



INSTITUTO SUPERIOR MINERO  
METALURGICO DE MOA  
DR. ANTONIO NUÑEZ JIMENEZ

Ingeniería de Minas  
Facultad: Geología y Minería

# Trabajo de Diploma

Para Optar por el Título de

## Ingeniero de Minas

**Título: Análisis comparativo de los métodos de cálculo  
de taludes más utilizados en suelos**

**Autor: Edwin Mogologolo**

**Tutor (es): Dr.Cs. Rafael Martínez Silva  
Ing. Yanetsis Chacón Pérez**

**Moa, 2015  
“Año 57 de la Revolución”**



## DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Yo: Edwin Mogologolo, autor de este trabajo de Diploma y los tutores Dr.Cs. Rafael Martínez Silva e Ing. Yanetsis Chacón Pérez, declaramos la propiedad intelectual de este trabajo al instituto Superior Minero Metalúrgico para que disponga de su uso cuando estime conveniente.

Para que así conste firmo la presente a los \_\_\_\_\_ días del mes de \_\_\_\_\_ de 2015.

---

Diplomante: Edwin Mogologolo

---

Tutor: Dr.Cs. Rafael Martínez Silva

---

Tutora: Ing. Yanetsis Chacón Pérez

## **PENSAMIENTO**

“Es posible un mundo con una humanidad mejor. Tal vez hoy la primera tarea sea salvar la vida”

José Alberto Mujica Cordano



## **DEDICATORIA**

A mí querida familia y Botswana Congress Party

## **Agradecimientos**

Primero que todo agradezco a Dios por ser mi fortaleza Agradezco a la Revolución Cubana que ha hecho posible y me ha brindado la oportunidad de formarme como profesional y como hombre de bien

Deseo expresar mi gran deuda a mis tutores, Dr.Sc. Rafael Martínez Silva y Ing. Yanetsis Chacón Pérez por sus sugerencias inestimables que han permitido hacer muchas mejoras en este trabajo investigativo

Mi gratitud profunda a mis amigos Chino, Salom, Malakia Jona, Faustin Novela, Dee, Tichaona, Benn, Tshepo Chinthaka, Helio, Helvi, Pombili, Kahundu, Bosala

Se reconoce a todos los compañeros extranjeros en Moa

Gracias a todos profesores de la facultad Geología – Minas

## **RESUMEN**

En este trabajo mediante la comparación del Factor de Seguridad (FS) obtenido de los diferentes métodos de cálculo de taludes se selecciona el diseño más adecuado para las condiciones de trabajo. Primeramente se utiliza el tabulador electrónico para automatizar los tres métodos de cálculo de taludes más utilizados en suelos. Para probar su viabilidad, se comparan los resultados del factor de seguridad obtenido con los métodos de Fellenius, Bishop y Janbú con los obtenidos por el método de Estados Límites del artículo de la revista Ciencia & Futuro V. 3 No Año 2013. Por último se determina la cohesión de 155 kPa necesaria para diseñar el talud de una presa de cola

## ABSTRACT

In this work, through comparison of factor of safety obtained from different methods of calculating the slope is done in order to select an appropriate design for the condition of the work. Firstly, an electronic table is used to atomize the three mostly used methods for calculating the slope in soil. To test its viability, a comparison is made between the factors of safety obtained through the electronic table and the one obtained through the method of state limit published in an article "Ciencia & Futuro V. 3 No Año 2013. Lastly, the needed soil cohesion Of 155kPa is determined to design a stable slope of a tailing deposit with certain characteristics.

## INDICE

Introducción.....	I
1    CAPÍTULO 1. INVESTIGACIÓN DOCUMENTAL.....	1
Introducción .....	1
1.1    Descripción geométrica del talud .....	1
1.2    Manifestaciones y tipos de rotura en los taludes. Suelos.....	2
1.2.1    Agrietamiento por tracción.....	2
1.2.2    Reptación .....	2
1.2.3    Deslizamiento .....	3
1.2.4    Rotura circular .....	3
1.3    Manifestaciones y tipos de rotura en los taludes. Rocas.....	4
1.3.1    Caída de granos .....	4
1.3.2    Descascaramiento .....	5
1.3.3    Caída de bloques.....	5
1.3.4    Lavado superficial o erosión .....	6
1.3.5    Disolución .....	6
1.3.6    Rotura planar .....	7
1.3.7    Rotura en cuña .....	7
1.3.8    Rotura al Volteo.....	8
1.4    Métodos de Cálculo de Taludes para suelos y rocas.....	9
1.4.1    Introducción .....	9
1.4.2    Suelos.....	9
Método de Dovelas .....	9
1.4.3    Rocas .....	19
1.5    Control INSITU de los Parámetros Geomecánicos del Talud .....	20
1.5.1    Penetración Estática CPT.....	20

1.5.2	Dilatómetro plano.....	21
1.5.3	Molinete (Prueba de cortante) .....	22
1.6	Trabajos previos realizados en el área de estudio .....	23
1.7	Conclusiones Parciales .....	25
2	<b>CAPITULO 2. CAMPO DE APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS SELECCIONADOS (SUELOS).....</b>	<b>26</b>
	Introducción .....	26
2.1	Clasificación de los suelos .....	26
2.1.1	Según su origen.....	27
2.1.2	Por el tamaño de sus granos y sus propiedades .....	27
2.2	Plasticidad-LL- LP - IP.....	28
2.2.1	El limite líquido.....	29
2.2.2	Límite plástico.....	30
2.2.3	Índice de plasticidad .....	30
2.3	Análisis granulométrico: .....	30
2.4	Clasificaciones ingenieriles de los suelos .....	31
2.4.1	SUCS.....	32
2.4.2	AASHO (HRB) .....	32
2.4.3	FAA Clasificación de Aeropuertos .....	33
2.5	Ensayos mecánicos típicos en suelos.....	34
2.5.1	Ensayo de compresión simple .....	34
2.6	Conclusiones Parciales .....	38
3	<b>CAPÍTULO 3. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS DIFERENTES MÉTODOS (Anexo 1).....</b>	<b>39</b>
	Introducción .....	39
3.1	Automatización de los métodos .....	39
3.1.1	Comprobación del procedimiento .....	39

Conclusiones Parciales .....	41
4    CAPÍTULO 4. APLICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO A UN CASO DE ESTUDIO .....	42
Introducción .....	42
4.1    Procedimiento de Fellenius .....	43
4.2    Procedimiento de Bishop .....	45
4.3    Procedimiento de Janbu.....	45
Conclusiones Parciales .....	47
Conclusiones Generales .....	48
Recomendaciones.....	48
Bibliografía .....	49
Anexos .....	51

Figura 1. Forma de un talud .....	1
Figura 2. Reptación .....	2
Figura 3(a) diferente superficie rotura (b) morfología de deslizamiento de un talud .....	4
Figura 4. Tipo de superficie de rotura en suelo .....	4
Figura 5. Caída de granos.....	5
Figura 6. Descascaramiento.....	5
Figura 7Caída de bloque .....	6
Figura 8. Lavado superficial .....	6
Figura 9. Disolución.....	7
Figura 10 Rotura planar .....	7
Figura 11. Esquema de la falla en cuña .....	8
Figura 12. Rotura por volteo.....	8
Figura 13. Diagrama de clasificación de métodos de cálculo.....	9
Figura 14. Método de dovela.....	10
Figura 15. Fuerzas que actúa sobre una dovela .....	11
Figura 16. Método de Bishop .....	12
Figura 17. Obtención del factor de seguridad en el método de Bishop.....	13
Figura 18. Método de Janbu.....	13
Figura 19.Método de Spencer.....	15
Figura 20Método de las cuñas para análisis de rotura poligonal.....	16
Figura 21. Elementos básicos de la Teoría de Mohr .....	17
Figura 22. Posición del Angulo Límite $\beta_0$ en función del Estado Tensional .....	18
Figura 23. Resultados de Estado Tensional.....	19
Figura 24. Análisis cinemático de la falla en cuña (Hoek y Bray 1981) .....	19
Figura 25. Piezocono .....	21
Figura 26 Dilatómetro Plano.....	22
Figura 27. Prueba de resistencia a cortante.....	23
Figura.28 Columna de resistencia del suelo.....	23
Figura 29. Suelo .....	26
Figura 30. Determinación del límite líquido .....	29
Figura 31. Gráfico de límite líquido.....	29
Figura.32 Ensayo de límite plástico.....	30

Figura 33 Clasificación para Viales .....	33
Figura 34 Prensa hidráulica.....	35
Figura 35. Ensayo de cortante directo.....	36
Figura 36 Envolvente de Mohr y curva de tensión de formación para diferentes escalones de carga .....	38
Figura 37. Talud de la presa de cola .....	42
Figura.38 Grafico de Fellenius .....	43
Figura 39 Gráfico de Janbu .....	46

Tabla 1	Parámetros del Talud en función del Factor de Seguridad.....	18
Tabla 2	Clasificación de los Suelos atendiendo al tamaño de sus granos. ....	28
Tabla 3	Grados de Consistencia .....	28
Tabla 5	Serie de Tamices.....	31
Tabla 6	Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.....	32
Tabla 7	Significado del Índice de Grupos .....	33
Tabla 8	Clasificación FAA .....	34
Tabla 9.	Modelo de cálculo de la ENIA de Pinar del Rio .....	37
Tabla 10.	Calculo de estabilidad por estado limite - Ciencia & Futuro V. 3 No.4 Año 2013.....	40
Tabla 11.	Resultados de los métodos de Fellenius, Bishop y Janbu.....	41
Tabla 12	Dimensiones de las dovelas y nivel freático .....	43
Tabla 13	Tabulador electrónico de Fellenius.....	44
Tabla 14	Tabulador electrónico de Bishop .....	45

## **INTRODUCCIÓN**

En el cálculo de taludes frecuentemente se necesita comparar los resultados que se obtienen de los diferentes métodos y seleccionar el más idóneo para la tarea que debemos resolver.

La tarea se hace más compleja cuando no se posee los software especializados para ello, debido a que su costo es significativo y no siempre se tiene el financiamiento necesario.

Por otra parte en las actividades docentes se hace necesario poseer esta herramienta para desarrollar las clases prácticas.

### **Problema**

La necesidad de comparar los resultados que se obtienen de los métodos utilizados en el cálculo de taludes para diseñar el talud más adecuado.

### **Hipótesis**

Mediante el tabulador electrónico se pueden automatizar los métodos más usados en el cálculo de taludes en suelos y precisar los parámetros del talud para solucionar una tarea específica.

### **Objeto de investigación**

Taludes.

### **Campo de Acción**

Métodos de Cálculo.

### **Objetivo General**

Definir mediante la comparación del factor de seguridad (FS) obtenido de los diferentes métodos de cálculo de taludes, el diseño más adecuado para sus condiciones de trabajo.

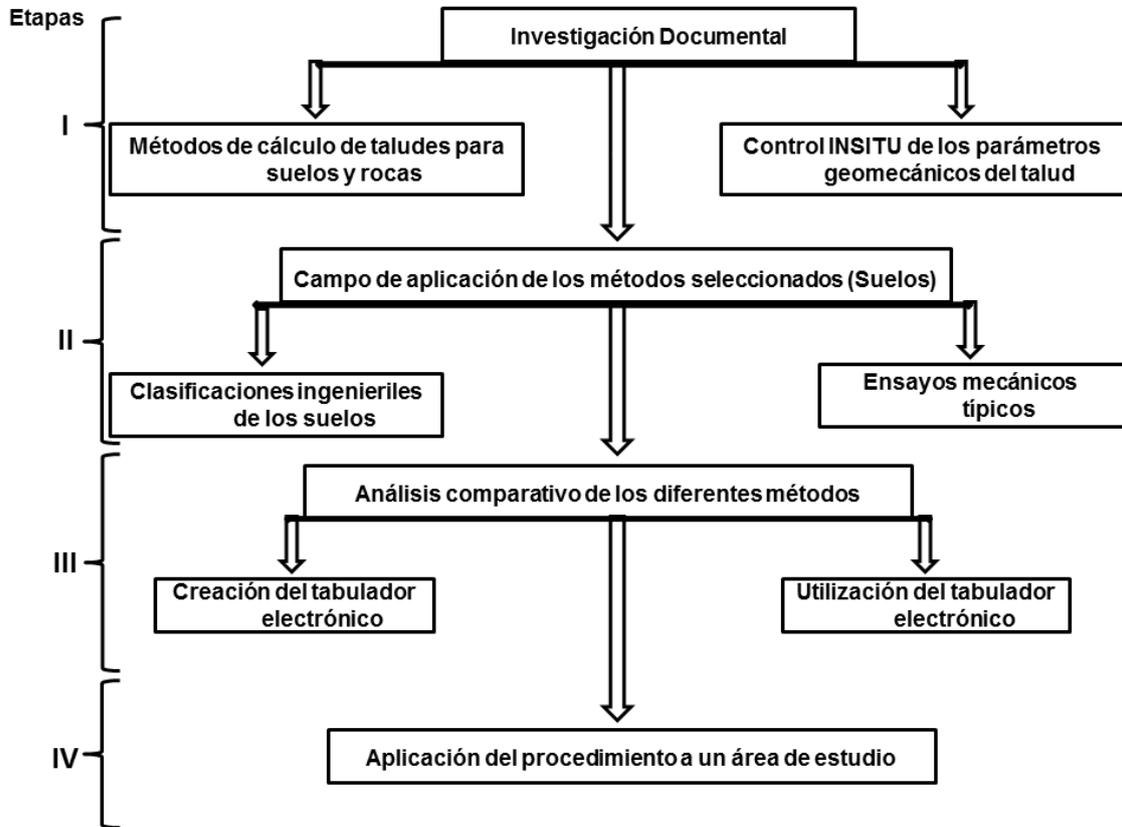
### **Objetivos Específicos**

1. Realizar la investigación documental sobre los métodos de cálculo de taludes en suelos.
2. Describir el campo de aplicación de los métodos seleccionados
3. Analizar comparativamente de los diferentes métodos.
4. Aplicar el procedimiento a un caso de estudio.

## Aportes Prácticos

La automatización de los métodos más utilizados en suelos para el cálculo de taludes.

