de salida de la Línea de Corriente Superior.
7. Para esta corrección se mide  $\alpha + \Delta\alpha$  en el plano de trabajo y se determina  $\Delta\alpha$ .

Casagrande igualmente recomienda los siguientes aspectos a tener para el trazo de redes de flujo.

1. Estudiar la apariencia de redes de flujo bien hechas.
2. Usar el menor número de canales posible.
3. Observar la apariencia de la red en conjunto.
4. Comenzar el trazo en zonas donde las líneas puedan ser rectas y paralelas.
5. En redes de flujo simétricas las formas de las líneas de flujo son elípticas.
6. No dibujar transiciones bruscas entre zonas rectas y curvas.
7. No intentar corregir la última hilera de cuadrados curvilíneos incompleta por correcciones locales, es preferible empezar de nuevo con otro número de canales de flujo.
8. Tomar en cuenta los cuadrados singulares que deban aparecer.
9. Una superficie de salida en la red, en contacto con aire, si no es horizontal, nunca esa línea de flujo ni equipotencial.

#### **1.4 Medidas o soluciones técnicas contra las filtraciones en presas de tierra.**

Las filtraciones no ocurren solo a través del cuerpo de la cortina, sino también por la base de la misma y de las obras de hormigón por los contactos entre el hormigón y la tierra y a través del hormigón por lo cual se plantearon las siguientes medidas:

##### **1.4.1 Drenajes**

En presas de materiales locales controlan la evacuación del agua de filtración que pasa a través del terraplén y la cimentación. Un dren bien concebido puede disminuir el volumen de terraplén saturado, y por tanto aumentar la seguridad de la presa o disminuir los volúmenes de trabajo necesarios para construirla. (Novoa y Mestas, 1987)

##### **1.4.2 Prisma de Piedra**

El prisma de piedra en el pie de talud aguas debajo de una presa es una solución frecuente en las presas de materiales locales y en especial en las presas homogéneas. Este aumenta sensiblemente la estabilidad del talud aguas abajo cuando la presa se apoya en una base rocosa, ya que en la práctica las superficies de falla potencialmente más peligrosas pasaran por encima del prisma, lográndose así una mayor estabilidad.

##### **1.4.3 Colchón de drenaje**

El colchón de drenaje constituye uno de los drenes más efectivos al reducir el volumen de material saturado en el talud aguas abajo y al controlar la salida de las filtraciones por la base de la presa. Su utilización tiene opositores que piensan en lo peligrosa que sería la oclusión de un dren de colchón, ya que pondría a la presa en una situación de filtraciones para la cual no fue calculada y que difícilmente podría soportar.

##### **1.4.4 Drenaje de Franja**

Los drenes de franja constituyen una alternativa para los colchones de drenaje. Los mismos están compuestos por drenes de piedra, tuberías o galerías prefabricadas los cuales se colocan en el cimienta a una distancia deseada del pie del talud aguas abajo, tal que aseguren que la línea de corriente superior no salga al talud. El agua

recolectada por los drenes de franja se evacúa aguas abajo por drenes, tuberías o galerías transversales llamadas colectores, se utilizan principalmente, en las zonas de laderas, como un medio para ahorrar el material granular que llevaría un colchón de funciones equivalentes. Es necesario que longitudinalmente los drenes de franja tengan pendiente, al igual que los colectores, para garantizar el flujo y evacuación del agua. (Novoa y Mestas, 1987)

#### **1.4.5 Drenaje central**

El drenaje central se utiliza generalmente, en presas homogéneas con el objeto de abatir totalmente el agua de filtración y garantizar alejarla del talud aguas abajo. La construcción de un dren así puede ser costosa y complicada si resulta necesario colocar filtros, pues el espesor total del drenaje será muy grande, por ser cada capa de un espesor constructivo mínimo. En cualquier caso, la decisión obedecerá a un análisis de costo y seguridad; los espesores usuales son de 2-3 m.

#### **1.4.6 Filtros**

La necesidad de colocar filtros entre suelos de granulometrías muy diferentes es una práctica normal de la ingeniería y parte de la experiencia de que las partículas más finas de un suelo pueden ser arrastradas por las fuerzas de filtración. La continuación de este fenómeno da lugar al sifonamiento. Para esto se protege el suelo sometido a flujo (que puede ser el cuerpo de una presa), consuelo que, por poseer una granulometría más gruesa, no es arrastrado por la fuerza de filtración.

No todos los suelos con granulometría más gruesa resultan filtros que eviten la migración de las partículas finas del suelo protegido. Puede suceder que las partículas el suelo protegido se escapen aun por entre los poros más pequeños del filtro, y por tanto este no cumpla su cometido. (Novoa y Mestas, 1987)

En el año 1940 se establecieron las características granulométricas que debe cumplir un filtro, sobre la base de un extenso programa de experimentos. En estos experimentos se demostró que los poros que quedan entre las partículas más pequeñas de un filtro efectivo se tapan con las partículas más grandes de un suelo protegido, no permitiéndole el paso a las partículas más finas del mismo, evitándose de esta forma el proceso de sifonamiento.

El análisis de la red de flujo a través de una presa y su cimentación muestra que, en general, los gradientes de salida no son altos y es normal limitar el gradiente permisible a valores bastante menores que uno. No obstante, la instrumentación de algunas presas, así como el análisis del comportamiento de estas, indica que es necesario que el diseñador considere como una situación de cálculo, aquella en que se produce una grieta a través del núcleo pantalla de la cortina. Las causas de este agrietamiento pierden asientos diferenciales y o la fractura hidráulica.

### **1.5 Evolución histórica del estudio de la estabilidad de taludes en presas de tierra.**

Uno de los aspectos más analizados y tratados con relación a las presas de tierra lo constituye la estabilidad de taludes. En (Azorín 2014) aparece una cronología histórica, a principios del siglo XX los taludes se manejaban con normas puramente empíricas, sin ningún criterio generalizador de las experiencias adquiridas. Solo fue posible aplicar normas y criterios que tomasen en cuenta las propiedades mecánicas e hidráulicas de los suelos constitutivos al diseño de taludes tras la aparición de la Mecánica de los Suelos.

Su estudio comenzó con Coulomb (1776), quien planteó la superficie de deslizamiento plana. La idea de que esta fuera curva, la inicio Collin (1845), quien se imaginó además mecanismos de falla similares a los que se consideran en muchos métodos prácticos actuales. (Velázquez, 2016)

En 1916 Patterson se refirió nuevamente a las ideas de superficie de deslizamiento no plano; al analizar una falla ocurrida en el puerto Gotemburgo, Suecia, dedujo que la ruptura había ocurrido en una superficie curva. Por otra parte, Fellenius, W. (1927) propuso asimilar la superficie de falla real a una cilíndrica cuya traza con el plano del papel sea un arco de circunferencia, a fin de facilitar los cálculos, aunque se sabe que esta falla circular no representa exactamente el mecanismo real. Actualmente reciben el nombre genérico de método sueco aquellos procedimientos de cálculo de estabilidad de taludes en que se utiliza la hipótesis de falla circular. Para el caso de los suelos con cohesión y fricción, Fellenius (1936) ideó el procedimiento de las dovelas, que consiste en dividir en dovelas la masa de tierra deslizante y analizar el equilibrio de la misma como un todo.

Rendulic, L. (1935) propuso la espiral logarítmica como traza de una superficie de deslizamiento más real. Krey, H. (1936) proporcionó las ideas que permitieron a G. Gilboy y A. Casagrande desarrollar un método especial de análisis de estabilidad de taludes respecto a fallos por rotación, conocido por el nombre de procedimiento del círculo de fricción o círculo  $\phi$ . (Velázquez, 2016)

Taylor, T.W (1937) puso de manifiesto la espiral logarítmica, que complica bastante los cálculos, proporciona resultados tan similares a la circunferencia que su uso práctico no se justifica. También ideó ábacos para el cálculo del factor de seguridad de taludes homogéneos a partir de la aplicación del método del círculo de fricción.

Bishop, A. w. (1955) hizo un análisis del método de las dovelas presentado en 1936 por Fellenius, planteando una hipótesis más real en relación con las fuerzas laterales que actúan en una dovela. Tanto el método de las dovelas de Fellenius como el de Bishop, constituyen los métodos aproximados de mayor utilización mundial.

Janbu, N. (1954) obtuvo ábacos para determinar el factor de seguridad, asociados a círculos críticos por el pie del talud, en taludes simples y homogéneos. Posteriormente Janbu y Col (1956) desarrollaron el método de Bishop simplificado, considerando superficies de deslizamiento que no fueran necesariamente circulares.

Bishop y Morgenstern (1960) idearon ábacos de estabilidad que indican las combinaciones de parámetros necesarios para la estabilidad en casos determinados, lo cual resulta muy útil para los cálculos preliminares.

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.