### Flujograma del Proceso de Investigación Científica (PIC)



# 1 CAPÍTULO 1. INVESTIGACIÓN DOCUMENTAL

## Introducción

Existen dos tipos de taludes: Taludes artificiales y taludes de laderas. El talud artificial es una pendiente o inclinación del terreno que queda después de excavar o sea es el resultado de actividades humanas, mientras que los taludes de laderas se forman naturalmente, sin intervención del hombre.

### 1.1 Descripción geométrica del talud

Los taludes están constituidos por las siguientes características Figura 1:

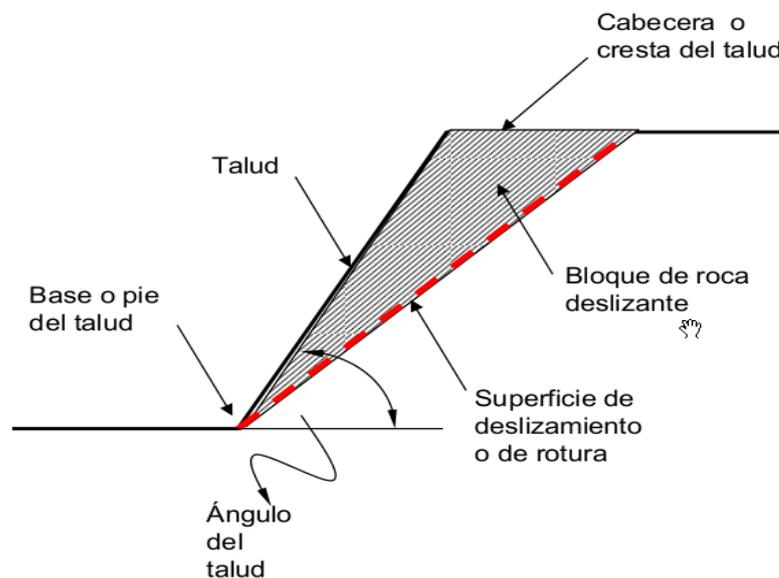


Figura 1. Forma de un talud

El volumen de material medido antes del deslizamiento generalmente, aumenta con el movimiento debido a que el material se fragmenta y aumenta su volumen.

El término “Factor de Esponjamiento” puede ser utilizado para describir éste aumento como un porcentaje del volumen antes del movimiento;

En algunas ocasiones como en el caso de la roca el factor de Esponjamiento puede ser hasta de un 70 %

## 1.2 Manifestaciones y tipos de rotura en los taludes. Suelos

Por diferentes factores los taludes no siempre mantienen su estado de estabilidad. Estos factores incluyen intensas lluvias, actividades sísmicas, peso del material, parámetros de resistencia del material al corte, (cohesión, ángulo de fricción interna) intervención humana.

Siempre, antes de los movimientos masivos en los taludes hay señales que indican posible derrumbe. Esos indicadores ocurren a pequeña escala mientras la roca se mantiene intacta por eso la mayoría no la considera con seriedad. Después de hacer un talud la roca pierde su estado natural, es decir ocurre una relajación de los esfuerzos internos y la superficie se queda expuesta al medio ambiente. Agentes de erosión alteran su estado físico y químico (meteorización). Los siguientes modos de deterioro del talud fueron propuesta de Nicholson y Hencher (1997).

### 1.2.1 Agrietamiento por tracción

La mayoría de los suelos poseen una baja resistencia a la tracción especialmente arriba de la cabeza del talud, entonces el desarrollo de una grieta de tracción facilita la infiltración de agua que debilita la estructura de la roca permitiendo el desarrollo de una superficie de rotura.

### 1.2.2 Reptación

Es un movimiento muy lento que se da en capas superiores del talud. Está relacionado con procesos de variación de humedad estacionales en el suelo, ya que el agua favorece este fenómeno actuando como lubricante. Puede afectar una gran área, en este caso no hay superficie de rotura.

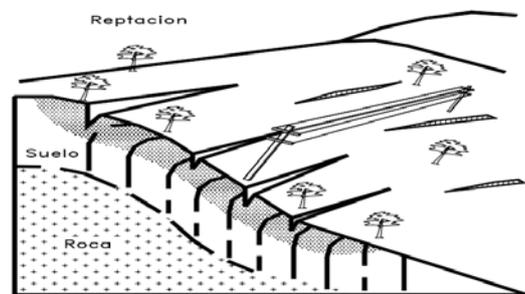


Figura 2. Reptación

### 1.2.3 Deslizamiento

Se produce cuando una gran masa de terreno se convierte en una zona inestable y se desliza con respecto a una zona estable, a través de una superficie o franja de terreno de pequeño espesor.

La ocurrencia de un deslizamiento lleva un proceso, el cual incluyen los siguientes factores:

1. Condiciones originales del talud (susceptibilidad a los deslizamientos);
2. La topografía, geología y características de los materiales y perfiles, condiciones ambientales generales, cobertura vegetal, etc. Estas condiciones determinan una susceptibilidad al deterioro, a la acción de los factores detonantes y al fallamiento.
3. Factores de deterioro (Modificación lenta de las condiciones originales).
4. El resultado es una disminución en la resistencia al cortante del material.
5. Falla progresiva por expansión o fisuración, deformación al cortante, inclinación, desmoronamiento, etc.;
6. Descomposición por desecación, reducción de la cohesión, lavado y remoción de los cementantes, disolución, etc.;
7. Erosión interna o sifonamiento.

Los factores de deterioro pueden producir movimientos en el talud, los cuales en ocasiones pueden ser detectados por medio de métodos geoacústicos o por inclinómetros

### 1.2.4 Rotura circular

Dentro del talud sucede un esfuerzo cortante que vence un esfuerzo resistente al cortante, eso resulta un desarrollo de una superficie de rotura. La rotura toma una forma circular. Este proceso ocurre en suelos blandos (arcilloso homogéneos) o rocas muy fracturadas/alteradas o meteorizadas.

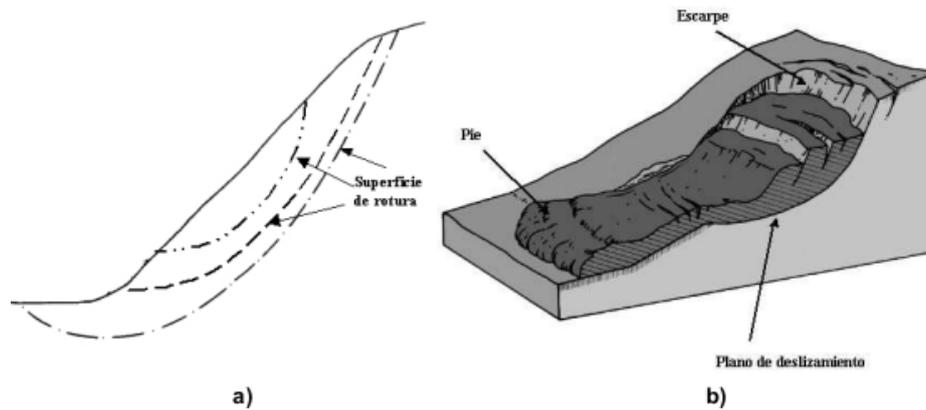


Figura 3(a) diferente superficie rotura (b) morfología de deslizamiento de un talud

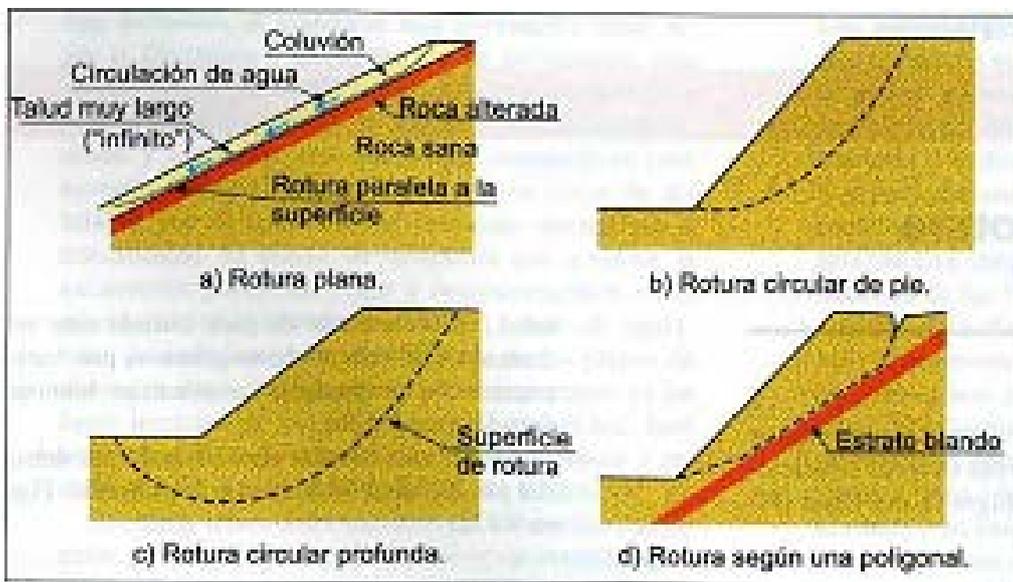


Figura 4. Tipo de superficie de rotura en suelo

### 1.3 Manifestaciones y tipos de rotura en los taludes. Rocas

#### 1.3.1 Caída de granos

El proceso comienza con la caída individual de los granos, la roca pierde su estado de cohesión así que los granos se desintegran físicamente del macizo. Esto no presenta una amenaza eminente pero así comienza la pérdida del soporte que es un colapso a pequeña escala.



Figura 5. Caída de granos

### 1.3.2 Descascaramiento

No es nada más que la caída de láminas o películas que forman las rocas. La evidencia de esta es la acumulación de fragmentos de rocas al pie del talud. Las láminas tienen dimensiones menores así que no posee una amenaza significativa.



Figura 6. Descascaramiento

### 1.3.3 Caída de bloques

En este caso los bloques de diferentes tamaños caen por la gravedad, cambiando totalmente la estructura de un talud. La predictibilidad de amenaza es un poco difícil debido a los diferentes tamaños de bloques que puede caerse.



Figura 7 Caída de bloque

#### 1.3.4 Lavado superficial o erosión

La erosión es el desprendimiento, transporte y depositación de partículas o masas pequeñas de suelo o roca, por acción de las fuerzas generadas por el movimiento del agua. El flujo puede concentrarse en canales produciendo surcos y cárcavas.

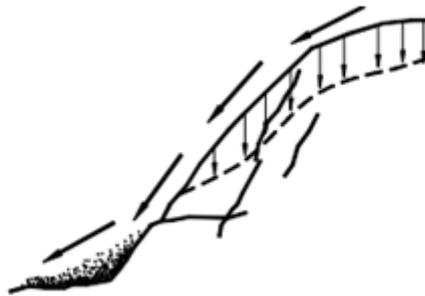


Figura 8. Lavado superficial

#### 1.3.5 Disolución

La lluvia acelera la disolubilidad del material, acumulación del material disuelto (líquido viscoso) produce cavidades en el suelo afectando la estructura de la roca.



## Figura 9. Disolución

### 1.3.6 Rotura planar

La rotura plana de taludes tiene lugar sobre todo en macizos rocosos constituidos por rocas de resistencia media o alta afectadas por fallas y diaclasas.

Este tipo de rotura consiste en el deslizamiento de una masa de roca a lo largo de un plano de discontinuidad que ha quedado descalzado por la cara del talud. Aunque no se trata de roturas excesivamente comunes si pueden observarse ocasionalmente tanto en carreteras como en canteras pudiendo dar en algunos casos a rotura rápidas que pueden causar desde pequeños desprendimiento hasta cortes de carretera en el ámbito de ingeniería civil y deslizamientos importantes con afecciones a uno o varios bancos y accidentes laborales en la minería. Por todo ello, este tipo de rotura debe ser necesariamente tenido en cuenta en el proceso de diseño de taludes en rocas



Figura 10 Rotura planar

### 1.3.7 Rotura en cuña

La rotura o falla en cuña ocurre cuando la masa del macizo se desliza limitada a lo largo por dos discontinuidades que se interceptan en un ángulo oblicuo a la superficie del talud. La litología y la masa del macizo son factores más influentes en esta rotura. La dirección de la línea de intersección debe ser aproximadamente cercana a la del buzamiento de la superficie del talud y además el buzamiento de la línea de intersección debe ser menor que el de la superficie del talud.

El buzamiento de la línea de intersección debe ser menor que el ángulo de fricción interna promedio de las dos superficies.

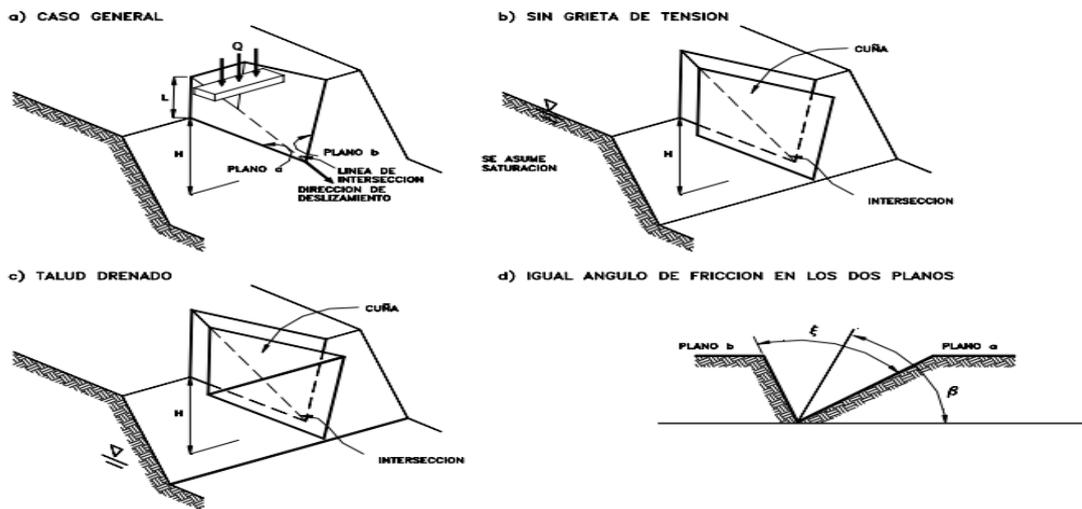


Figura 11. Esquema de la falla en cuña

### 1.3.8 Rotura al Volteo

Las roturas por vuelco de taludes aparecen principalmente cuando el rumbo del plano de discontinuidad, falla, estratificación etc. coincide aproximadamente con el del plano del talud y además tiene un fuerte buzamiento hacia el interior del macizo rocoso.