Antiguamente los cálculos de estabilidad de taludes constituían un trabajo muy laborioso. Esto se ha reducido notablemente por el extendido empleo de las computadoras eléctricas que han sido introducidas a partir de los trabajos de Witman R.V. y W. A. Bailey (1967). (Velázquez, 2016)

A partir de 2001 se registra un gran número de aplicaciones y eventos a nivel mundial, que indican la preocupación por demostrar la utilidad de los métodos propuestos. Surgen autores que desarrollan algoritmos novedosos que eliminan las limitaciones del pasado y promueven la adición de herramientas numéricas como el método de Monte Carlo y el Método de Elementos Finitos. Otros autores

implementan metodologías que integran los recursos de software comerciales, con el fin de establecer metodologías de fácil entendimiento.

Según (Quevedo 2016) se han estudiado distintos métodos para el análisis de la estabilidad de taludes como los mencionados anteriormente, todos basados en el método general de las dovelas, partiendo de que se conoce la superficie de falla crítica a la cual se asocia el factor de seguridad mínimo. En un diseño en realidad esa superficie de falla crítica no se conoce y para su determinación necesariamente hay que aplicar un proceso iterativo, tanteando distintas superficies, con su radio y centro correspondiente hasta que se encuentre la de factor seguridad mínima.

Este proceso no es tan simple y si no se ordena puede ser muy extenso, incluso puede correr el riesgo de que en realidad no se encuentre el círculo crítico. Para resolver la problemática, varios autores han ideado procedimientos, siempre iterativos, que simplifican las iteraciones a realizar, además de garantizar la obtención del verdadero factor de seguridad mínima asociado al círculo crítico.

Uno de los métodos más utilizados y que la práctica ha validado que da resultados confiables es el propuestos por Ostrovski, en el mismo se parte de la recomendación dada para el  $R_m$ ,  $R_{mín}$  y  $R_{máx}$  a utilizar en función de la pendiente del talud y la altura  $H$  del mismo, tal como se muestra en la siguiente tabla 1.1. (Velázquez, 2016)

Tabla (1.1). Relación radio-altura según proporción del talud. (Velázquez, 2016)

	R/H			
Talud	1:1	1:2	1:3	1:4
$R_m$	1,65	1,95	2,60	3,60
$R_{máx}$	2,20	2,50	3,30	4,70
$R_{mín}$	1,10	1,40	1,90	2,50

Trabajando inicialmente con el radio recomendado ( $R_m$ ), se sigue el procedimiento planteado por Ostrovski para llegar a ubicar el centro del radio crítico y posteriormente se comprueba con ese centro si utilizando los  $R_{máx}$  y  $R_{mín}$  se encuentra un factor de seguridad menor.

### 1.5.1 Generalidades de los métodos de análisis de estabilidad de taludes

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 cortante. La superficie de falla circular que se genera en el talud se muestra en la figura 1.7 (Velázquez, 2016)

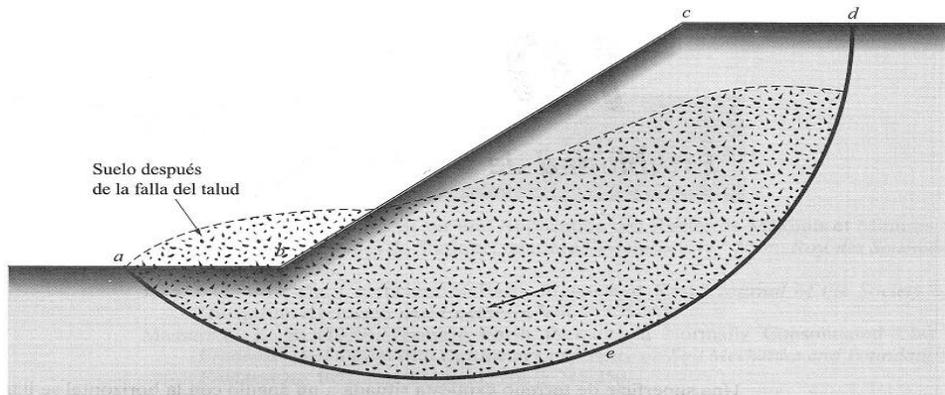


Figura 1.7 Falla de un talud. (Velázquez, 2016)

El método de introducción de la seguridad utilizado es el factor de seguridad global, por lo que el análisis de la estabilidad de taludes consiste en determinar el menor factor de seguridad que puede tener dicho talud, asociado a la superficie de falla crítica, y lograr que el mismo cumpla con los valores establecidos de dicho factor de seguridad como requerido.

En el análisis de la estabilidad de taludes se pueden presentar diversos problemas, pudiendo mencionar entre ellos los siguientes:

- La determinación de la superficie de falla crítica.
- La posibilidad de que la superficie de falla asumida pase por más de un suelo, es decir que existe estratificación en el talud.
- La necesidad de considerar el esfuerzo neutro como la suma del hidrostático más el producido por el flujo, para la definición del esfuerzo normal efectivo a lo largo de la superficie de falla, y con dicho esfuerzo establecer la resistencia a cortante del suelo a lo producido por el flujo, para la definición del esfuerzo normal efectivo a lo largo de la superficie de falla, y con dicho esfuerzo

establecer la resistencia a cortante del suelo a lo largo de dicha superficie de falla, para los suelos.

En general el procedimiento para la realización de la estabilidad de talud es el siguiente:

- Se supone una pendiente para el talud y se comienza a trazar posibles superficies de fallas y a cada uno de ellas se le determina el factor de seguridad.
- Se determina la superficie falla crítica, asociada a la que dio menor factor de seguridad.
- Se compara ese factor de seguridad mínimo con el factor de seguridad requerido.
- Si el factor de seguridad calculado es mayor y similar al requerido, el talud es seguro y económico y es el resultado del diseño.
- Si el factor de seguridad calculado es menor al requerido, debe disminuirse la pendiente del talud y repetir el proceso hasta que se logre un factor de seguridad mayor y similar al requerido.

### **1.5.2 Métodos teóricos para el estudio de la estabilidad de taludes en presas de tierra.**

Los métodos de análisis de estabilidad de taludes se enfocan generalmente en los análisis límites, que consisten todos en suponer un mecanismo de falla para el talud y aplicar a tal mecanismo los criterios de resistencia del material, una forma de ver si con dicha resistencia hay o no posibilidad de que el mecanismo supuesto llegue a presentarse. En el análisis de taludes siempre se ha imaginado que el fallo ocurre por deslizamiento de la masa de suelo actuando como un cuerpo rígido a lo largo de una superficie de falla supuesta. Se considera que a lo largo de una superficie el suelo desarrolla la máxima resistencia.

#### **1.5.2.1 Método sueco o de las dovelas. Generalidades.**

Uno muy sencillo es el método sueco o el del círculo de falla por deslizamiento, que puede afectar la parte del talud, a todo el talud o a éste y parte de la cimentación. Este es un método de tanteos en el cual:

- Se fija un centro del círculo de falla y su radio, de forma que desde el centro se traza un círculo que divide en dos el terraplén.
- Se determinan las fuerzas actuantes y resistentes.
- Se calculan los momentos.
- Se determina el factor de seguridad del círculo supuesto.
- Se suponen otros círculos de falla y encontrar el factor de seguridad del talud.

El método sueco se puede aplicar a cualquier pendiente y combinación de fuerzas para suelos netamente cohesivos o sea cuando la resistencia al esfuerzo cortante del suelo sea independiente de los esfuerzos normales al plano de falla ( $\tau = C$ ). El factor de seguridad por este método está entre 10% y 15%.

El análisis de estabilidad de la presa consiste en determinar la estabilidad de sus taludes aguas arriba y aguas abajo. Se hace por unidad de longitud de talud. Este es un proceso de tanteos en que se suponen diferentes condiciones de carga a que puede estar sometida la cortina. Las fuerzas que producen el movimiento de la masa que constituye el talud son: fuerzas de gravedad, fuerzas sísmicas, acción del oleaje, del hielo y sobrecargas. Las fuerzas que se oponen al movimiento son las debidas a los parámetros de resistencia del suelo que constituye el terraplén: cohesión y fricción interna del material.

Los terraplenes hechos de materiales granulares son más estables ya que tienen mayor resistencia a la fricción y por ser más permeables permiten la rápida disipación de las presiones intersticiales. Por esto, presas homogéneas de materiales más o menos impermeables llevan taludes más tendidos que las presas mixtas o las de enrocado. El talud de aguas arriba por estar sometido a la permanente acción del agua es más tendido que el de aguas abajo. La situación más crítica para el talud aguas arriba es el rápido desembalse que sigue a un largo período de niveles altos en el embalse, y para el talud aguas abajo es la máxima saturación del terraplén cuando el embalse está lleno.

#### **1.5.2.2 Método sueco o de las dovelas (Fellenius)**

Este método es usado para determinar la estabilidad en taludes para final de construcción. Es un método en que la superficie de falla se divide en  $n$  dovelas o

tajadas para analizar el sistema de fuerzas, como se muestra en la fig. 1.18. Este método al igual que el de Bishop permite considerar materiales heterogéneos y analizar otras superficies de falla. También, es conveniente utilizar este método cuando la resistencia al esfuerzo cortante del suelo es función de los esfuerzos normales, o sea:

$$\tau = C + \sigma \tan \phi \quad (1.8)$$

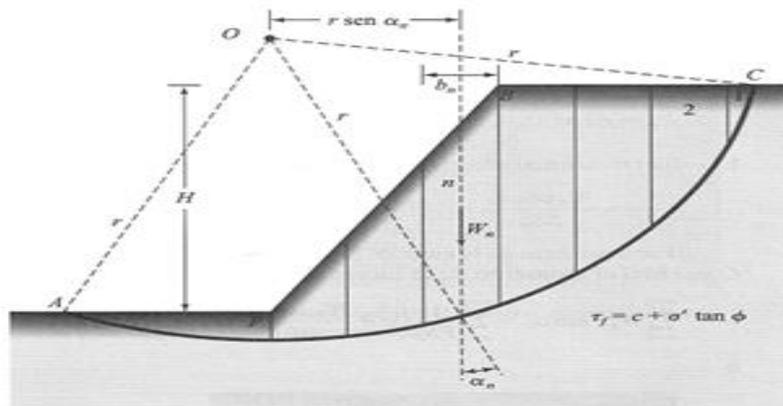


Figura 1.8 Esquema y parámetros del método de la dovela de Fellenius (Velázquez, 2016)

Para determinar la estabilidad de un talud se propuestos los siguientes pasos generales:

1. Suponer una superficie de falla circular, la cual puede ser por el pie del talud, la base del talud, o el talud mismo. Esta superficie de falla determina una superficie de deslizamiento y una masa deslizante.
2. Dividir la zona de falla en dovelas de espesor constante o variable.
3. Calcular las fuerzas motoras y las fuerzas que se oponen al deslizamiento o fuerzas resistentes para cada dovela.
4. Calcular los momentos motores y los resistentes que actúan a lo largo de la superficie de falla.
5. Calcular el factor de seguridad para la superficie de falla asumida.
6. Asumir otras superficies de falla y recalculer el factor de seguridad hasta encontrar el mínimo.

El factor de seguridad al deslizamiento se obtiene por la ecuación 1.9

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^n \text{momentos estabilizantes}}{\sum_{i=1}^n \text{momentos desestabilizantes}} \quad (1.9)$$

Para este caso las ecuaciones son:

$$F = \frac{R \sum C' \delta_s}{\sum W * x} + \frac{R \sum (W * \cos \alpha - u * \delta_s) \tan \phi}{\sum W * x} \quad (1.10)$$

$$\tilde{N} = W * \cos \alpha - u \quad \delta_s = \frac{b}{\cos \alpha} \quad W = \gamma * Z * b$$

Donde:

n: Número de dovelas

R: Radio del círculo de falla

x: Distancia horizontal del centro de gravedad

$\phi$ : Ángulo de fricción interna del material

W: peso de la dovela

C': Cohesión del material

$\tilde{N}$ : Resultantes normales sobre la base de cada dovela

U: Presión de poros

$\gamma$ : Peso específico del suelo

b: Ancho de cada dovela

### 1.5.2.3 Método de Bishop Simplificado.

Este método, toma como hipótesis para poder solucionar el análisis de la estabilidad de taludes utilizando el enfoque general del método de las dovelas y no toma en cuenta la fricción entre dovelas. El método se utiliza para operación normal, empleando la ecuación 1.11 (Corrales, 2008)

$$F_b = \frac{R \sum C' * \delta_s * n}{\sum W * n} + \frac{R \sum (W - ub) \tan \phi \xi}{\sum W * x} \quad (1.11)$$

$$\xi = n * \sec \alpha \quad n = \frac{1}{1 + \frac{\tan \alpha * \tan \phi}{F}}$$

La fuerza normal se calcula por la ecuación 1.12

$$\tilde{N} = \frac{\left( W - \frac{1}{F} * C' b \tan \alpha - ub \right) \sec \alpha}{1 + \frac{\tan \alpha * \tan \phi}{F}} \quad (1.12)$$

Siendo:

F: Factor de seguridad.

#### 1.5.2.4 Método de Chugaev

Este método es una simplificación del método de Bishop, supone a  $n = 1$ , siendo la ecuación:

$$F_{ch} = \frac{R \sum (C' \delta_s)}{\sum W * x} + \frac{R \sum (W - ub) \tan \phi}{\sum W * x} \quad (1.13)$$

Las fuerzas a considerar incluyen los efectos de sismos, hielo, olas, embalse lleno o vacío.

- Un factor de seguridad de 1.5 se considera suficiente para presas de materiales locales.
- La base de la dovela debe de estar en un solo tipo de material.
- Los métodos de Bishop y Fellenius se usan simultáneamente para establecer el nivel de variación del Fs.
- Este método de Chugaev se puede utilizar para suelos con  $\Phi \leq 20^\circ$ .

#### 1.5.2.5 Método de Janbu.

Consiste en en la suposición de que las fuerzas entre dovelas son horizontales y no tienen en cuenta las fuerzas de cortante. Janbu considera que las fallas no son necesariamente circulares y establece un factor ( $f_0$ ) que depende de la curvatura de la superficie de falla. Estos factores de corrección son solamente aproximados y se basan en el análisis de 30-40 casos.

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

El método de Janbu solamente satisface el equilibrio de esfuerzos de momentos. De acuerdo con Janbu (ecuación modificada) (Velázquez, 2016)

$$F_s = \frac{f_0 \Sigma [(c.b + (W - U_b) \tan \theta) \frac{1}{\cos \alpha m \alpha}]}{\Sigma W \tan \alpha} \quad (1.14)$$

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

Donde:

$f_0$ : Depende de la curvatura de la superficie de falla.

B: Ancho de la Dovela.

W: Peso de cada dovela.

$c$  y  $\phi$ : Parámetros de resistencia del suelo.

$U$ : Presión de poros en la base de cada dovela.

$\alpha$ : Ángulo del radio y la vertical en cada dovela.

#### 1.5.2.6 Método de Spencer.

El siguiente método 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 ángulos de inclinación de las fuerzas entre dovelas  $\theta$ , cuyo esquema de análisis se muestra en la fig. 1.9

Una vez que se obtienen los valores de  $F$  y  $\theta$  se calculan las demás fuerzas sobre dovelas individuales (ver fig.1.10). 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. (Suárez, 2002)

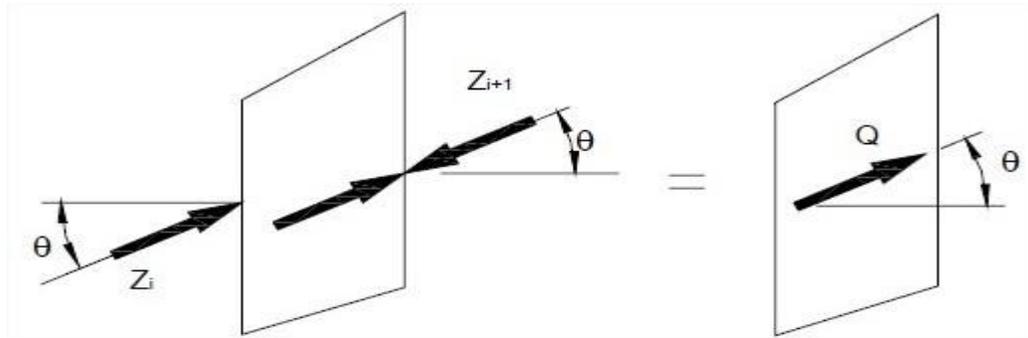


Figura 1.9 Análisis del ángulo de Inclinación en el Método de Spencer

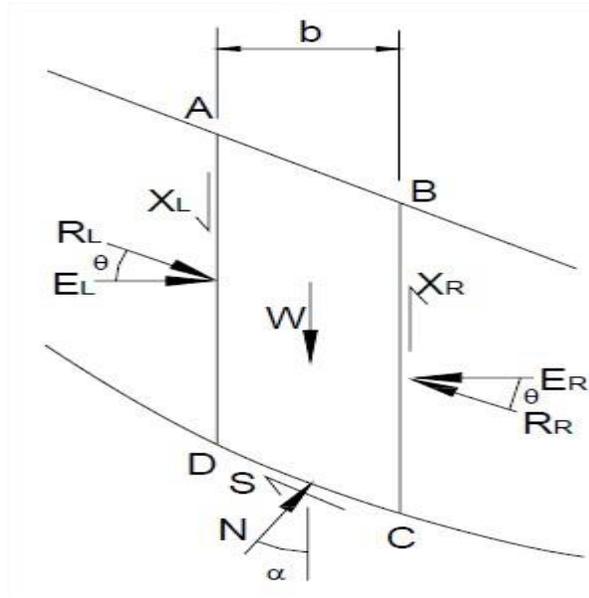


Figura (1.10) Análisis de fuerzas por dovelas en el método de Spencer.