Cuando el macizo rocoso presenta un conjunto de paquetes que quedan en voladizo, se produce el vuelco o flexión, además, puede aparecer una familia de discontinuidades conjugas con la principal, produciéndose en este caso un vuelco de bloques.

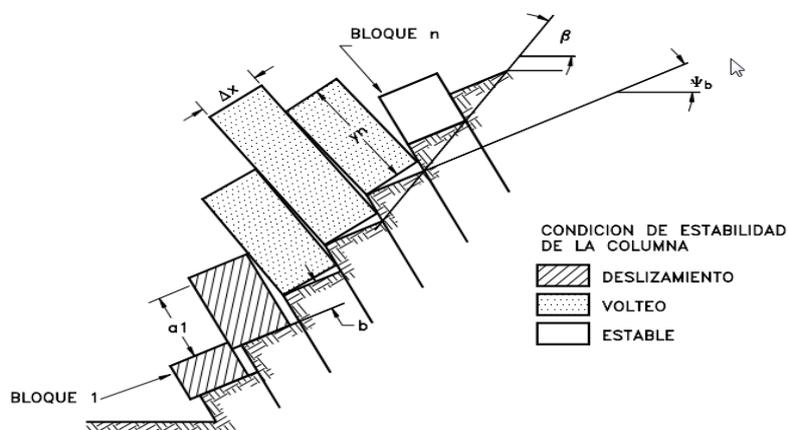


Figura 12. Rotura por volteo

## 1.4 Métodos de Cálculo de Taludes para suelos y rocas

### 1.4.1 Introducción

Teoría que estudia la estabilidad o posible inestabilidad de un talud. La única razón por la que se realiza el estudio de la estabilidad de taludes es para garantizar la seguridad a las personas y sus propiedades. Se han probado que la mayoría de los daños por los movimientos en taludes son evitables. Una investigación de la estabilidad de taludes incluye el estudio geológico, observación de campo, ensayos de laboratorio y cálculos de estabilidad.

Una vez que se terminan las investigaciones sobre las condiciones del sitio y los parámetros de resistencia al corte, se inician los cálculos de taludes. Método de equilibrio límite es uno de los métodos que se usa a nivel internacional. El método de equilibrio límite en el análisis de estabilidad de taludes se basa en la resistencia al deslizamiento de un talud, tomando en cuenta ciertas hipótesis en relación al mecanismo de falla, condiciones de equilibrio, nivel freático, resistencia cortante, etc. Se usa método gráfico analítico para obtener el factor de seguridad.

### 1.4.2 Suelos

En la siguiente figura, se muestra un gráfico en el que se recogen los diferentes métodos de cálculo.

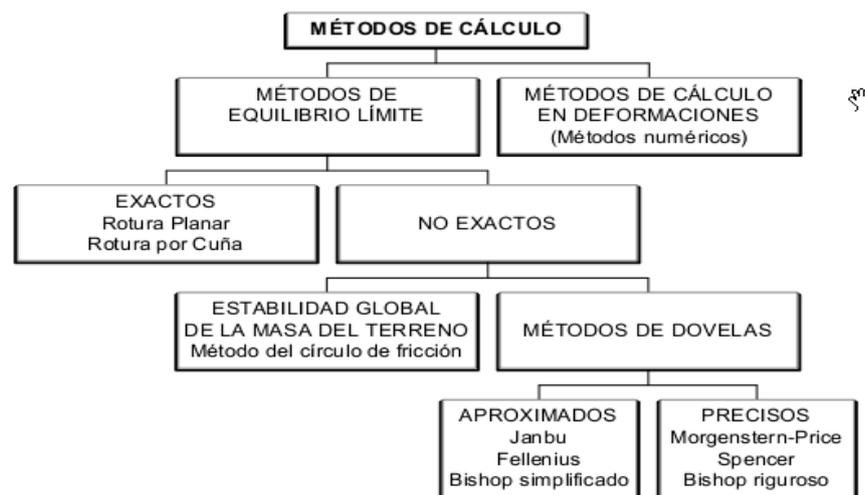


Figura 13. Diagrama de clasificación de métodos de cálculo

### Método de dovelas.

Método de Dovelas

Con este método se pueden analizar superficies de falla circulares y no circulares. La masa deslizante se divide en una serie de dovelas verticales y se establece el equilibrio de las fuerzas que actúan en cada dovela.

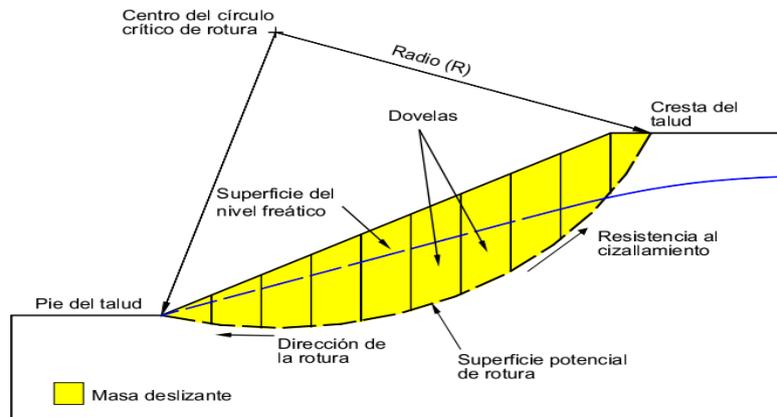


Figura 14. Método de dovela

Los métodos de las dovelas o rebanas pueden clasificarse en dos grupos:

Métodos aproximados

Métodos precisos

### Métodos Aproximados

#### Método de Fellenius (1927)

Fellenius asume que las fuerzas entre tajadas no influyen de manera significativa en el cálculo de la estabilidad ya que son de pequeña magnitud o se anulan casi totalmente entre ellas; aunque este hecho no es

Completamente cierto para determinados casos donde hay cargas no uniformes sobre el terreno. Se aplica nada más a rotura circulares.

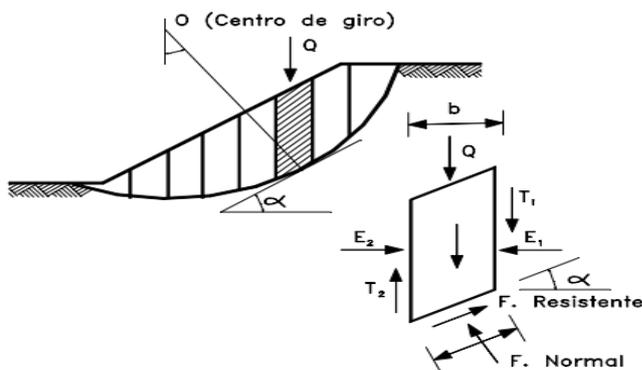


Figura 15. Fuerzas que actúa sobre una dovela

Ecuación de Fellenius

$$FS = \frac{\sum_{i=1}^n [c' L_i + (W_i \cos \alpha_i - u_i L_i) \tan \phi']}{\sum_{i=1}^n W_i \sin \alpha_i + \frac{1}{2} \gamma_w Z^2 \left( \frac{a}{R} \right)}$$

$$z_c = \frac{2c}{\gamma} \tan^2 \left( 45 + \frac{1}{2} \phi \right)$$

$\alpha$  = Angulo del radio del círculo de falla con la vertical bajo el centroide en cada tajada,

W= Peso total de cada tajada;

u= Presión de poros =  $\gamma_w h$ ;

b= Ancho de la tajada;

$c'$ ,  $\phi$ = Parámetros de resistencia del suelo;

$\gamma$ = Peso específico del terreno;

Z= Profundidad de la grieta de tracción.

#### Método simplificado de Bishop (1955)

Bishop desarrolló un método de rebanadas con las siguientes hipótesis. La masa deslizante se divide en rebanadas. Es similar a la de Fellenius excepto que considera equilibrio de fuerzas en dirección vertical. Asume que las fuerzas entre dovelas igualan a cero por estar equilibradas. Se establece el equilibrio de momento de las fuerzas actuantes en cada rebanada respecto al centro del círculo. Se aplica solo a rotura circular.

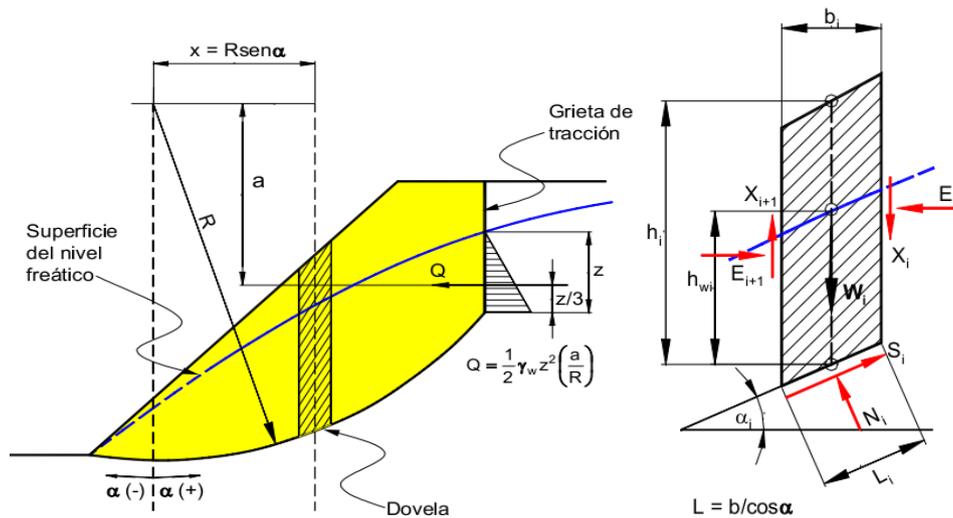


Figura 16. Método de Bishop

$$FS = \frac{\sum_{i=1}^n \left[ \frac{c' b_i + (W_i - u_i b_i) \tan \phi'}{\cos \alpha_i \left[ 1 + \frac{\tan \alpha_i \tan \phi'}{FS} \right]} \right]}{\sum_{i=1}^n W_i \sin \alpha_i + \frac{1}{2} \gamma_w z^2 \left( \frac{a}{R} \right)}$$

Donde

C-cohesión;

L-longitud de la base de la dovela;

W-peso (kN/m);

$\phi$ -ángulo de fricción interna;

u-presión intersticial de los poros;

$\gamma_w$ -peso específico de agua (9,8 kN/m<sup>3</sup>);

Z-profundidad de la grieta de tracción;

R-radio de la superficie de rotura;

$\alpha$ -ángulo de la base de la dovela;

b- ancho de la tajada;

h-altura de la tajada.

Para calcular el factor de seguridad con el método de Bishop se sigue casi el mismo procedimiento de Fellenius.

Para obtener una (solución) el factor de seguridad requiere un proceso iterativo por eso se hace un tanteo con diversos círculos de diferentes centros y radios para obtener un factor de seguridad mínimo, es decir los punto criticos, como se muestra en la siguiente figura:

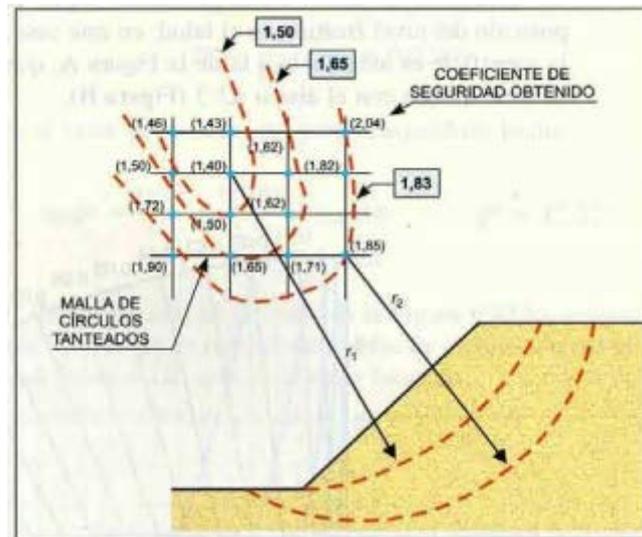


Figura 17. Obtención del factor de seguridad en el método de Bishop  
Método de Janbu (1955)

El método está diseñado para cualquier superficie de falla. Supone que la interacción entre rebanadas es nula, pero a diferencia de Bishop, el método busca el equilibrio de fuerzas y no de momentos.