### 1.6 Muestreo Químico de las filtraciones en la Presa Cauto del Paso.

Debido a la importancia que se le confiere al proceso de filtración del agua en las cortinas de las presas de materiales locales, se realiza un estudio de las propiedades químicas de los materiales de préstamos utilizados en la cortina, así como al agua de filtración para determinar si el material de préstamo está siendo lavado químicamente y si se produce un proceso de sifonamiento químico.

Al realizar un análisis de las muestras físico químicas de las aguas de filtración, es de suma importancia en el control técnico de presas de materiales locales ya que por el desconocimiento de su comportamiento puede aparecer un fenómeno tan peligroso como es el sifonamiento, causa de muchos desastres a nivel mundial. Su incidencia sobre la cortina de la presa; mediante la comparación con una muestra

patrón que se toma simultáneamente en la presa. Las muestras del agua de filtración se tomarán de los focos de filtración.

Para determinar la ocurrencia de posible sifonamiento en la presa, a través del análisis químico del agua, se lleva a cabo el siguiente procedimiento.

- Se toma una muestra del agua a la salida, en el foco de filtración y otra muestra en el embalse y que represente la masa de agua, (se puede tomar en la salida de la obra de toma).
- Se entregan dichas muestras en el laboratorio.
- Se recogen los resultados de los análisis.
- Mediante comparación se determinan las diferencias entre las de cada foco con la del embalse.

Hasta este punto usted conoce si está ocurriendo o no el sifonamiento.

- Valorar las cantidades de iones y cationes que son lixiviados, ya sea en miles/litro o miligramos/litro,
- Hacer el análisis del PH que es un elemento muy importante ya que verifica la ocurrencia de lixiviación o lavado.

## **CAPÍTULO II: Características de la Presa Cauto del Paso y Métodos de cálculo.**

### **2.1 Principales características de la presa.**

La Presa Cauto del Paso está situada en la provincia Granma a 30 km al noroeste de la ciudad de Bayamo, como coordenadas del cierre: N: 211.98 al E: 510.600, tiene como acceso el poblado Caureje desde la carreta Bayamo – Las Tunas, a 20 km, su construcción fue terminada en el año 1991, ocupa el tercer lugar en orden entre los embalses del país por su capacidad de 330 millones de metros cúbicos y puede entregar 300 millones de metros cúbicos cada año. Está compuesta por una cortina homogénea de arcilla con una longitud de 3.708 km y dos diques con una longitud total de 18.00 km, un aliviadero principal mecánico con 10 compuertas de 39.00 toneladas cada una, un segundo aliviadero auxiliar automático de perfil práctico con vacío de 1500 m de longitud. Las obras de entrega están compuestas por 2 obras de toma y un desagüe de fondo (ver figura 2.1). Tiene como obra de protección contra las filtraciones una pared en suelo de 2613 m compuesta por trinchera de bentonita-cemento y pilotes secantes.



Figura 2.1 Aliviadero Principal. (Fuente autor)

Este embalse tiene como objetivo regular el escurrimiento de los ríos Cauto y Bayamo y se utiliza el riego de cultivos de arroz y caña fundamentalmente, el abasto a la población y la acuicultura; el embalse se encuentra situado en la Cuenca Cauto, en la confluencia de los ríos Bayamo y Cauto, en una zona llana. Los suelos pertenecen a la formación geológica Cauto, con características típicas de arcillas-arenosas, arcillas pesadas, arcillas limosas y muy cambiantes en su estratificación, existen también bolsones de arena. Las características del embalse y las de sus elementos componentes, se presentan en las tablas 2.1, 2.2, 2.3, 2.4 y 2.5; así como la sección transversal de la presa en la fig. 2.2

Tabla (2.1) Características del embalse y de los Aliviaderos.

<b>Características del embalse</b>	
Propietario	INRH
Costo	39,278 MMP
Longitud Río Principal	246.2 km
Área de la Cuenca	3533 km <sup>2</sup>
Área Subcuenca	2385.0 km <sup>2</sup>
Lluvia Media Cuenca	1112 mm
Escurrecimiento Medio	310.0 Hm <sup>3</sup>
Gasto máximo en el cierre	11500.0 m <sup>3</sup> /s
<b>Parámetros de la Obra:</b>	
NAN	26.00 m
VAN	330.00 Hm <sup>3</sup>
NAM <sub>máx</sub>	27.5 m
VAM	450.00 Hm <sup>3</sup>
NAM	10.00 m
VA Muerto	10.00 Hm <sup>3</sup>
Entrega Neta Garantizada	300.0 Hm <sup>3</sup>
<b>Aliviaderos</b>	
<b>1. Aliviadero mecánico y cimacio con perfil práctico con vacío</b>	10 compuertas radiales (12.0 x 6.1 m)
Longitud sección vertedora	141.6 m
Cota de cimacio	19.5 m
Gasto Máximo	11500 m <sup>3</sup> /s
Gasto diseño	6100 m <sup>3</sup> /s
<b>2. Aliviadero Auxiliar automático y cimacio con perfil práctico con vacío</b>	1500.00 m de longitud

Tabla 2.2 Características de las obras de toma, desagüe de fondo, diques y cortina.

<b>Obra de Toma Izquierda</b>	
Tipo de Toma	Torre Clotilde triple con tubería de presión
Cota	21.0 m
Gasto Máx	35 m <sup>3</sup> /s
Compuerta	Tipo: Planas
Dimensión	2.10 x 2.10
Cantidad:	3
<b>Obra de Toma Derecha</b>	
Tipo de Toma	Torre Clotilde doble con tubería de presión
Cota	20.9m
Gasto Máximo	20 m <sup>3</sup> /s
<b>Compuertas</b>	
Tipo	Planas
Dimensión	2.10 x 2.10
Cantidad	2
Mecanismo de Izaje	Electromecánico
Capacidad	15 toneladas
<b>Desagüe de Fondo</b>	
Tipo	Torre y doble galería de hormigón armado
Cota	8.50 m
Dimensiones	3.20 X 3.00
Gasto Máximo	20 m <sup>3</sup> /s
Estado Técnico	Malo
Compuertas de Tipo	Radiales
<b>Dique Izquierdo</b>	
Tipo	Homogéneo (de arcilla) 9688 m
Longitud corona	6.0 m
Ancho:	6.0
Cota	30.5 m
Altura máxima	11.39 m
<b>Revestimiento</b>	
Talud mojado	Enrocamiento
Talud seco	Natural
<b>Dique Derecho</b>	
Tipo	Homogéneo (de arcilla)
Longitud corona	9297 m
Ancho	6.0 m
Cota	30.50 m
Altura máxima	8.23 m

<b>Revestimiento</b>	
Talud mojado	Enrocamiento
Talud seco	Natural
<b>Filtro</b>	
Talud mojado	No
Talud seco	No
<b>Cortina</b>	
Tipo	Homogéneo (de arcilla)
Longitud corona	3708.0 m
Ancho	6.0 m
Cota	30.50 m
Altura máxima	30.00m
<b>Revestimiento</b>	
Talud mojado	Enrocamiento
Talud seco	Césped
<b>Filtro</b>	
Talud mojado	Si
Talud seco	No

Tabla 2.3 Características hidrológicas y fisiográficas.

<b>Sistema de Control Técnico</b>	
Control de Deformaciones	Si
Control de Filtraciones	Existen Vertedores de filtración
Red Piezométrica	No existe
<b>Características Hidrológicas y Fisiográficas</b>	
Área de la Cuenca	5815 km <sup>2</sup>
Área de Cuenca complementaria	2385 km <sup>2</sup>
Corrientes que capta	Río Cauto, Río Bayamo
Altura media de la cuenca	205 m
Pendiente media del río principal	120 %.
Longitud del río principal	246.2 km.
<b>Escurrimiento hasta el cierre</b>	
Probabilidad	Total Anual Hm <sup>3</sup>
Medio	1339.0
75 %	786.0
95 %	307.0
Cv = 0.70	
<b>Parámetros Hidrológicos</b>	
Tipo de regulación	Hiperanual
Volumen Entrega Garantizada	330.0 Hm <sup>3</sup>
Volumen Útil	321.0 Hm <sup>3</sup>
Coeficiente de Regulación	0.880 a 0.820.

Tabla 2.4 Características de la corona y revestimiento de talud.

	Cortina	Dique Izquierdo	Dique Derecho
Material	Arcilla	Arcilla	Arcilla
Longitud de corona (m)	3708	9688	9297
Ancho corona (m)	6.0	6.0	6.0
Ancho de base (máximo) (m)	182	58.40	42
Cota de base (cauce) (m)	0.50	19.11	22.27
Cota corona (m)	30.50	30.50	30.50
Altura máxima fondo río (m)	30.0	11.39	8.23
Tipo de revestimiento (talud mojado)	Enrocamiento	Enrocamiento	Enrocamiento
Tipo de revestimiento (talud seco)	Capa Vegetal con Césped.		
Prisma de drenaje	Si		
Cortina de inyección	Trinchera de bentonita y pilotes secantes - Cemento de Bentonita		

Tabla 2.5 Otras características del embalse.

Cotas (m)	Volumen (hm <sup>3</sup> )	Área Embalse (km <sup>2</sup> )
NAMáx 27.50	400.000	87.0
NA 26.00	330.000	70.4
NM 10.00	9.000	3.0
Probabilidad Avenida%	Carga (m)	Gasto (m <sup>3</sup> /s)
0.5	8	6100
Datos de terraplén		
$c' = 25 \text{ Kpa}$		
$\phi' = 25^\circ$		
$\gamma_f = 19 \text{ KN/m}^3$		
$\gamma_{\text{sat}} = 20 \text{ kN/m}^3$		
$\gamma' = 10 \text{ kN/m}^3$		

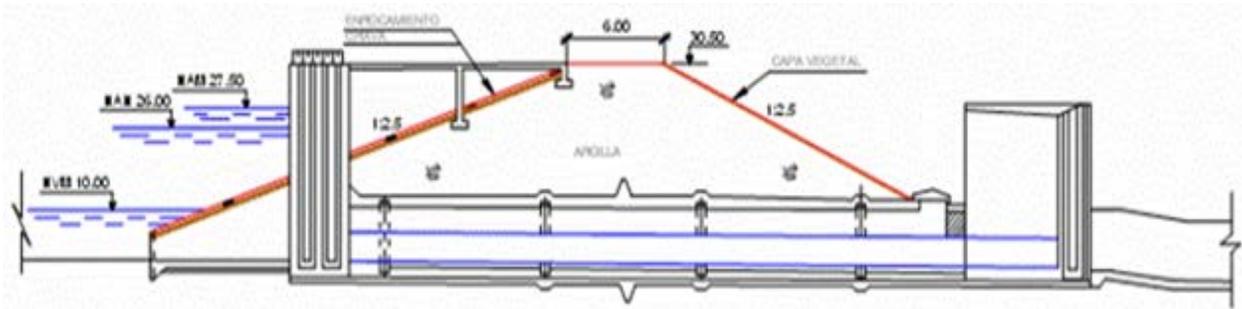


Figura 2.2 Esquema de la sección transversal. Presa Cauto del Paso.

## 2.2 Métodos de cálculo.

### 2.2.1 Solución de Arthur Casagrande para la Línea de Corriente Superior (LCS).

Arthur Casagrande extendió la solución de Kozeny de manera de llegar a soluciones aproximadas, pero de alto valor práctico, útiles para los casos en que el ángulo ( $\alpha$ ) tiene valores comprendidos entre  $60^\circ$  y  $180^\circ$ . Para conocer los problemas de las filtraciones en la Presa Cauto del Paso, se calcula el gasto de filtración que atraviesa el cuerpo de la cortina de materiales locales por este método ya que es uno de los más usados, sobre todo en el país y por cumplir con la condición de salida con un ángulo  $\alpha = 153.435^\circ$ .

La metodología de A. Casagrande se aplicará con referencia a la Figura 2.3 y consiste en los siguientes pasos:

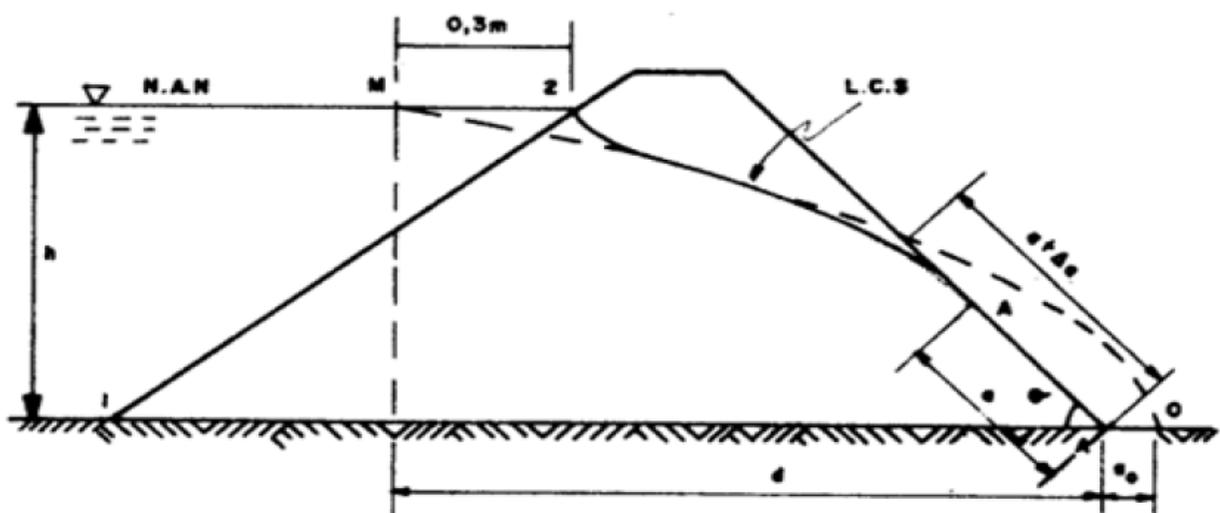


Figura 2.3. Sección transversal.

1. Determinación proyección horizontal (m):

$$m = h * m_1$$

Donde:

h: altura del agua (NAN).

m<sub>1</sub>: talud mojado (aguas arriba).

2. Ubicar el punto M de coordenadas (d; h):

$$M = 0.3 * m$$

Donde:

m: proyección horizontal,

3. Calcular la sección de desarrollo (d):

Seria sumar todas las longitudes desde el punto A hasta el punto M.

4. Calcular la distancia a<sub>o</sub> y y<sub>o</sub>

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

$$y_o = 2 * a_o$$

5. Calcular los puntos de la parábola de la LCS.

$$y = \sqrt{2y_o x + y_o^2}$$

6. Se determina la distancia (a + Δa) entre el pie del talud y la intersección de la parábola con el talud aguas, tal como se señala en la Figura 666.

7. Se determina según Casagrande la posición del punto 4, haciendo uso de la corrección mostrada en la Figura 665. En dicha figura se entra con el valor de α y se determina la ordenada Δa/(a + aΔ).

8. Con el valor de Δa/(a + aΔ), obtenido del paso anterior, y (a + aΔ) obtenido en el paso 6, se despeja Δa, pudiéndose situar el punto 4.

9. Se corrigen "a mano", tanto la condición de entrada como la de salida, siendo esta última tangente al talud en el punto 4, en el caso mostrado en la Figura 665. En el caso que α sea mayor que 90°, como es el de una sección de presa

homogénea con prisma de drenaje, la condición de salida LCS deberá ser tangente a la vertical en el punto 4.

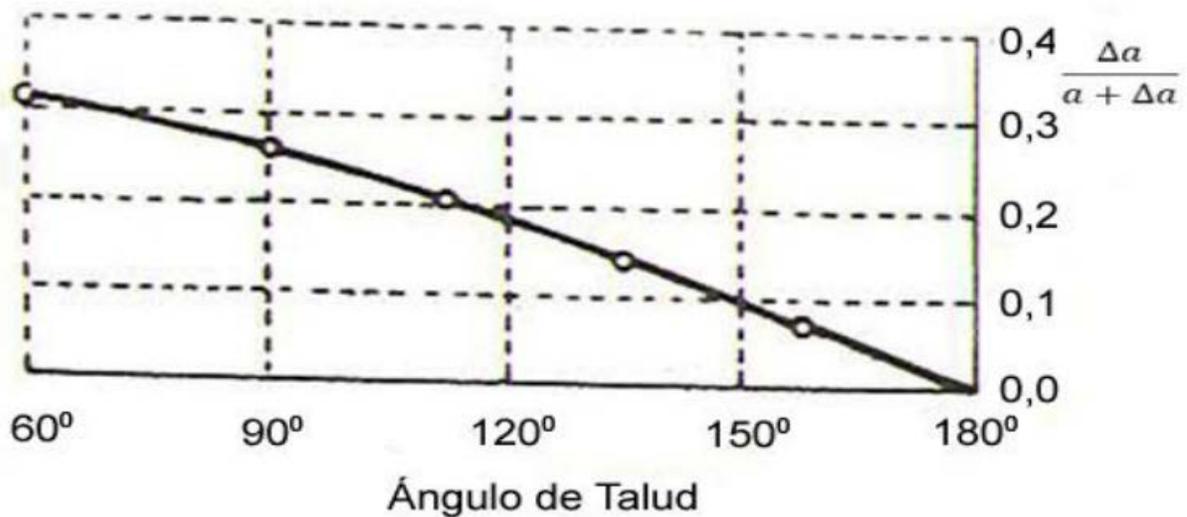


Figura 2.4. Ángulo del talud.