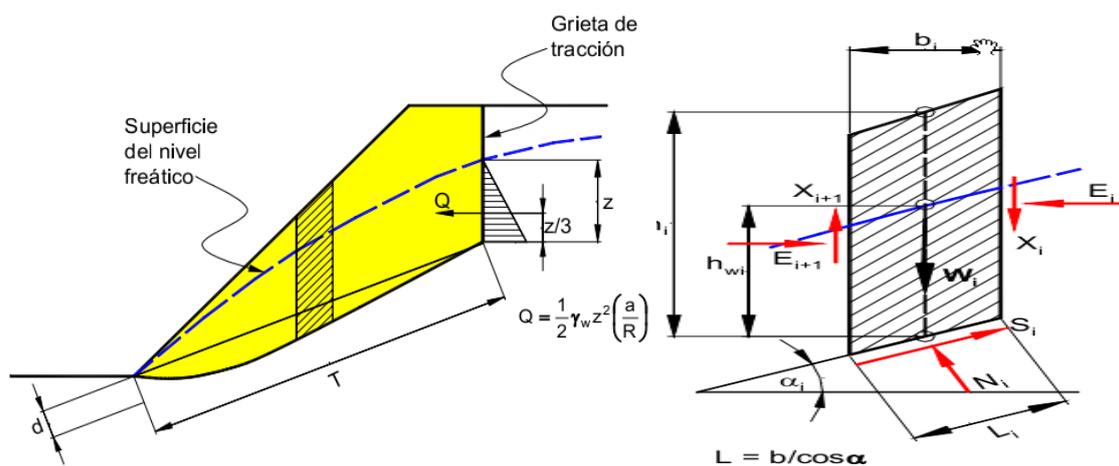


Figura 18. Método de Janbu

$$FS = \frac{f_o \sum_{i=1}^n \frac{[c' + (\gamma h_i - \gamma_w h_{wi}) \tan \phi'] (1 + \tan^2 \alpha_i) b_i}{\left(1 + \frac{\tan \alpha_i \tan \phi'}{FS}\right)}}{\sum_{i=1}^n W_i \tan \alpha_i + \frac{1}{2} \gamma_w z^2}$$

$$f_o = 1 + k \left( \frac{d}{T} - 1,4 \left( \frac{d}{T} \right)^2 \right) \quad \begin{array}{l} \text{Para } c' = 0; \quad \Rightarrow k = 0,31 \\ \text{Para } c' > 0, \phi' > 0 \Rightarrow k = 0,50 \end{array}$$

Donde

C- cohesión;

L- longitud de la base de la dovela;

W- peso (kN/m):

$\phi$ -ángulo de fricción interna;

u-presión intersticial de los poros;

$\gamma_w$ -peso específico de agua (9,8 kN/m<sup>3</sup>);

Z-profundidad de la grieta de tracción;

R-radio de la superficie de rotura;

$\alpha$ -ángulo de la base de la dovela;

FS-Factor de seguridad;

b- ancho de la tajada;

h-altura de la tajada;

### Métodos Precisos

#### Método de Spencer

El método de Spencer es un método general de corte, realizado en la base del equilibrio límite. Se requiere satisfacer el equilibrio de fuerzas y momentos actuando en bloques individuales. El bloque es creado mediante la división del suelo sobre la superficie de deslizamiento dividiendo planos. Las fuerzas actuando en bloques individuales se muestran en la siguiente figura.

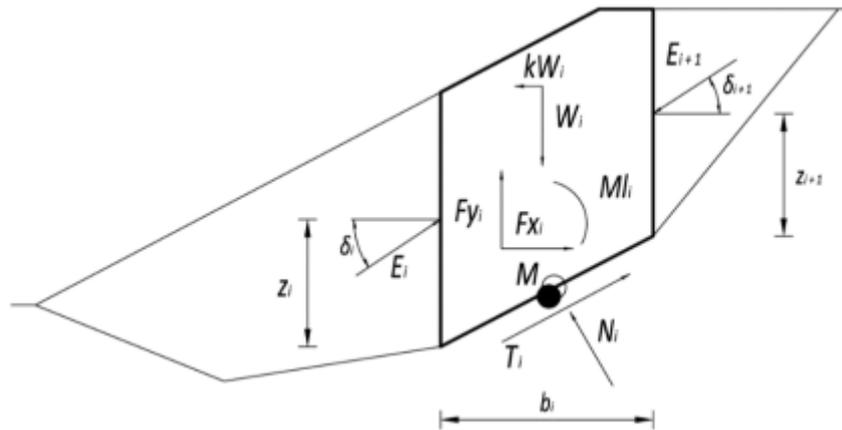


Figura 19. Método de Spencer

Existen otros métodos como son:

Método de talud infinito

Es un sistema muy rápido y sencillo para determinar el factor de seguridad en un talud. Este se basa en las siguientes suposiciones:

Suelo isotrópico y homogéneo;

Talud infinitamente largo;

Superficie de falla paralela al talud;

El caso más simple si no hay cohesión:

$$F = \frac{\tau}{s} = \frac{\sigma n}{s} = \frac{tg\phi}{tg\alpha}$$

Dónde:

$$\sigma n = \frac{W \cos \alpha}{l} = \gamma H \cos 2\alpha;$$

$$S = \frac{W \sin \alpha}{l} = \gamma H \sin \alpha \cos \alpha;$$

l=longitud de la base de la tajada;

$\phi$ =ángulo de fricción interna.

Método de las cuñas

Es muy importante aclarar que este método de las cuñas no tiene ninguna relación con la rotura de tipo “cuña”. La masa deslizante se divide en bloques mediante líneas verticales como se muestra a continuación. Luego se calcula el peso de cada cuña.

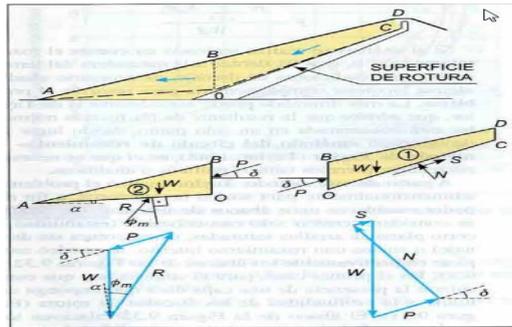


Figura 20 Método de las cuñas para análisis de rotura poligonal

Método de Taylor (1937)

Taylor, T.W. (1937) puso de manifiesto que 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.

Método de Hoek y Bray (1981)

Es aplicable solamente en suelo de rotura circular por el pie de talud. Se basa en el método de Taylor, se presume que la tensión normal se concentra en un solo punto de la superficie de rotura, que el material de talud es homogéneo y también se considera la existencia de una grieta de tracción.

$\gamma$ =peso específico del terreno.

Método por estado limite

Método de Martínez (2009)

La base teórica que se utiliza para la solución de este problema es la Teoría de Resistencia de Mohr.

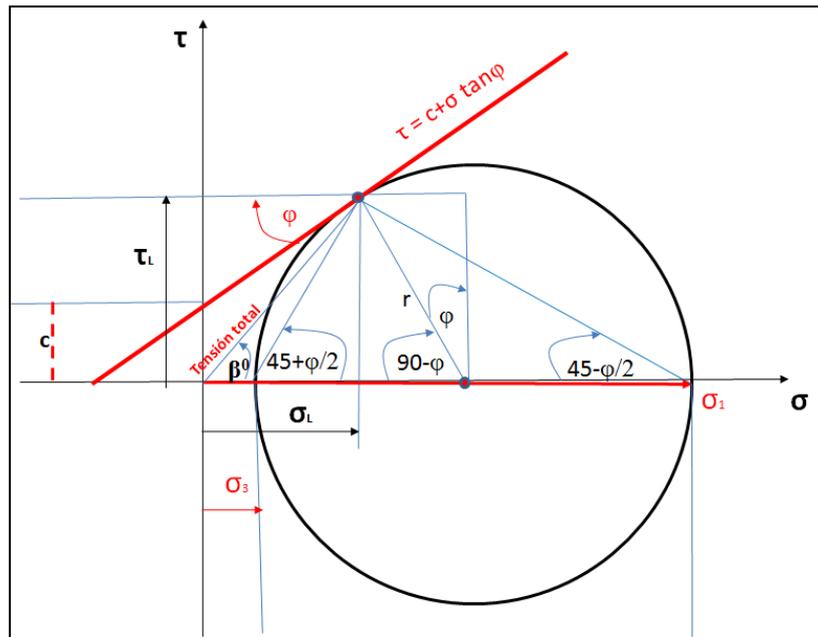


Figura 21. Elementos básicos de la Teoría de Mohr

Los parámetros que definen dicha teoría pueden observarse en la figura 23, en la misma se representan las tensiones límites correspondientes al estado tensional así como el ángulo límite  $\beta_0$ .

Este ángulo es menor que  $\alpha = (45 + \phi/2)$  el cual define teóricamente la posición de la superficie de ruptura (Sowers and Sowers Tomo 1-pág 176-año 1987). Si realizamos un grupo de ensayos límites notaremos que el valor del ángulo límite ( $\beta_0$ ) solo coincide con el de ( $\alpha$ ) para el caso de estado tensional unidimensional. Figura 22.

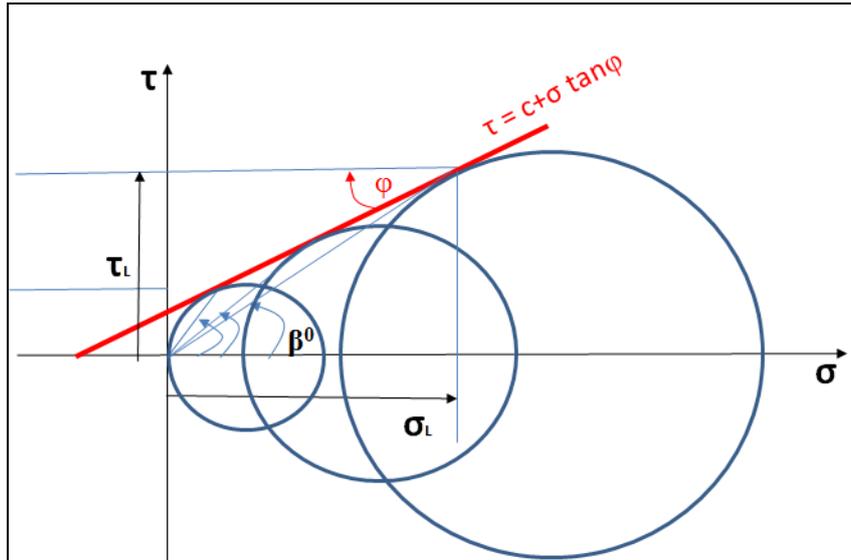


Figura 22. Posición del Ángulo Límite  $\beta^0$  en función del Estado Tensional. Observe como los valores de ( $\beta^0$ ) van disminuyendo a medida que el Estado Tensional aumenta su magnitud.

En la Tabla 1 se observa como el Factor de Seguridad se aproxima a la Unidad a medida que aumenta las dimensiones del Talud. Esto significa que para ese material el talud máximo que puedo obtener lo define el Factor de Seguridad.

Tabla 1 Parámetros del Talud en función del Factor de Seguridad

Datos de Entrada			Resultados			
$\sigma_1$ kPa	$\sigma_3$ kPa		h	b	$\beta^0$ límite	Fs
100	5.23	Menor	2.77	2.30	50.31	2.24
150	30.67	Intermedio	4.31	5.42	38.51	1.45
200	56.11	Máximo	5.94	9.14	33.03	1.12

Los valores de "Datos de Entrada" y "Resultados" se introducen manualmente de la "Hoja de Trabajo".

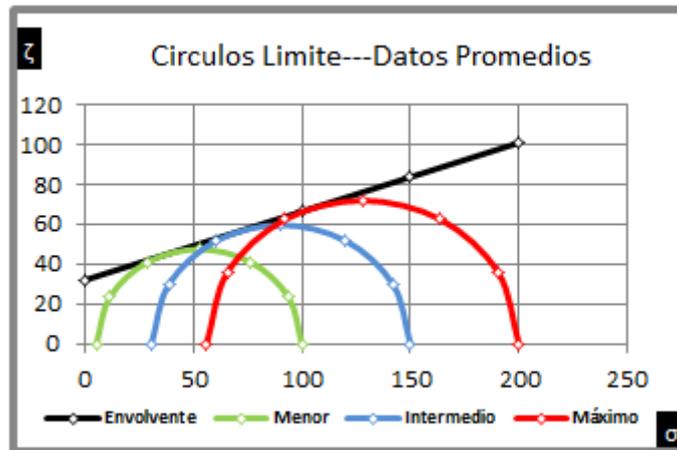


Figura 23. Resultados de Estado Tensional

### 1.4.3 Rocas

De los métodos analíticos para resolver los problemas de vuelco de taludes, uno de los más difundidos es el propuesto por Goodman y Bray (1977), que se adapta sobre todo a taludes que presentan roturas con base escalonada ascendente regular, del tipo de vuelco de bloques de la figura 10.

Existen algunos desarrollos ulteriores basados en este modelo de Goodman y Bray (1977) como el de Bobet (1999), posteriormente desarrollado por Sagaseta (2001), que considera cada bloque de espesor diferencial, pudiendo así integrar toda la masa y permitiendo realizar análisis sobre un número ilimitado de bloques.

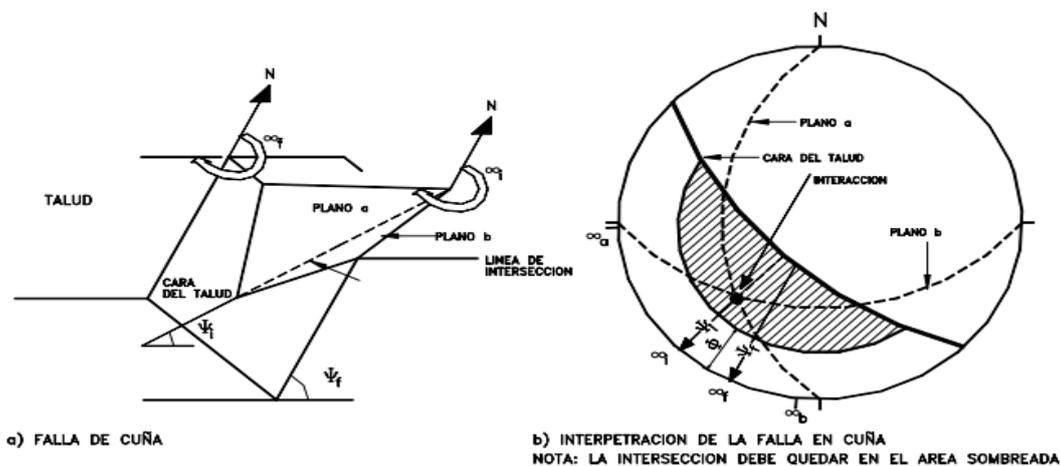


Figura 24. Análisis cinemático de la falla en cuña (Hoek y Bray 1981)

El factor de seguridad se puede calcular después del análisis cinemático.

Caso general

$$FS = \frac{3}{\gamma_r H} h(ca^*x + cb^*y) + (A - \frac{\gamma_w}{2\gamma_r} y) \tan \phi_b$$

Dónde:

ca y cb: cohesión;

$\phi_a$  y  $\phi_b$ : ángulo de fricción;

$\gamma_r$ : peso unitario de la roca;

$\gamma_w$ : peso unitario del agua;

H: altura total del bloque;

X; Y; A y B: depende de la geometría;

$\Psi_a$ : buzamiento de los planos a y b;

$\Psi_i$ : buzamiento de la intersección;

## 1.5 Control INSITU de los Parámetros Geomecánicos del Talud

Las investigaciones INSITU se hacen con el fin de conocer y cuantificar las condiciones del terreno que puedan afectar a la viabilidad, diseño y la construcción de un talud. Se identifican los problemas de inestabilidad del terreno. También se determinan las propiedades geotécnicas necesarias para el diseño y la construcción de un talud. Existen varias formas de realizar esta investigación.

### 1.5.1 Penetración Estática CPT

El ensayo de penetración estática CPT consiste en hincar a presión en el suelo a una velocidad constante de 2 cm/seg una punta cónica que permite medir por separado la reacción que opone el suelo a la penetración del cono ( $q_c$ ) y el rozamiento de un manguito ubicado por encima del mismo ( $f_s$ ). El ensayo CPT (piezocono) permite medir además la presión de poro que se genera durante la hinca. La reacción necesaria para la hinca está dada por el propio peso del vehículo o por anclajes al terreno.

El ensayo CPT puede realizarse con puntas mecánicas o eléctricas. El ensayo CPT es completamente electrónico y las medidas son efectuadas por captadores de presión, amplificadas y tratadas por un convertidor A/D.

Se calibra periódicamente siguiendo las normativas internacionales.

Se determinan 3 parámetros del suelo a intervalos de 20, 5 o 1 cm:

1. Resistencia por punta  $q_c$ ;
2. Rozamiento del fuste  $f_s$ ;
3. Presión intersticial  $u$ .

Además de ser un ensayo rápido, repetible y que altera mínimamente el suelo, presenta las siguientes ventajas:

Distinguir entre penetración drenada, parcialmente drenada o no drenada;

Detección de capas delgadas con una precisión muy superior a la de los sondeos convencionales;

Clasificación del suelo;

Evaluación de parámetros geotécnicos.

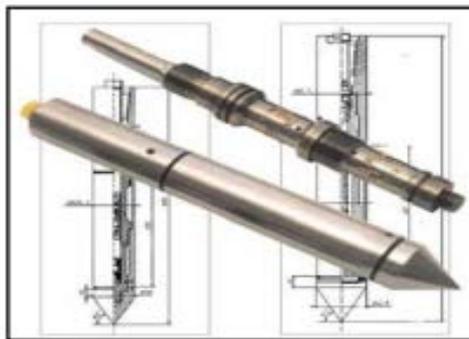


Figura 25. Piezocono

Además de ser un ensayo rápido, repetible y que altera mínimamente el suelo, presenta las siguientes ventajas:

Distingue entre penetración drenada, parcialmente drenada o no drenada;

Detección de capas delgadas con una precisión muy superior a la de los sondeos convencionales;

Clasificación del suelo;

Evaluación de parámetros geotécnicos.

### 1.5.2 Dilatómetro plano

El ensayo dilatométrico consiste, de igual forma que el ensayo presiométrico, en efectuar una puesta en carga lateral progresiva del terreno. La sonda

utilizada tiene un diámetro de 72 mm y es introducida en el taladro realizado anteriormente en el terreno. Las tensiones se aplican escalonadamente gracias a la inyección de un fluido (agua o nitrógeno), mediante la bomba multiplicadora de doble acción, desarrollada por geotest.



Figura 26 Dilatómetro Plano

La resolución de la medida de deformación de la cavidad es de 10 m. Así pues, se obtiene una excelente curva de deformaciones del terreno respecto a las tensiones aplicadas.

Los parámetros obtenidos son los siguientes:

1. Horizontal Stress Índice;
2. Tipo de suelo (estratigrafía);
3. OCR sobre consolidación del suelo;
4. DR % (Compasividad) y  $f_s$  (rozamiento en suelos granulares);
5. M (módulo Edométrico) y E en suelos granulares y cohesivos;
6.  $\zeta$  en suelos cohesivos (cortante).

#### 1.5.3 Molinete (Prueba de cortante)

Se introduce el taladro en el suelo que se analiza y se gira, en la superficie para obtener la resistencia a cortante  $\zeta$  y la sensibilidad (tixotropía).

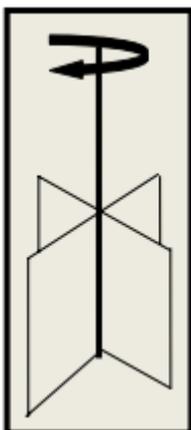


Figura 27. Prueba de resistencia a cortante

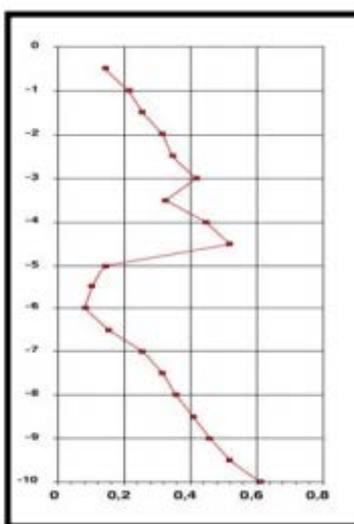


Figura.28 Columna de resistencia del suelo

### 1.6 Trabajos previos realizados en el área de estudio

A continuación se relacionan algunos trabajos recientes sobre análisis de estabilidad de taludes a nivel mundial, juntos con los trabajos que han hecho en Cuba.

Durán & Berzoza (2013) hicieron un análisis comparativo entre los métodos de estabilidad de taludes aplicados a las presas de tierra del proyecto “Pacalori” en Ecuador. Utilizaron un software slope/w para cuantificar la seguridad de una presa de tierra. Previo al cálculo se efectuaron muestreos y ensayos para asignar las características geotécnicas de resistencia propias del cimiento y terraplén. Después introdujeron los datos de sus características mecánicas para que el software realice la modelación de la geometría de la presa. Consideraron la variabilidad de hipótesis que se puede asignar a los métodos

usados en el análisis de taludes así como las condiciones en que se logran un factor de seguridad confiable. Con esta información se procede a la modelación del comportamiento mecánico de la presa, permitiendo aproximar los factores de seguridad mínimos que se tendrán para el diseño y futuras medidas de mitigación.

Las investigaciones de las condiciones ingeniero -geológicas y geotécnicas se realizaron.

Margarida (2012) hizo una evaluación geotécnica de los deslizamientos en la mina kimberlítica-Catoca en Angola, debido a los problemas de inestabilidad de taludes producidos durante el proceso de explotación y profundización. Las investigaciones de las condiciones ingeniero -geológicas y geotécnicas se realizaron con el objetivo de llegar a un diagnóstico que permitiera conocer su geodiversidad, las capacidades de estabilidad, las causas y los condicionantes que dan lugar a los deslizamientos. Se identificaron y caracterizaron en el yacimiento las zonas de ocurrencias de deslizamientos, mediante las propiedades del macizo, condiciones hidrogeológicas, las condicionales geotécnicas y factores antrópicos, la incidencia de lluvias y aguas subterráneas. Se describen los diferentes mecanismos de deslizamiento que ahí tienen lugar, los factores que contribuyen con su desarrollo y origen. Por último se procesaron los datos, con ayuda de diferentes programas de cómputo, los que permitieron la determinación y proyección de taludes ideales para la mina.

Sorbazo, Villalobos & King (2011) estudiaron la estabilidad de taludes en rocas sedimentarias meteorizadas existentes en la ciudad de Concepción. Primeramente se realiza una descripción geológica de la roca sedimentaria perteneciente a la formación Quiriquina, mediante la utilización de mapas e información geológica disponible. Luego se presentan resultados de ensayos de corte directo realizados en el laboratorio, lo cual permite determinar valores de parámetros resistentes de la arenisca perteneciente a la formación Quiriquina. Finalmente se analiza la estabilidad de taludes en arenisca por medio de métodos de equilibrio límite. Se analizan los casos de falla plana y falla de cuña, usando los valores de los parámetros obtenidos en los ensayos de laboratorio. Se concluye que además de la importancia de la determinación

adecuada de valores de cohesión y ángulo de fricción en condiciones residuales y saturadas, resulta fundamental la determinación previa de las posibles superficies de falla.

### **1.7 Conclusiones Parciales**

1. Se ha decidido usar los tres métodos de Fellenius, Bishop simplificado y Janbu en el cálculo del talud.
2. Inconvenientes de estos métodos es la forma empírica de obtener la superficie de falla.

## 2 CAPITULO 2. CAMPO DE APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS SELECCIONADOS (SUELOS)

### Introducción

En el presente capítulo se utiliza el suelo como campo de aplicación en el cálculo de los taludes. Es muy importante para familiarizarse con los conceptos fundamentales de la mecánica de suelos para entender los taludes.

Los suelos están formados por diferentes minerales que poseen su forma, características y que al unirse dan lugar a la estructura de aquellos, las cuales varían según los tipos de suelos. Se define el suelo como un material formado por partículas sólidas y poros rellenos de agua o aire sin cementación o poco cementado, originado por la alteración de las rocas y sobre él se desarrolla la mayor parte de la actividad humana y biología

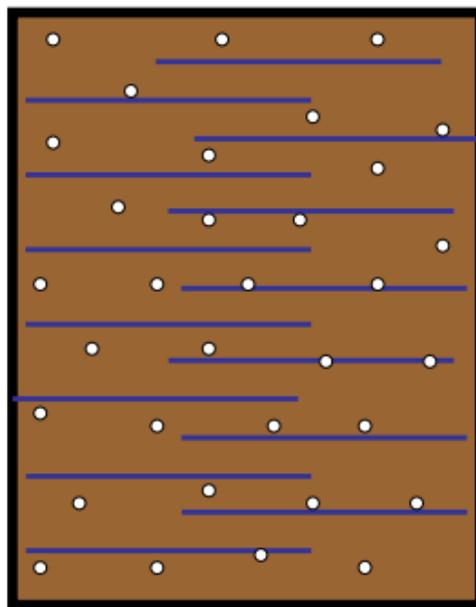


Figura 29. Suelo

En la figura 29 se distinguen la fase sólida formada por el fondo carmelita, la líquida por las líneas azules y la gaseosa por las pequeñas circunferencias blancas. Ellas conviven al unísono y la magnitud de las mismas determinan las cualidades del suelo y por consiguiente sus características mecánicas.

### 2.1 Clasificación de los suelos

Los suelos se clasifican atendiendo a las siguientes características:

### 2.1.1 Según su origen

#### Eluviales

Materiales de la corteza de intemperismo de las rocas madres y que permanecen en el mismo lugar de origen, caracterizándose por la falta de regularidad en sus características físico mecánicas.

#### Coluviales

Depósitos de material detrítico proveniente del desmoronamiento de las rocas vivas, arrastradas ladera abajo por efecto de la gravedad y acumuladas al pie del talud.

#### Aluviales

Sedimentos arrastrados por las aguas de corrientes fluviales y depositadas lejos de su lugar de origen.

#### Proluviales

Sedimentos arrastrados por las corrientes intermitentes entre montañas y que se depositan gradualmente en forma de abanico; los fragmentos más grandes al pie del talud y las partículas finas en el extremo del abanico.

#### Deluviales

Sedimentos compuestos generalmente por suelos finos arrastrados por el escurrimiento de las aguas pluviales a lo largo de las pendientes de las laderas y depositados en su base.

### 2.1.2 Por el tamaño de sus granos y sus propiedades

Los suelos se clasifican en:

#### Suelos finos

Consistencia;

Sensibilidad o susceptibilidad Tixotrópica;

Actividad;

Compresibilidad y Permeabilidad indirecta;

Contracción.

## Suelos gruesos

Compacidad relativa;

Saturación;

Contenido de Carbonato;

Licuefacción.

Tabla 2 Clasificación de los Suelos atendiendo al tamaño de sus granos.

Tabla # 1				
SUELOS	DENOMINACION	SIMBOLO	GRUPO	DIMENSIONES DE LAS PARTICULAS (mm)
FINOS	COLOIDES			menor que 0.001
	ARCILLAS	C		menor que 0.002
	LIMOS	M		de 0.002 a 0.020
GRUESOS	ARENAS	S	FINAS	de 0.021 a 0.295
			MEDIAS	de 0.296 a 0.840
			GRUESAS	de 0.841 a 2.000
	GRAVAS	G	PEQUEÑAS	de 2.001 a 9.520
			MEDIAS	de 9.521 a 38.100
			GRANDES	de 38.101 a 76.200

### 2.2 Plasticidad-LL- LP - IP

Los suelos están formado por limos o arcilla, material que cambia su estado físico en función del contenido de agua que poseen por eso es necesario analizar como la fase liquida influye en su propiedades mecánicas.

Tabla 3 Grados de Consistencia

ESTADOS DE CONSISTENCIA	
Estado liquido	posee las propiedades y apariencia de una suspensión
Estado semilíquido	con las propiedades de un fluido viscoso
<b>Estado plástico</b>	<b>se comporta plásticamente</b>
Estado semisólido	tiene la apariencia de un sólido pero disminuye el volumen al someterse a secado
Estado sólido	el volumen del suelo no varía con el secado

EL estado plástico se puede esquematizar en la siguiente forma:



Como puede observarse el límite líquido limita la frontera izquierda y el límite plástico la derecha, ambos se definen como el contenido máximo o mínimo de agua que posee la masa de arcilla para abandonar la fase plástica. La diferencia entre ambos se le denomina índice de plasticidad.

### 2.2.1 El límite líquido

Para determinar el límite líquido se pone la muestra de arcilla ranurada con las dimensiones especificadas. La ranura se realiza con el “ranurador”.

La copa está acoplada a una manivela que permite levantarla y hacerla caer repetidamente hasta conseguir que la ranura producto de las vibraciones se cierre (estamos en presencia de una masa plástica, que tiende a desplazarse producto del impacto).



Figura 30. Determinación del límite líquido

El número de golpes necesario para que se cierre la ranura para un contenido de humedad determinado se va ploteando en un gráfico.

El contenido de agua para el cual se cierra la ranura a los 25 golpes determina el límite líquido.