Al concluir con el método de Arthur Casagrande hasta llegar a los puntos ploteados donde se desarrolla la LCS. Debemos trazar el radio: Ubicar el punto O, de coordenadas (x; y). Delimitación del número de dovelas. (a partir del eje, hacia dentro de la cortina se ubican las positivas, y hacia afuera las negativas). Definiendo como ancho de las dovelas (b) entre uno y cinco metros máximos; a partir del eje del radio, y realizado el dibujo de la presa y seleccionadas las dovelas, se realizó el análisis de la estabilidad de taludes mediante el siguiente procedimiento.

### 2.2.2 Métodos de Bishop y Chugaev para la estabilidad de taludes.

El procedimiento de la metodología para la estabilidad de taludes por columnas, con sus correspondientes parámetros de cada dovela, se muestra en la tabla 2.6

Tabla 2.6 Parámetros a determinar en cada columna por dovelas.

Columnas	# dovelas (m)	b (m)	X (m)	senα (X/R)	cos α		
	1	2	3	4	5		
Columnas	Sec α	Tan α	$\delta s$ (m)	$c'x \delta s$ (KN/m)	Z <sub>1</sub> (m)		
	6	7	8	9	10		
Columnas	Z <sub>2</sub> (m)	Z <sub>3</sub> (m)	$\gamma_f * Z_1$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\gamma' * Z_2$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\gamma_{sat} * Z_3$ (kN/m <sup>2</sup> )		
	11	12	13	14	15		
Columnas	$\Sigma = \Sigma(\gamma * Z)$ (kN/m <sup>2</sup> )	W = b * $\Sigma$ (KN/m)	U = $\gamma_w * Z_3$ (kN/m <sup>2</sup> )	U * b (kN/m)	W - u*b (kN/m)		
	16	17	18	19	20		
			<b>F = Asumir un valor.</b>				
Columnas	W * X (KN)	(W-U*b) * tanφ' (KN/m)	Tanα*tanφ'	$\eta$	$\epsilon$	$c'x \delta s * \eta$ (KN/m)	$\epsilon * (W-U*b) * \tan\phi'$ (KN/m)
	21	22	23	24	25	26	27

Metodología para determinar el Factor de Seguridad (Fs) en el estado de carga "Operación" por el método de Chugaev y Bishop.

**Columna #1:** Número de Dovelas.

**Columna #2:** Ancho (b) de dovelas.

**Columna #3:** Cálculo de la Distancia (X) entre ejes de dovelas.

**Columna #4:** Cálculo del seno del ángulo ( $\text{sen } \alpha$ ), dividir la columna # 3 entre el radio.

$$\left( \text{sen } \alpha = \frac{X}{R} \right).$$

**Columna #5:** Cálculo del coseno del ángulo ( $\text{cos } \alpha$ ), sería el coseno del seno<sup>-1</sup> de la columna #4.

**Columna #6:** Cálculo de la secante, dividir 1 entre el coseno o la columna #5.

**Columna #7:** Cálculo de la tangente del ángulo ( $\text{tan } \alpha$ ), multiplicar la columna #4 por la columna #6.

**Columna #8:**  $\delta_s$  = dividir columna #2 entre la columna #5.

**Columna #9:**  $C * \delta_s$  = multiplicar la columna #8 por el cortante (C) según el material de la base de la dovela.

**Columna #10:**  $Z_1$  = medir la altura del material húmedo en el centro de la dovela (desde la LCS hasta el talud seco).

**Columna #11:**  $Z_2$  = medir la altura del material sumergido en el centro de la dovela (desde el cimientto hasta el arco del radio).

**Columna #12:**  $Z_3$  = medir la altura del material saturado en el centro de la dovela (desde la LCS hasta el cimientto).

**Columna #13:**  $\gamma' * Z_1$  = multiplicar el peso húmedo del terraplén por la columna #10.

**Columna #14:**  $\gamma' * Z_2$  = multiplicar el peso sumergido del cimientto por la columna #11.

**Columna #15:**  $\gamma_{\text{sat}} * Z_3$  = multiplicar el peso saturado del terraplén por columna #12.

**Columna #16:** Sumatoria de los pesos por las profundidades ( $\gamma * Z$ ).

**Columna #17:**  $W$  = multiplicar la columna #2 por la columna #16).

**Columna #18:** Peso del agua ( $\gamma_w$ ) por columna #11

**Columna #19:** multiplicar la columna #18 por la columna #2

**Columna #20:** Restar la columna #17 con la columna #19.

**Columna #21:** Multiplicar la columna #17 por la columna #3.

**Columna #22:**  $(W-U*b)*\tan\phi'$  = multiplicar la columna #20 por la tangente del ángulo  $\phi'$

**Columna #23:**  $\tan\alpha * \tan\phi'$  (multiplicar la columna #7 por la tangente de  $\phi'$ )

**Columna #24:**  $\eta = \frac{1}{1 + \frac{\tan\phi' \cdot \tan\alpha}{F}}$

**Columna #25:**  $\varepsilon$  = Multiplicar columna #24 por columna #6

**Columna #26:** Multiplicar columna #9 por columna #24

**Columna #27:** multiplicar la columna #25 por la columna #22.

**Ecuación Según Chugaev para el factor de seguridad:**

$$F_{Ch} = \frac{RE\delta s}{\Sigma W_x} + \frac{RE(W-ub)\tan\phi}{\Sigma W_x}$$

**Ecuación de Bishop para el factor de seguridad:**

$$F_B = \frac{RE\delta s \eta}{\Sigma W_x} + \frac{RE(W-ub)\tan\phi\varepsilon}{\Sigma W_x}$$

**Donde:**

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{\tan\phi' \cdot \tan\alpha}{F}}$$

Ambos métodos de **Bishop y Chugaev** son muy similares en los cálculos, para los cuáles se utiliza la misma metodología lo que para calcular los factores de seguridad cada autor estableció su ecuación los mismos consisten en determinar **El factor de seguridad al deslizamiento que según Bishop** debe de cumplir la siguiente restricción ( $F_B \leq 5\%$ ), de no cumplir se debe recalcular, pero con el resultado obtenido

de Bishop y así sucesivamente se va asumiendo hasta que cumpla. El Método de **Chugaev consiste en determinar** el factor de seguridad ( $F_{CH}$ ), el cuál debe de ser resistente al deslizamiento, de no hacerlo se debe recalcular, asumiendo valores, hasta que cumpla, aunque Chugaev no estableció rango de errores.

Para llegar a los resultados de estos procedimientos aplicados se procesó en una hoja de cálculo de Excel.

### **2.3 Análisis químicos de filtraciones en la Presa Cauto del Paso.**

Para la realización de este estudio se identificaron los focos o vertedores de filtraciones de la presa Cauto del Paso, en los cuales se tomaron 4 muestras de agua en diferentes puntos (cortina, rio cauto aguas abajo y vertedores 11 y 12), cuya identificación, se muestra en la tabla 2.7.

Se llevaron al laboratorio de la empresa de Aprovechamiento Hidráulico. Granma, donde se realizaron los ensayos que se presentan en la tabla 2.8 Los resultados se compararon con las muestras obtenidas de la presa, donde los componentes químicos que se encuentran en el vaso del embalse, que filtran deben ser los mismos elementos que salen por cada uno de los focos de filtración, de lo contrario estaría ocurriendo un proceso de lavado de los materiales, que indica la posible ocurrencia de sifonamiento químico.

Tabla (2.7) Identificación de las muestras.

# Muestras	Identificación
657	Presa Cauto del Paso
658	Rio Cauto Aguas Abajo
659	Vertedor 11
660	Vertedor 12

Tabla 2.8 Ensayos químicos realizados a las muestras de agua.

Ensayo	Nombre	Método de ensayo
pH	PA01 Determinación del pH	Método electrométrico
CE	PA02 Determinación de la conductividad eléctrica	Método electrométrico
Ca <sup>2+</sup>	PA06 determinación de calcio magnesio, y dureza total	Método trimétrico con EDTA
*Mg <sup>2+</sup>	PA06 Determinación de calcio, magnesio y dureza total	Método trimétrico con EDTA
*Na <sup>1+</sup>	PA07 Determinación de sodio por fotometría de llama	Método fotométrico por emisión de llama
*K <sup>1+</sup>	PA08 Determinación de potasio	
Cl <sup>1-</sup>	PA04 Determinación de cloruro	Método de argentométrico
HCO <sub>3</sub> <sup>1-</sup>	PA03 Determinación de carbonatos, bicarbonatos y alcalinidad total	Método de valoración
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	PA03 Determinación de carbonatos	
		Bicarbonatos y alcalinidad total
*DQO	PA11 Determinación de la demanda Química De oxígeno	Autoclaveando muestras
		Bajo presión con dicromato
*O <sub>2</sub> dis	PA18 Determinación del Oxígeno disuelto	SMWW 4500B Método Iodométrico

## CAPÍTULO III. Análisis de los resultados.

### 3.1 Línea de Corriente Superior (LCS).

Con la aplicación del método de Arthur Casagrande se obtuvieron los siguientes resultados:

#### Datos iniciales:

$$K = 5 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s} = 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$L \text{ Total Presa} = 35.8 \text{ m}$$

$$\text{NAN} = 26.00 \text{ m}$$

$$L \text{ Prisma} = 5.8$$

$$\text{CC} = 30.50 \text{ m}$$

$$\text{Talud } m_1 = 1:3$$

$$\text{HTpresas} = 30.50 \text{ m}$$

$$\text{Talud } m_2 = 1:3$$

$$\text{Cota de fondo} = 0.00 \text{ m}$$

$$b = \text{ancho de corona} = 6 \text{ m}$$

$$m = 65 \text{ m}$$

$$\alpha = 154$$

$$\alpha = \text{alfa}$$

$$\beta = 26.565$$

$$\beta = \text{beta}$$

$$d = 87 \text{ m}$$

$$d = \text{sección de desarrollo}$$

1. Proyección Horizontal: (m)

$$m = 65 \text{ m}$$

2. Punto M

$$M = 19.5 \text{ m}$$

3. Sección de desarrollo. (d)

$$d = 87 \text{ m}$$

4. Longitud de la superficie de filtración: en ambos ejes (x) y (y.)

$$a_0 = 1.9$$

$$y_0 = 3.8$$

5. Cálculo de los puntos de la LCS.

$$y = \sqrt{2 * 3.8x + 3.8^2}$$

Los valores obtenidos para el trazado de la línea de la Línea de Corriente Superior y su esquema correspondiente, se muestran en tabla 3.1 y figura 2.5

Tabla 3.1 Coordenadas de los puntos de la LCS.

X(m)	10	20	30	40	50	60	70	80	87
Y(m)	9.8	12.9	15.6	17.8	19.9	21.7	23.4	23.059	26

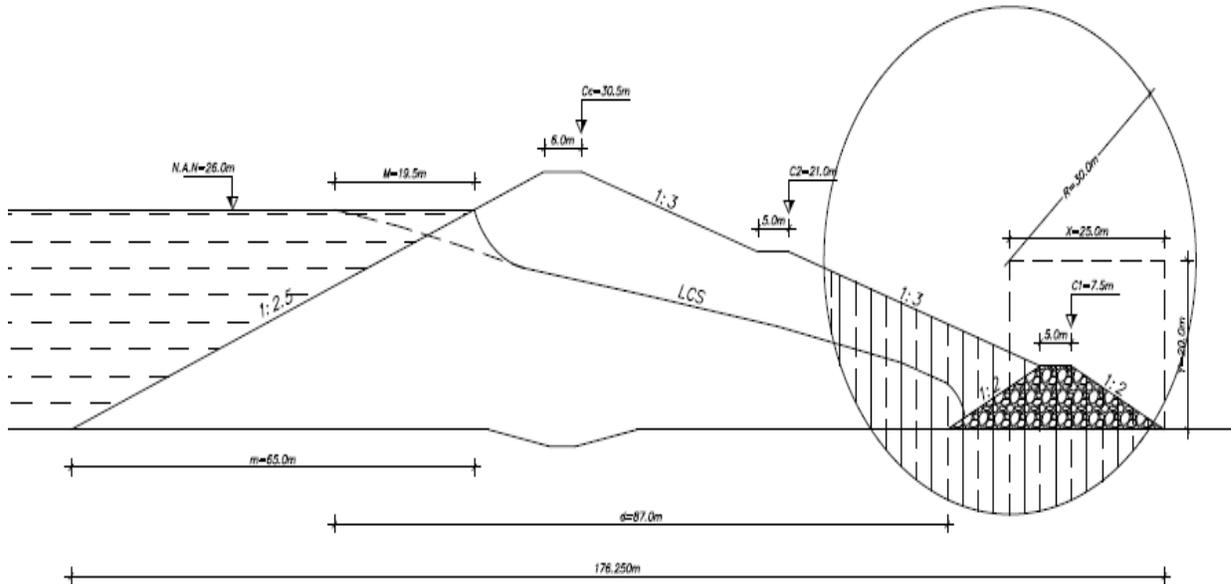


Figura 2.5. Esquema del trazado de la LCS

Los gastos de filtración aumentan con el nivel del embalse debido al gradiente que se produce.

### 3.2 Estabilidad de taludes

Los valores obtenidos por los métodos de Bishop y Chugaev mediante la hoja de cálculo en Excel, se muestran en tabla 3.2.

Tabla 3.2 Resultados del cálculo de estabilidad de taludes. Hoja de cálculo Excel.

# dovela	b (m)	X (m)	sen α (X/R)	cos α	sec α	tan α	δs (m)	Z1 (m)	γf • Z1 (kN/m <sup>2</sup> )	Z2 (m)	γ'•z2 (kN/m <sup>2</sup> )	Z3 (m)	γsat • Z3 (kN/m <sup>2</sup> )
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		14
7	4.5	32.5	0.929	0.37	2.703	2.511	12.16	9.5	180.5		0	13	273
6	3	28	0.8	0.6	1.667	1.334	5	9	171	3.5	35	17.5	367.5
5	5	25	0.714	0.7	1.429	1.02	7.14	8.5	161.5	8	80	16.5	346.5
4	5	20	0.571	0.821	1.218	0.695	6.09	8	152	12.5	125	15.5	325.5
3	5	15	0.429	0.903	1.107	0.475	5.54	7	133	14.5	145	14.5	304.5
2	5	10	0.286	0.958	1.044	0.299	5.22	6.5	123.5	16.5	165	13.5	283.5
1	5	5	0.143	0.99	1.01	0.144	5.05	6	114	17	170	12.5	262.5
0	5	0	0	1	1	0	5	5.5	104.5	17.5	175	10.5	220.5
-1	5	-5	-0.143	0.99	1.01	-0.144	5.05	6	114	17	170	9	189
-2	5	-10	-0.286	0.958	1.044	-0.299	5.22	7	133	16.5	165	6	126
-3	5	-15	-0.429	0.903	1.107	-0.475	5.54	7.5	142.5	14.5	145	4	84
-4	5	-20	-0.571	0.821	1.218	-0.695	6.09	10	190	12.5	125		0
-5	5	-25	-0.714	0.7	1.429	-1.02	7.14	8.5	161.5	8	80		0
-6	5	-25	-0.714	0.7	1.429	-1.02	7.14	6.5	123.5	3.5	35		0

Tabla 3.2 (continuación).

10+12+14	W (Kn/m)	Uc (Kn/m)	U * b (Kn/m)	W- (U*b) (Kn/m)	C'• δs (Kn/m)	19*tanφ' (Kn/m)	W*X (Kn)	tana*tan φ'	η	ε	C' • δs *η (kN/m)	21 * 25
15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
453.5	2040.75	260	1170	870.75	304	405.77	66324.4	1.17	0.816	2.206	248.06	895.13
573.5	1720.5	350	1050	670.5	125	312.45	48174	0.622	0.893	1.489	111.63	465.24
588	2940	330	1650	1290	178.5	601.14	73500	0.475	0.916	1.309	163.51	786.89
602.5	3012.5	310	1550	1462.5	152.25	681.53	60250	0.324	0.941	1.146	143.27	781.03
582.5	2912.5	290	1450	1462.5	138.5	681.53	43687.5	0.221	0.959	1.062	132.82	723.78
572	2860	270	1350	1510	130.5	703.66	28600	0.139	0.974	1.017	127.11	715.62
546.5	2732.5	250	1250	1482.5	151.5	539.63	13662.5	0.052	0.99	1	149.99	539.63
500	2500	210	1050	1450	150	527.8	0	0	1	1	150	527.8
473	2365	180	900	1465	151.5	533.26	-11825	-0.052	1.01	1.02	153.02	543.93
424	2120	120	600	1520	156.6	553.28	-21200	-0.109	1.021	1.066	159.89	589.8
371.5	1857.5	80	400	1457.5	166.2	530.53	-27862.5	-0.173	1.034	1.145	171.85	607.46
315	1575	0	0	1575	182.7	573.3	-31500	-0.253	1.051	1.28	192.02	733.82
241.5	1207.5	0	0	1207.5	214.2	439.53	-30187.5	-0.371	1.077	1.539	230.69	676.44
158.5	792.5	0	0	792.5	214.2	288.47	-19812.5	-0.371	1.077	1.539	230.69	443.96
				Σ=	2111.65	6966.11	125487			Σ=	2116.49	8135.4

### Expresion de Chugaev :

Fch = 2.53

### Expresion de Bishop:

Fb = 2.86

ERROR = 3%

CUMPLE

Los resultados obtenidos de los factores de seguridad tanto por Bishop ( $F_B = 2.86$ ), como por Chugaev ( $F_{CH} = 2.53$ ) indican que el talud es seguro al deslizamiento, independientemente de las filtraciones que se están produciendo en el embalse.