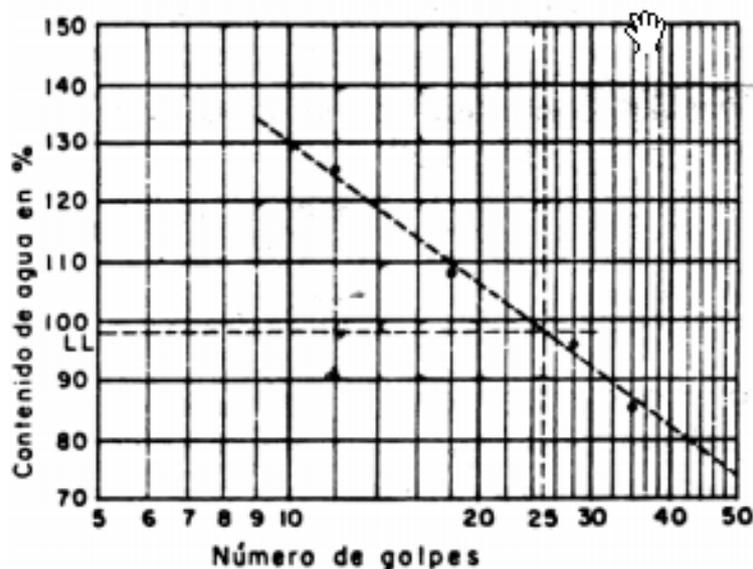


Figura 31. Gráfico de límite líquido

Debido a que la ranura tiende a cerrarse para determinado número de golpes, se deduce que para ese contenido de agua la resistencia al desplazamiento es la misma para todos los suelos plásticos. Los experimentos corroboraron dicha hipótesis obteniéndose una resistencia al corte de 25 gr. / cm<sup>2</sup> (250 Pa).

### 2.2.2 Límite plástico

Determinación del límite plástico, según la recomendación de Terzaghi, se prepara cilindros de 3 mm de diámetro del suelo que se estudia. Una vez obtenido este se dobla, presiona y así sucesivamente hasta que se desmorona. En ese instante se determina su contenido de agua y este se corresponde con el límite plástico.

Tal experiencia manual no ha podido ser sustituida por medios mecánicos y se ha demostrado que la experiencia y la habilidad del operador, no es influyente en los resultados. Las figuras siguientes demuestran el proceso.



Figura.32 Ensayo de límite plástico

### 2.2.3 Índice de plasticidad

Se calcula por la siguiente ecuación:

$$I_p = LL - L$$

La diferencia representa las posibilidades del suelo de absorber o perder agua y mantener sus condiciones de plasticidad.

### 2.3 **Análisis granulométrico:**

El procedimiento para el análisis granulométrico es con cribado mediante tamices e hidrómetro (densímetro).

Tabla 4 Serie de Tamices

Tabla			
Tyler standart		U.S. Bureau of Standards	
Malla (pulgada)	Abertura (mm)	Número	Abertura (mm)
3	76.200	4"	101.600
2	50.800	2"	50.800
	26.670	1"	25.400
	18.850	3/4"	19.100
	13.330	1/2"	12.700
	9.423	3/8"	9.520
3	6.680	1/4"	6.350
4	4.699	4	4.760
6	3.324	6	3.360
8	2.362	8	2.380
9	1.981	10	2.000
10	1.651	12	1.680
14	1.168	16	1.190
20	0.833	20	0.840
28	0.589	30	0.590
35	0.417	40	0.420
48	0.295	50	0.297
60	0.246	60	0.250
65	0.208	70	0.210
100	0.147	100	0.149
150	0.104	140	0.105
200	0.074	200	0.074
270	0.053	270	0.053
400	0.038	400	0.037

## 2.4 Clasificaciones ingenieriles de los suelos

Los tres tipos más utilizados del sistema de clasificación de suelos son:

SUCS — Sistema Unificado de Clasificación de Suelos;

AASHO (HRB) — Sistema de clasificación de Viales,

FAA — Sistema de clasificación de aeropuertos.

### 2.4.1 SUCS

Tabla 5 Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.

Suelo	# 4	# 200	$C_u$	$C_c$	LL	LP	$I_p$
GW	+ 50	- 5	> 4	1—3			
GP	+ 50	- 5	< 4	> 3			
GM	+ 50	+ 12	$I_p < 4$ para la fracción que pase la malla # 40				
GC	+ 50	+ 12	$I_p > 7$ para la fracción que pase la malla # 40				
SW	- 50	- 5	> 6	1—3			
SP	- 50	- 5	< 6	> 3			
SM	- 50	+ 12	$I_p < 4$ para la fracción que pase la malla # 40				
SC	- 50	+ 12	$I_p > 7$ para la fracción que pase la malla # 40				
ML		+ 50			< 50		< 4
CL		+ 50			< 50		> 7
OL		+ 50			< 50		< 4
MH		+ 50			> 50		< 4
CH		+ 50			> 50		> 7
OH		+ 50			> 50		< 4
<b>SUELOS ALTAMENTE ORGANICOS (TURBAS)</b>							
$P_L$					300-500		100-200
<b>GRUPOS COMBINADOS (ejemplos)</b>							
GW-GM	+ 50	entre 12 y 5	> 4	1—3			
ML-CL		+ 50			< 50		$4 < I_p < 7$

El símbolo matemático delante del número indica por ejemplo, que el suelo GW posee más del 50% superior a la malla # 4 y menos del 5% inferior a la malla # 200.

W— well graded (bien graduados);

P— poorly graded (pobremente graduados);

O— organic (orgánicos);

L— low compressibility (baja compresibilidad);

H— high compressibility (alta compresibilidad);

### 2.4.2 AASHO (HRB)

El sistema clasifica los suelos granulares y finos de manera análoga al anterior, pero con porcentos diferentes.

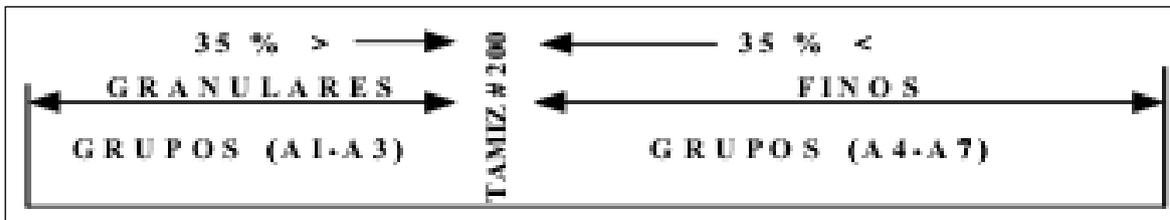


Figura 33 Clasificación para Viales

El índice de grupo se calcula de la forma siguiente:

$$IG=0,2a+0,005a*c+0,001b*d$$

a-% de material que pasa el tamiz 200 comprendido entre:

pasó el 35 %----material aceptable a >1

pasó el 75 %----material aceptable a = 40

pasa entre (35—75) %--- material no aceptable

b--% de material que pasa el tamiz 200 comprendido entre:

Pasa el 15 %--- material aceptable b >1

Pasó el 55 %--- material aceptable b = 40

Pasa entre (15—55) % --- material no aceptable b = 0

$$c = LL - 40$$

$$C \leq 40 \quad c = 0$$

$$C \geq 60 \quad c = 20$$

$$d = I_p - 10$$

$$10 < I_p < 30$$

Tabla 6 Significado del Índice de Grupos

IG	Suelo
0--4	Granulares
8--12	Limosos
16--20	Arcillosos

#### 2.4.3 FAA Clasificación de Aeropuertos

Toma en consideración para su clasificación el contenido de arena.

Tabla 7 Clasificación FAA

		ARENA					
		← GRANULARES 55 % < E1-E2-E3-E4-E5		← <55 % LIMOSOS-ARCILLOSOS E6-E7-E8-E9-E10-E11-E12-E13			
		Material que pasa el tamiz 10 %			Material que pasa el tamiz #40		
Grupo de Suelos	Material retenido en el tamiz #10 (%)	Arena gruesa que pasa el tamiz #10 y queda retenida en el #40 %	Arena fina que pasa el tamiz #40 y queda retenida en el #200 %	Combinación de arcilla y limo que pasa el #200 %	Límite Líquido	Índice de Plasticidad	
Granulares	E-1	0 - 45	+40	-60	-15	-25	-6
	E-2	0 - 45	+15	-85	-25	-25	-6
	E-3	0 - 45			-25	-25	-6
	E-4	0 - 45			-35	-35	-10
Finos	E-5	0 - 45			-45	-40	-15
	E-6	0 - 55			+45	-40	-10
	E-7	0 - 55			+45	-50	10 - 30
	E-8	0 - 55			+45	-60	15 - 40
	E-9	0 - 55			+45	+40	.20
	E-10	0 - 55			+45	-70	20 - 50
	E-11	0 - 55			+45	-80	+30
	E-12	0 - 55			+45	+80	
E-13	0 - 55	CENIZO Y HUMUS			EXAMEN DE CAMPO		

Si el % del material retenido en el tamiz #10 es mayor que el indicado, la clasificación puede elevarse, siempre que el material sea de buena calidad y esté bien graduado.

## 2.5 Ensayos mecánicos típicos en suelos

Es el ensayo que más comúnmente se lleva a cabo en el laboratorio para analizar el comportamiento de los suelos que incluye los siguientes:

### 2.5.1 Ensayo de compresión simple

En la figura siguiente tenemos una prensa hidráulica para el ensayo en suelos, posee los platos superior e inferior entre los cuales (flecha roja) se coloca el espécimen para el ensayo, la carga se determina mediante el anillo dinamométrico superior y se aplica con el vástago que contiene al plato inferior.

El extensómetro (reloj de carátula) acoplado a la base del plato inferior nos permite leer las deformaciones verticales. (Existen otros procedimientos de medición de las deformaciones ya estudiados incluyendo las deformaciones

laterales). El procedimiento de cálculo también puede consultarse en la norma, es muy simple y comúnmente se adiciona a la expresión conocida de la tensión normal uno o varios coeficientes de carácter empírico como vimos en el ensayo de rocas.



Figura 34 Prensa hidráulica

Cortante directo - Normas Esfuerzo cortante directo.pdf

Cita

Esta Norma Cubana especifica un método para la determinación de los parámetros resistentes ángulo de rozamiento interno ( $\phi$ ) y la cohesión (C), de una muestra de suelo en dependencia del tipo de ensayo.

Se contemplan en total tres tipos de ensayos:

¾ consolidado drenado (CD),

¾ consolidado no drenado (CU),

¾ no consolidado no drenado (UU).

En dependencia de las condiciones de trabajo del suelo y el tipo de suelo a ensayar, además en caso que sea necesario se pueden determinar los parámetros  $C_r$  y  $\phi_r$  de la resistencia al cortante residual del suelo después de la rotura. Antes de comenzar a preparar una determinada serie de especímenes, es preciso tener en consideración lo siguiente:

¾ Las dimensiones de las muestras de ensayo;

- ¾ Si los especímenes de ensayo son alterados o inalterados;
- ¾ En caso de muestras inalteradas, es necesario conocer la orientación respecto al plano de corte;
- ¾ En caso de especímenes compactados, es necesario conocer el contenido de humedad y el peso específico seco que debe obtenerse, así como el esfuerzo de compactación que requiere aplicarse;
- ¾ La cantidad de especímenes que compone una serie de ensayos;
- ¾ Las presiones normales  $\sigma_n$  que deben aplicarse;
- ¾ Si se requiere o no la resistencia residual.

Las expresiones de cálculo son conocidas y generalmente se le adicionan coeficientes empíricos.

El ensayo de cortante directo se hace aplicando el estado tensional complejo ( $\sigma$ - $\tau$ ) obteniéndose en el sistema de ejes los puntos necesarios para trazar la envolvente de Mohr.

Los aspectos relacionados (particulares) para los diferentes tipos de ensayos están especificados en la norma de referencia.



Figura 35. Ensayo de cortante directo

La figura anterior muestra una prensa para ensayo de corte directo (ensayo tensional complejo), en la misma se observa lo siguiente:

- ¾ La muestra se coloca en la caja indicada por la flecha roja (sobre un carro que no se ve en la foto que le permite deslizarse horizontalmente)
- ¾ mediante el sistema de pesas de una prensa de momentos (flecha de doble sentido

amarilla) se aplica la carga vertical controlada mediante el dinamómetro indicado por la flecha amarilla de un solo sentido.  $\frac{3}{4}$  la carga horizontal se aplica a partir de un dispositivo indicado con la flecha blanca inclinada y controlada mediante el dinamómetro horizontal indicado por la flecha blanca vertical.

Tabla 8. Modelo de cálculo de la ENIA de Pinar del Rio

Organismo VICONS	Dependencia UICP del Río	Envolvente de Mohr y Diagrama tensión cortante - desplazamiento ( $\zeta = \sigma \tan \phi + C$ )						Clave de		Tipo de recorrido	
Obra Pche La Paila		Registro	NC	Anillo dinamométrico No			Constante		Simple		
Cala 2	Muestra 1	Profundidad 8.30-12.00		Masa g					Multi-uración		
Operador	Calculista	Fecha 2008-10-31		Área cm <sup>2</sup>					Tipo de ensayo		
Tipo	Tipo			Deformación Máxima Vertical ΔH(mm)					Consolidado Drenado (CD)		
				Resistencia máxima (Q) kPa					Consolidado No Drenado (CU)		
				Resistencia residual (Q <sub>u</sub> ) kPa					No Drenado No Consolidado (UU)		
				Tensión contra hundimiento kPa					Humedad		
Descripción		Arena gruesa de color caramielita									
#	Tensión kPa		Peso específico húmedo kN/m <sup>3</sup>		Peso específico seco kN/m <sup>3</sup>		Relación de Vacíos e		Saturación S (%)		Espécimen
	σ	C	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	
1	100	102	2.02	2.02	1.66	1.66	0.66	0.66	84	91	Cohesivo Inalterado
2	200	128	2.03	2.04	1.65	1.66	0.67	0.66	87	89	Cohesivo Compactado
3	300	154	2.08	2.09	1.73	1.75	0.59	0.57	101	95	Arena Seca Suelta
4											Arena Seca Compactada
5											Arenas Saturadas
											No Cohesivo Parcialmente Sat
Promedio	200	128	2.04	2.05	1.68	1.69	0.64	0.63	91	92	Unido

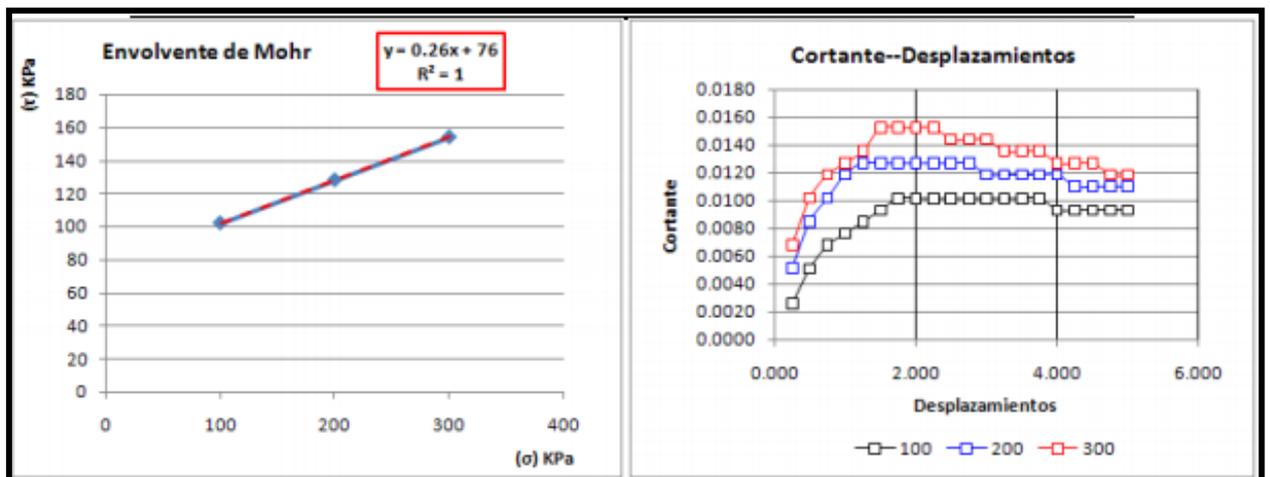


Figura 36 Envolvente de Mohr y curva de tensión de formación para diferentes escalones de carga

## 2.6 Conclusiones Parciales

1. Se identifican las propiedades mecánicas del suelo para pronosticar su estabilidad.
2. Se estudia las características de los suelos para saber su posible uso

### 3 CAPÍTULO 3. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS DIFERENTES MÉTODOS (ANEXO 1)

#### Introducción

Como se ha mencionado en la conclusión parcial del capítulo 1, se van a usar los tres métodos (Fellenius, Bishop y Janbu) para hacer el cálculo de talud. Primeramente se crea un tabulador electrónico automatizado y posteriormente se hace un análisis comparativo de los diferentes métodos de cálculo de talud.

#### 3.1 Automatización de los métodos

En este capítulo se crea un tabulador electrónico para calcular la estabilidad de un talud, es decir sencillamente se plantea o programa las tres ecuaciones siguientes en el programa de Excel de tal manera que automáticamente calcule la estabilidad de un talud una vez que se introduce los datos necesario.

$$FS = \frac{\sum_{i=1}^n [c' L_i + (W_i \cos \alpha_i - u_i L_i) \tan \phi']}{\sum_{i=1}^n W_i \sin \alpha_i + \frac{1}{2} \gamma_w z^2 \left( \frac{a}{R} \right)}$$

Ecuación 1. De Fellenius

$$FS = \frac{\sum_{i=1}^n \left[ \frac{c' b_i + (W_i - u_i b_i) \tan \phi'}{\cos \alpha_i \left[ 1 + \frac{\tan \alpha_i \tan \phi'}{FS} \right]} \right]}{\sum_{i=1}^n W_i \sin \alpha_i + \frac{1}{2} \gamma_w z^2 \left( \frac{a}{R} \right)}$$

Ecuación 2. De Bishop

$$FS = \frac{f_0 \sum_{i=1}^n \frac{[c' + (\gamma h_i - \gamma_w h_{wi}) \tan \phi'] (1 + \tan^2 \alpha_i) b_i}{\left( 1 + \frac{\tan \alpha_i \tan \phi'}{FS} \right)}}{\sum_{i=1}^n W_i \tan \alpha_i + \frac{1}{2} \gamma_w z^2}$$

Ecuación 3. De Janbu

##### 3.1.1 Comprobación del procedimiento

El estudio de la estabilidad de los taludes es una tarea complicada, con un pequeño error en los cálculos de los taludes se pueden perder vidas o sufrir

daños materiales, así que antes de proponer un método o procedimiento de cálculo de taludes, se debe aprobar la viabilidad del mismo. El método propuesto debe pasar por un proceso riguroso de prueba para evitar casualidades.

Tabla 9. Calculo de estabilidad por estado limite - Ciencia & Futuro V. 3 No.4 Año 2013

1	No	Nombre de la obra	h(m)	b(m)	$\beta^\circ$ limite	C(kPa)		FS
2		pres 3 presa guama	6,39	10,68	28,8	30	18	1,07
3		prest cch guam	9,49	17,26	28,8	42	17	1,01
4		prest 10 pre el rancho	16,49	76,09	12,23	36	6	1,05
5		prest 1 prs vaso viejo	4,71	6,61	35,4	24	22	1,06
6		Prest DCH el Jibaro	3,76	5,7	36	18	23	1,03
7		Prest CCH el punto	5,557	9,16	31,32	27	18	1,09
8		Prest 1A presa Guama	4,43	6,57	34	22	21	1,04
9		Prest arcilloso deriv guama	4,88	7,31	33,71	23	21	1,02
10		Prest Presa Guama	13,27	27,92	25,38	30	18	1,05
11		Prest 4 Presa Guama	4,72	7,64	31,72	22	19	1,04

Para probar la viabilidad del tabulador electrónico automatizado, se compara los resultados (factor de seguridad) de los métodos de las dovelas con la del método por estado limites del artículo de la revista Ciencia & Futuro V. 3 No.4 Año 2013. En la investigación el autor calculó los factores de seguridad de los préstamos de Pinar del Rio con las características en la tabla 8.

Para hacer una comparación de los métodos se tomaron los mismos valores que se usó en la tabla 8 altura, ancho,  $\beta^\circ$ límite, cohesión y el ángulo de fricción interna y se aplicó el procedimiento con el tabulador electrónico automatizado para determinar su factor se seguridad.

La tabla siguiente muestra la comparación de los resultados de los factores de seguridad obtenidos con el procedimiento del tabulador electrónico.

Tabla 10. Resultados de los métodos de Fellenius, Bishop y Janbu

1	Nombre de la obra	h(m)	b(m)	$\beta$ límite	C(kPa)		FS	Fellenius(FS)	Bishop(FS)	Janbu(FS)	Promedio(FS)	
2	pres 3 presa guama	6,39	10,68	28,8	30		18	1,07	1,01	0,99	1,1	1,03
3	prest cch guam	9,49	17,26	28,8	42		17	1,01	1,03	1,1	1,07	1,07
4	prest 10 pre el rancho	16,49	76,09	12,23	36		6	1,05	1,08	1,07	1,12	1,09
5	prest 1 prs vaso viejo	4,71	6,61	35,4	24		22	1,06	1,1	1,08	1,13	1,10
6	Prest DCH el Jibaro	3,76	5,7	36	18		23	1,03	1,06	1,05	1,08	1,06
7	Prest CCH el punto	5,557	9,16	31,32	27		18	1,09	1,08	1,08	1,1	1,09
8	Prest 1A presa Guama	4,43	6,57	34	22		21	1,04	1,01	0,94	1,07	1,01
9	Prest arcilloso deriv guama	4,88	7,31	33,71	23		21	1,02	1,04	0,99	0,99	1,01
10	Prest Presa Guama	13,27	27,92	25,38	30		18	1,05	1,07	1,05	1,11	1,08
11	Prest 4 Presa Guama	4,72	7,64	31,72	22		19	1,04	1,06	1,04	1,08	1,06

Los resultados obtenidos en el tabulador electrónico en la tabla 9 son semejantes a los del método por estado límite, un valor significativamente pequeño con la diferencia máxima de 0,06.

### CONCLUSIONES PARCIALES

1. Se concluye que el tabulador electrónico automatizado funciona bien, y se puede usar en los cálculos de taludes

## 4 CAPÍTULO 4. APLICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO A UN CASO DE ESTUDIO

### Introducción

El objetivo fundamental de este capítulo es usar el tabulador electrónico creado para los tres métodos de cálculo de talud (Fellenius, Bishop y Janbu) y aplicarlo a un caso de estudio (presa de cola del libro restauración del terreno) y determinar la cohesión necesaria para el diseño y la construcción de la misma con las siguientes características.

Datos:

Peso específico ( $\gamma$ ) 16 kN/m<sup>3</sup>

Ángulo de fricción interna ( $\varphi$ ) 25°

Ángulo del talud ( $\beta$ ) 55°

Altura del talud (h) 50 m

Ancho del talud (b) m

La figura siguiente muestra el talud con dichas características

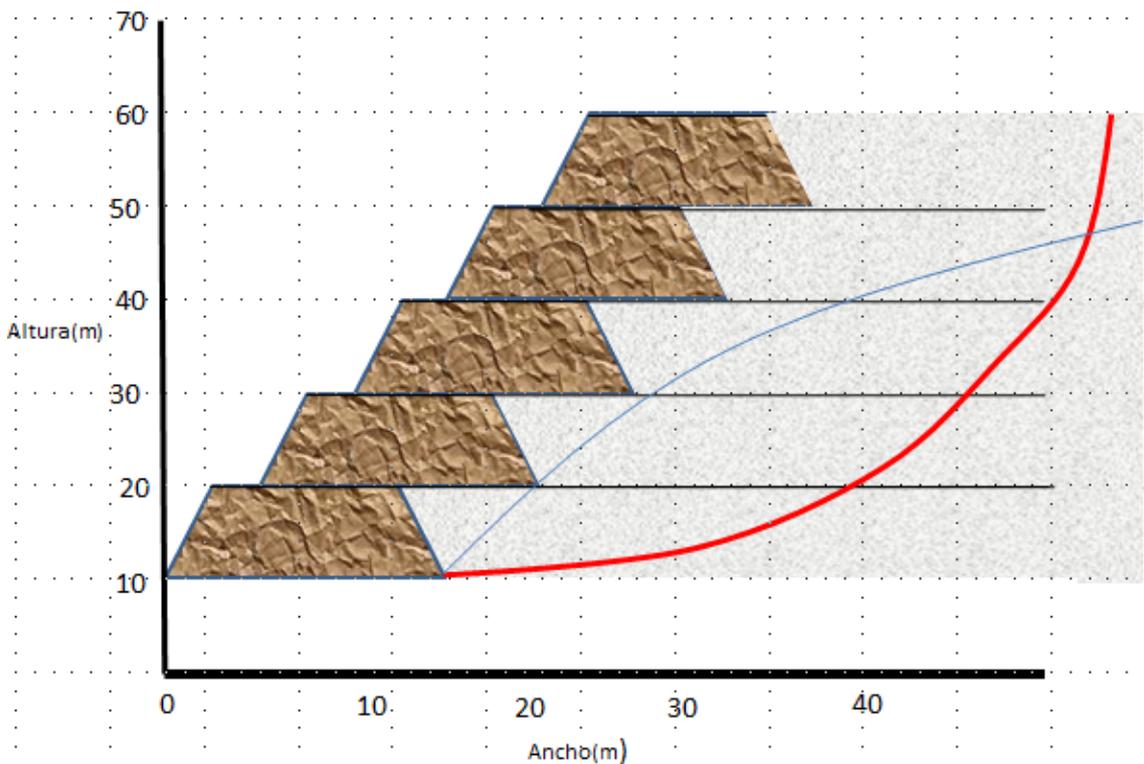


Figura 37. Talud de la presa de cola

#### 4.1 Procedimiento de Fellenius

El siguiente ejemplo tiene como objetivo enseñar cómo se calcula la cohesión utilizando el método de Fellenius.

Primero se asume una superficie de falla circular y después se divide la masa deslizante potencial en tajadas verticales. No existe ningún tipo de fórmula establecida para determinar el número y las dimensiones de las tajadas. Ya que se tiene definido las dimensiones y el número de rebanadas, luego se procede a encontrar la altura de la superficie del nivel freático y el ángulo ( $\alpha$ ) de cada una de ellas dibujando líneas que parten del centro del círculo de falla y finalizan con la vertical abajo del centroide en cada dovela. La siguiente figura muestra el proceso explicado anteriormente.

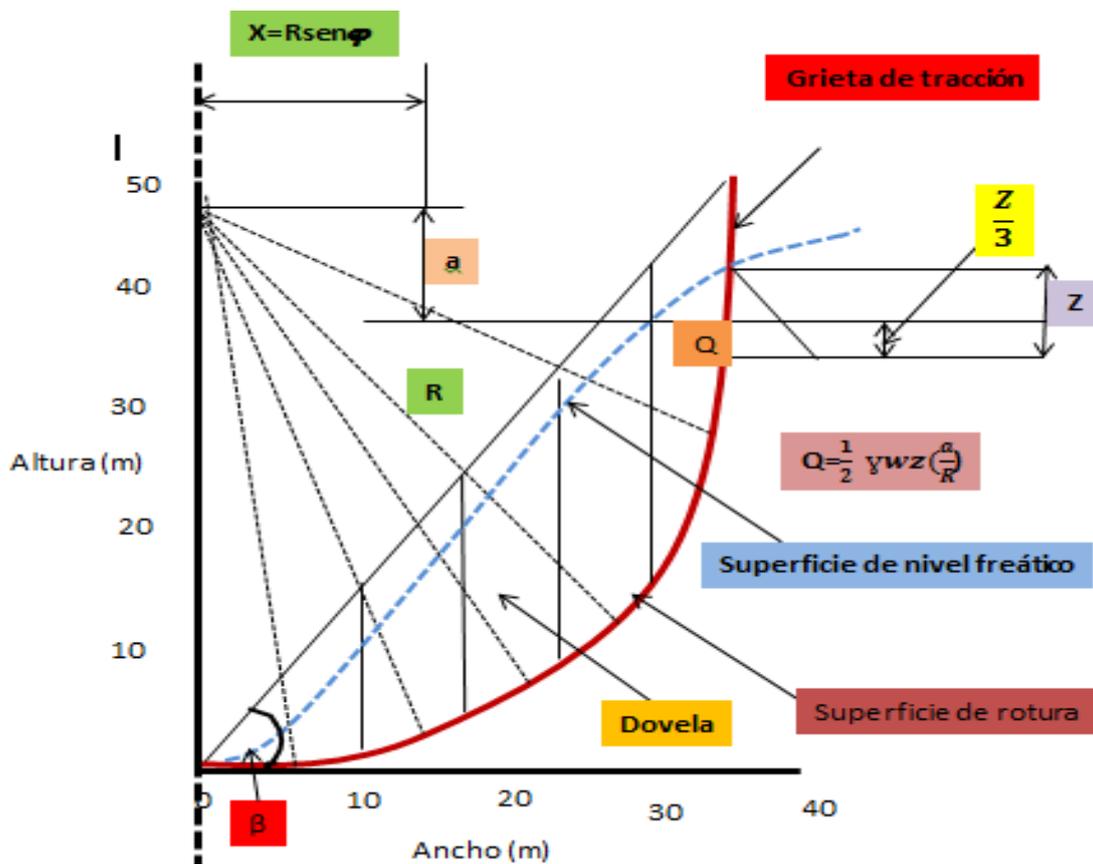


Figura.38 Grafico de Fellenius

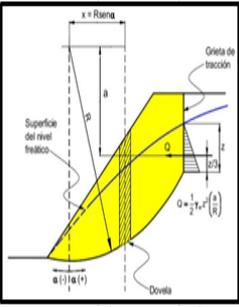
Las dimensiones de la dovela y la altura de la superficie del nivel freático obtenido de la figura 39, se presenta en la tabla 12.