### 3.3 Resultados de los análisis químicos a las muestras de agua.

A continuación, se ofrece un ejemplo de los muestreos realizados y los análisis químicos a las muestras de agua; lo que arrojó a los resultados que se presentan en la tabla 3.3. Obsérvese que las concentraciones de algunos iones aumentan si se compara la muestra del embalse y los vertedores, esto indica que existe lavado del suelo. Para conocer si existe sifonamiento con arrastre de partículas habría que ejecutar mediciones de sólidos en suspensión.

Tabla 3.3 Resultados de los análisis químicos realizados a las muestras de agua.

M	pH(u) T°C	CE $\mu\text{S}/\text{cm}$ 25°C	Ca <sup>2+</sup> mg/l	*Mg <sup>2+</sup> mg/L	*Na <sup>1+</sup> mg/L	*K <sup>1+</sup> mg/L	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> mg	HCO <sub>3</sub> <sup>1-</sup> mg/L	Cl <sup>1-</sup> mg/L	Tu NTU	Color U
	$\pm 0,31$	$\pm 0,08$	$\pm 0,41$	$\pm 0,41$	$\pm 1,78$	$\pm 1,80$	$\pm 1,37$	$\pm 1,37$	$\pm 1,7$		
657	8,16;25	842	67	36	44,6	3,6	0	138	136	0,56	10
658	7,94;25	1882	171	89	65,7	3,0	0	266	354	-	-
659	7,80;25	1857	222	57	62,4	1,7	0	213	409	-	-
660	8,54;25	1105	94	47	53,1	4,3	59	92	211	-	-

En estos muestreos se ve claramente el lavado y absorción de los materiales de la cortina de la presa, la variación de las concentraciones de los elementos químicos varía según el nivel del embalse, es necesario señalar que en el análisis químico de las filtraciones los elementos \*K<sup>1+</sup>, Ca<sup>2+</sup>; \*Mg<sup>2+</sup>; son absorbido por el material de la cortina de la presa. Al producirse este fenómeno varían las características y propiedades físico químicas iniciales del suelo que está en la cimentación o del suelo utilizado como material de la cortina. Estos análisis químicos indican que en la Presa

Cauto del Paso se está produciendo un proceso de lavado de materiales que puede conducir a un sifonamiento químico.

En el análisis se detectó una variación del PH en tendencia al aumento trayendo como consecuencia que aumente el carácter básico de las aguas, favoreciendo el aumento de las reacciones químicas entre el agua de filtración y los elementos de la base cortina. Se supone que comenzado el proceso de sifonamiento químico los materiales locales perderán las propiedades químicas que le dan resistencia, cohesión, plasticidad y a partir de ese momento comienza de forma simultanea el sifonamiento mecánico, para determinar cuándo se produce este proceso, aparejado con el muestreo químico debe realizarse un muestreo de turbiedad para saber si existe arrastre de material, se piensa que el sifonamiento químico habrá dejado de producirse cuando la muestra de agua del vaso de embalse tenga la misma concentración química que la de los focos de filtraciones.

## **CONCLUSIONES**

1. Las filtraciones en presas de materiales locales pueden llegar a constituir un peligro potencial para la estabilidad de los taludes de la sección de la cortina, pues dentro de la masa de tierra pudieran darse condiciones de flujo que no fueron previstas en el diseño, de ahí la importancia del seguimiento a este fenómeno durante el período de explotación del embalse.
2. En la Presa Cauto del Paso se está produciendo un proceso de lavado de materiales que pueden conducir a un sifonamiento químico, constituyendo un riesgo a corto o largo plazo para la estabilidad del embalse.
3. La presa es estable al deslizamiento independientemente de que existe flujo de filtración a través del subsuelo, lavado de materiales y arrastre de iones.

## **RECOMENDACIONES**

1. Continuar el monitoreo de las filtraciones en la presa, así como los análisis químicos, de sólidos en suspensión y de turbiedad a muestras de agua, para darle seguimiento a ocurrencia de sifonamiento químico y mecánico.
2. Tener como reserva 2000 m<sup>3</sup> de áridos de diferente granulometría para ser utilizado en caso de sifonamiento mecánico.
3. Reorganizar los puntos de medición de las filtraciones y realizar las inspecciones visuales al pie del talud seco y la franja de protección, trimestralmente.
4. Se recomienda la introducción de nuevas normas y bibliografías en los archivos y centros de información en el sistema de Recursos Hidráulicos y en los centros de información del MICONS de forma que ayuden al desarrollo de los estudios relacionados con el tema de las filtraciones en cortinas de materiales locales.

## **BIBLIOGRAFÍA**

1. Alberto, C., Dip, O. y Galíndez, E. Levantamiento de patologías estructurales en presas hidráulicas de la región Noa de la República Argentina. San Miguel de Tucumán, Argentina: Instituto de Estructuras. Universidad Nacional de Tucumán. (2010)
2. Ahedo, D. A. Estabilidad de taludes en presas de tierras y enrocamiento. (2003)
3. Alejandro, T. N. Filtraciones. (2010)
4. Álvarez, G.L. La estabilidad de las cortinas de presas de tierra mediante la solución de los estudios tenso-deformacionales y la aplicación de la teoría de la seguridad. Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en ciencias Técnicas, Universidad Central de las Villas, Santa Clara. (1998)
5. Anabela, V. L. Estabilidad de Taludes. (2006)
6. Armas R. Horta, E. Presas de tierra. Ciudad de La Habana, Cuba: Facultad de Ingeniería Civil del Instituto Superior Politécnico «José Antonio Echavarría» (ISPJAE), Editorial ISPJAE. (1987)
7. Álvarez, M., Álvarez, L., Azorín, R y Hernández, A. La estabilidad de taludes, experiencias en su análisis y solución en la ingeniería. La Habana, Cuba: Unión Nacional de Arquitectos e Ingenieros de la Construcción de Cuba (UNAICC), Palacio de las Convenciones. (2015)
8. Armas, R. Criterios para diseñar presas de tierra: prioridad y secuencia Taller Nacional sobre Fallos de presas de tierra. Ciudad de la Habana, Cuba: Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos. (2002)
9. Briones Gutiérrez. Red de flujo en secciones típicas en presas de tierra homogéneas. (2011)
10. Candela, J. Sistemas de Estabilidad de taludes y Laderas. (2008)
11. Espinoza Durán Carlos Eduardo, T.B.L.E. Análisis comparativo entre los métodos de estabilidad de taludes aplicados a las presas de tierra del Proyecto PACALORI: Ingeniería Civil. Cuenca Ecuador, Universidad de Cuenca: Proyecto de graduación previo a la obtención del grado de Ingeniero Civil. (2013)

12. Estrada Restrepo, O. A Presas de terraplén. presas de tierra. (2008)
13. Fernández, V. R. Monografía presa enrocado. (2015)
14. Fellenius, B.H. Basics of foundation design. (2006)
15. Flores Berenguer. Análisis de la estabilidad de taludes en presas de tierra para suelos parcialmente saturados. caso de estudio: Formación Vía Blanca., Instituto Superior Politécnico José Antonio Echavarría. (2016)
16. Juárez, B. E., Rico, R. A. Mecánica de los Suelos; tomo II. (1967)
17. Jorge, B; G. Presas de Tierra sobre Cimentaciones Blandas. Seguridad a la Falla por filtración. (2016)
18. Martín., Sonia. “Sifonamiento Químico en presas de Tierra”. Universidad de La Habana, (2015).
19. Mejías., L. “Análisis de filtraciones y estabilidad de taludes en presas de tierra para suelos parcialmente saturados” Trabajo de Diploma presentado en la obtención de Ingeniero Civil, Universidad Central. (2017)
20. NC: 1255 – 5 – 1:2018. Presas — alcance y contenido de los proyectos de las presas y derivadoras de tierra o de escollera con pantalla de hormigón — parte 5-1: Proyecto de ingeniería de detalle: Presas de tierra
21. Quevedo, S. G. Coeficiente de Seguridad. Estabilidad a corto y largo plazo. Fenómeno de Inestabilidad de taludes. Cálculo de la estabilidad al deslizamiento. (1994)
22. Oliva, G., Aldo Onel. Análisis de estabilidad y seguridad de los taludes” Universidad de Oviedo, Departamento de Explotación y Prospección de Minas Oviedo. (1999)
23. Suárez; G. Evaluación de las filtraciones en el Conjunto Hidráulico Cautillo. Trabajo de Diploma en obtención al título de ingeniero Hidráulico (2009)
24. Ollua, G. Técnicas para filtraciones, caso de estudio: Presa Zaza, obtención del título Ingeniero Civil. Universidad Central Marta Abreu. (2016)
25. Velázquez, A. Trabajo de Diploma Análisis de filtraciones y estabilidad de Taludes en presas de Tierra. Universidad Central Marta Abreu. (2016)

## ANEXOS



Foto 1. Deslizamiento de talud en Presa cauto del Paso. (Fuente GEARH)



Foto 2 Deslizamiento clásico de talud seco por sifonamiento. Fuente (GEARH)