Tabla 11 Dimensiones de las dovelas y nivel freático

Numero	Ancho (m)	Altura (m)	ángulo (°)	Nivel freático (m)
1	12,00000	10,00000	21,00000	5,00000
2	6,50000	14,00000	34,00000	15,00000
3	6,00000	17,50000	41,00000	24,00000
4	5,50000	22,20000	46,00000	32,00000
5	5,00000	17,00000	55,00000	39,00000

Los datos en la tabla 12 se introducen en el tabulador electrónico automatizado para sacar el valor de la cohesión como se muestra a continuación.

Tabla 12 Tabulador electrónico de Fellenius

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	Datos de entrada				Grieta de tracción			Profundidad de la grieta					
2	Peso específico	$\gamma$ (KN/m <sup>3</sup> )	16,00000		Z (m)	10,00000		45+ $\phi$ /2 radian	1,00356		<b>Nota:</b> Celdas blancas: Celdas de entradas Celdas amarillas: Celdas automatizadas		
3	Cohesión	C (Kpa)	155,00000		a (m)	9,00000		Profundidad	47,73831				
4	Angulo de fricción	$\phi$ (grados)	25,00000		R (m)	40,00000							
5		radianes	0,43633		Q Felle/Bisho	1,10250							
6	Angulo del talud	$\beta^\circ$	55,00000		Q Janbu	490,00000							
7													
8	Peso específico del agua	$\gamma_w$ (KN/m <sup>3</sup> )	9,80000										
9													
10													
11	<b>METODO DE FELLENIUS</b>												
12													
13	$FS = \frac{\sum_{i=1}^n [c' L_i + (W_i \cos \alpha_i - u_i L_i) \tan \phi]}{\sum_{i=1}^n W_i \sin \alpha_i + \frac{1}{2} \gamma_w z^2 \left( \frac{a}{R} \right)}$												
14													
15													
16													
17													
18													
19													
20													
21													
22	dovela	b(m)	h(m)	$\alpha$ (°)	radianes	L=b/cos $\alpha$	Area(m2)	w= $\gamma$ *A	hw	u= $\gamma_w$ h	$\alpha + (w \cos \alpha - u) \tan \phi$	w sen $\alpha$	
23	1	12,00000	10,00000	21,00000	0,36652	12,85374	120,00000	1920,00000	5,00000	49,00000	2534,47817	688,06646	
24	2	6,50000	14,00000	34,00000	0,59341	7,84042	91,00000	1456,00000	15,00000	147,00000	1240,69582	814,18487	
25	3	6,00000	17,50000	41,00000	0,71558	7,95008	105,00000	1680,00000	24,00000	235,20000	951,56994	1102,17917	
26	4	5,50000	22,20000	46,00000	0,80285	7,91756	122,10000	1953,60000	32,00000	313,60000	702,22363	1405,30223	
27	5	5,00000	17,00000	55,00000	0,95993	8,71723	85,00000	1360,00000	39,00000	382,20000	161,31133	1114,04678	
28													
29													
30													
31													
32													
33										Sumatoria	5590,27888	5123,77951	
34										FS	1,09081		

Según el procedimiento con el factor de seguridad de 1,09, la cohesión del suelo debe ser de 155 kPa para que el talud sea estable.

#### 4.2 Procedimiento de Bishop

Para iniciar el cálculo, se toma el valor de la cohesión 155 kPa resultado del método de Fellenius. El valor del factor de seguridad que se obtiene es de 1,20 a la octavo iteración (Ver la tabla 10), es decir el talud con 155 kPa del suelo será estable

Tabla 13 Tabulador electrónico de Bishop

u=γhw	c*b	W-ub	w sen α	Iteración 1	Iteración 2	Iteración 3	Iteración 4	Iteración 5	Iteración 6	Iteración 7	Iteración 8
49,00000	1860,00000	1332,00000	688,06646	2287,41201	2308,46448	2312,94276	2313,88927	2314,08787	2314,13004	2314,13996	2314,14244
147,00000	1007,50000	500,50000	814,18487	1165,34962	1182,49069	1186,16109	1186,93793	1187,10098	1187,13561	1187,14376	1187,14579
235,20000	930,00000	268,80000	1102,17917	1023,27926	1041,56807	1045,49907	1046,33174	1046,50654	1046,54366	1046,55240	1046,55458
313,60000	775,00000	208,00000	1277,54749	873,76949	891,50721	895,33081	896,14124	896,31139	896,34753	896,35603	896,35815
382,20000	775,00000	-551,00000	1114,04678	563,74515	577,96582	581,04928	581,70366	581,84108	581,87027	581,87714	581,87885
		Sumatoria	4996,02476	5913,55552	6001,99627	6020,98301	6025,00383	6025,84786	6026,02711	6026,06928	6026,07982
		FS (arbitrario)		1,10592	1,18339	1,20109	1,20489	1,20569	1,20586	1,20590	1,20591
		FS (calculado)		1,18339	1,20109	1,20489	1,20569	1,20586	1,20590	1,20591	1,20591

#### 4.3 Procedimiento de Janbu

Igual que en los demás métodos (Fellenius y Bishop) se introduce los datos de la tabla 12 en el tabulador electrónico automatizado de Janbu. La única diferencia es el valor de F0 y la relación entre  $d/l$  o  $d/t$  y la tabla electrónica la calcula automáticamente, ver el gráfico a continuación.

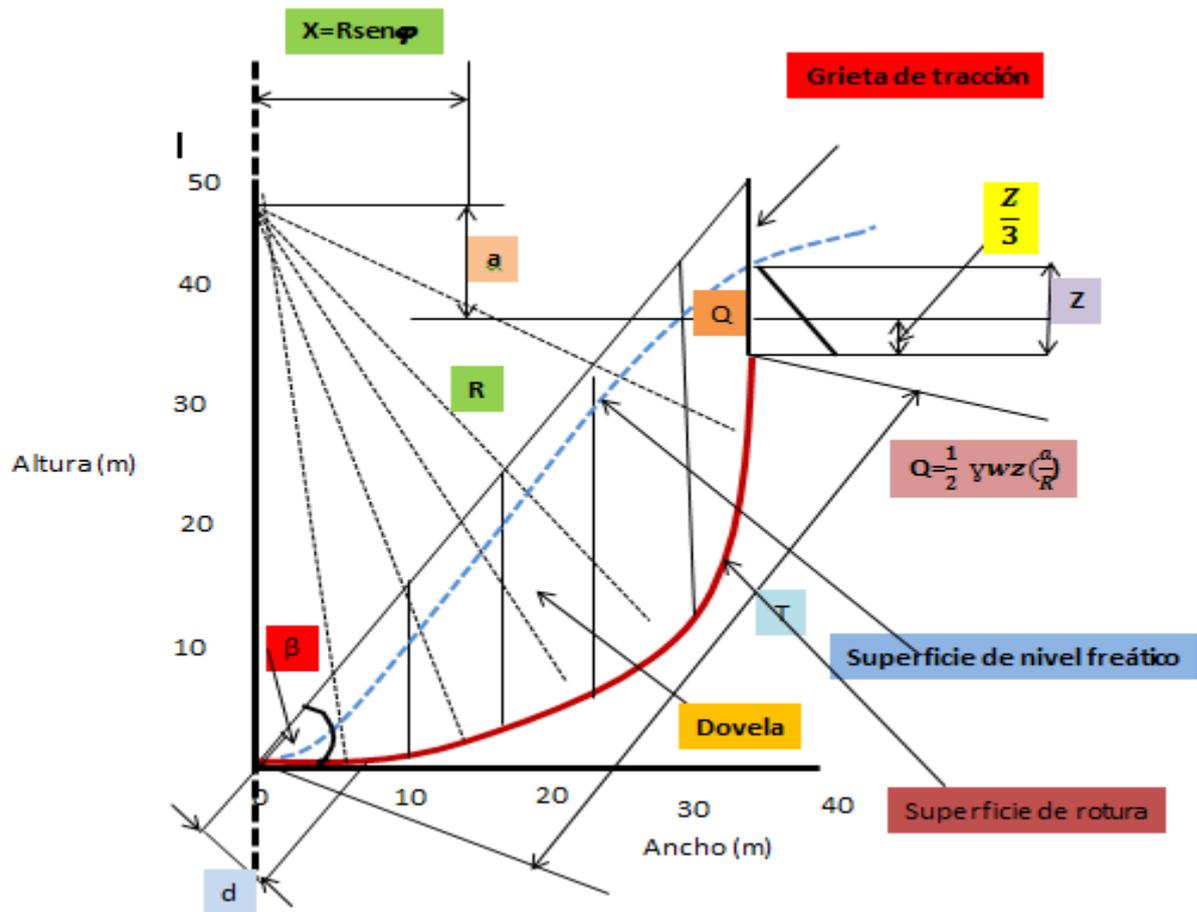


Figura 39 Gráfico de Janbu

Con la cohesión de 155 kPa se obtiene el talud con un factor de seguridad de 1,03 (Tabla 11), en la onцена iteración, es un talud estable.

W-ub	$w\tan\alpha$	$\gamma h-\gamma_w h_w$	$1+\tan^2\alpha$	$\tan\alpha*\tan\phi$	Iteración 1	Iteración 2	Iteración 3	Iteración 4
1332,00000	737,01895	111,00000	1,14735	0,17900	2450,14992	2431,80538	2427,26971	2426,14109
500,50000	982,08440	77,00000	1,45496	0,31453	1405,66563	1389,01066	1384,91528	1383,89760
268,80000	1460,40172	44,80000	1,75566	0,40536	1355,85832	1336,44733	1331,68910	1330,50761
208,00000	1839,10184	41,60000	2,07232	0,48288	1257,84058	1237,47451	1232,49398	1231,25801
-551,00000	1942,28129	-110,20000	3,03961	0,66596	982,85967	963,25509	958,48355	957,30081
Sumatoria	6960,88819	164,20000	9,46990	2,04771	7452,37411	7357,99296	7334,85163	7329,10513
FS (arbitrario)					1,10592	1,04911	1,03583	1,03257
FS (calculado)					1,04911	1,03583	1,03257	1,03176

Iteración 5	Iteración 8	Iteración 9	Iteración 10	Iteración 11
2425,85972	2425,79019	2425,77280	2425,76933	2425,76585
1383,64398	1383,58131	1383,56564	1383,56250	1383,55937
1330,21322	1330,14048	1330,12229	1330,11865	1330,11501
1230,95009	1230,87401	1230,85498	1230,85118	1230,84737
957,00624	956,93346	956,91527	956,91163	956,90799
7327,67324	7327,31944	7327,23098	7327,21328	7327,19559
1,03176	1,03156	1,03151	1,03150	1,03149
1,03156	1,03151	1,03150	1,03149	1,03149

### CONCLUSIONES PARCIALES

1. Se determinó la cohesión necesaria para el talud de la presa de colas

## **CONCLUSIONES GENERALES**

1. Se definió que mediante la comparación del Factor de Seguridad obtenido por los métodos más utilizados en suelos se pronostican los parámetros de diseño del talud.
2. La automatización de los diferentes métodos para el cálculo de taludes en suelos constituye una herramienta efectiva para los trabajos prácticos.

## **RECOMENDACIONES**

1. Utilizar el trabajo en las clases prácticas de los estudiantes.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Bach.R.I.J 2013. Diseño geotécnico para la protección y estabilización del talud en el parque ecológico “las ardillas” y viveros dentro de la universidad de San Carlos de Guatemala 182p
1. Durán.C.E.E.2013.Análisis comparativa entre los métodos de estabilidad de taludes aplicados a la presa de tierra del proyecto PACALORI.151p
2. Ganepola.C.G.A 2013 Cálculo de taludes de explotación para préstamos de materiales de construcción en el municipio de Pinar del Río, Cuba. Revista. Ciencia & Futuro V. 3 No Año 2013
3. Parámetros Geotécnicos y estabilidad de taludes [http//.www.aimecuador.org](http://www.aimecuador.org)
4. Oyanguren P.R.2004 .Fundamentos e ingeniería de taludes parte 1 300p
5. Oyanguren P.R.2004. Fundamentos e ingeniería de taludes parte 1 710p
6. Martínez .S.R.2011 Geomecánica parte 2. 100p
7. Martínez.S.R.2011 Geomecánica parte 3. 104p
8. Rodríguez F.H.2003. Introducción a la estabilidad de taludes.41p
9. Rolando.A 2000. Restauración de tierra.453p
10. Suarez.J.1998.libro de taludes.472p
11. Vallejo.G 2004 Ingeniería geológica 695p



## ANEXOS