

“ESTABILIZACIÓN DE TALUDES UTILIZANDO MODELOS DE: ÁBACOS DE TAYLOR Y JAMBU EN LA AVENIDA DE LA INTEGRACIÓN CIUDAD DE TARIJA”

INTRODUCCIÓN

1.1 GENERALIDADES.

Las características físicas y geológicas del Valle Central, cuentan con particularidades que las hacen diferentes de otros espacios geográficos, entre las que podemos señalar:

La inestabilidad de los suelos originados en los sedimentos del fondo de un gran lago cuaternario, cuyas aguas se drenaron al abrirse el desfiladero de la Angostura.

El régimen de precipitaciones, caracterizado por una gran intensidad de lluvia durante un lapso relativamente pequeño de tiempo y una sequía prolongada entre los períodos de lluvia.

La indiscriminada tala de la vegetación nativa, el sobre pastoreo de las praderas naturales y el manejo irracional de las tierras de pastoreo.

Estas son algunas de las características que también forman parte del estudio de recopilación de información para la elaboración de proyectos, específicamente en el diseño de carreteras y otro tipo de obras civiles.

Consecuentemente, es muy importante reunir la mayor cantidad de datos que permitan elaborar proyectos que alcancen un óptimo funcionamiento y puedan cumplir el tiempo de vida útil para el que fueron diseñados.

1.2 JUSTIFICACIÓN

En la Avenida de la Integración ciudad de Tarija, recientemente construida se puede observar deslizamiento de taludes que provoca un cierto grado de incertidumbre, pues la rapidez de ocurrencia y área afectada ocasiona una serie de daños a la plataforma de la vía que es muy utilizada tanto por vehículos como por peatones.

El trabajo de habilitación de las vías afectadas por derrumbes en muchos casos puede llevar varios días generando problemas viales, económicos y sociales a la población, así como a las entidades encargadas de su mantenimiento. Siendo que esta avenida se construyó con el propósito de descongestionar el flujo vehicular que se tiene en la avenida las Américas (Unidad Operativa de Tránsito) hasta unirse con la Avenida Panamericana (Rotonda ex parada del Norte), es muy importante que dicha vía se encuentre expedita para no interrumpir el flujo vehicular en la zona.

Por lo tanto, se hace necesario un estudio de los taludes que presenta dicha avenida con el propósito de brindar mayor seguridad tanto a conductores, peatones y vecinos de la zona, ya que esta avenida beneficia a los barrios Guadalquivir, Juan Pablo II y en mayor grado al Barrio Libertad por ser el área verde de dicho barrio.

El estudio se justifica considerando los aspectos:

Técnico, para estabilizar los taludes con la finalidad de evitar el proceso erosivo, resguardar la carpeta asfáltica de la vía, principalmente en período de lluvias y sobre todo para darle transitabilidad sin interrupciones.

Económico, en la medida que se pueda evitar la erogación de recursos económicos en trabajos de reparación y mantenimiento, que siempre resultan perjudiciales e imprevisibles.

Social, considerando la seguridad de la población que circula por la zona, tanto peatones como en vehículos de transporte público y privado, en el desarrollo de sus actividades diarias.

1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Generalmente las vías de reciente construcción en las que se realizan cortes de dimensiones grandes en formaciones montañosas, por más pequeñas que sean, traen aparejadas un proceso largo de estabilización natural, por lo que es necesario realizar trabajos para evitar situaciones imprevistas.

Identificación del problema en la Avenida de la Integración.

Como evitar:

- ✓ El proceso erosivo acelerado como consecuencia de la esorrentía de agua de las lluvias pasadas, por la exposición del terreno sin que se le haya dado la protección de una vegetación acorde al tamaño y ángulo de los cortes.
- ✓ Aflojamiento del terreno que se traduce en desmoronamiento de capas de terreno que se depositan en la propia calzada de la avenida, ocasionando perjuicios a la normal transitabilidad de los vehículos.
- ✓ Exposición a la fuerza eólica que por el corte al terreno se hace más fuerte provocando resquebrajamiento de las partículas del suelo que se traducen en polvo espeso que se esparce en la zona.
- ✓ En periodos de lluvia se forman masas lodosas y lechos barrocos que perjudican el libre tránsito de peatones y vehículos, además se convierten en focos de infección.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo General:

- ❖ Aplicar alternativas de solución utilizando modelos de Ábacos de Taylor y Jambu para la estabilización de taludes ubicados en el tramo de la Avenida de la Integración ciudad de Tarija y recomendar la solución más conveniente tomando en cuenta aspectos técnicos, económicos y ambientales.

1.4.2 Objetivos Específicos:

- Identificar el tipo de deslizamiento y el proceso de deterioro del talud de estudio.
- Analizar y clasificar el tipo de suelo del talud.
- Determinar la resistencia al corte directo, a través de pruebas de laboratorio.
- Efectuar un análisis de estabilización de taludes para los modelos de ábacos de Taylor y Jambu.
- Comparar volúmenes y costos entre los dos modelos, con el fin de identificar al más conveniente.
- Estudiar los fenómenos que afectan en la estabilidad de los taludes de carreteras.
- Establecer conclusiones y recomendaciones sobre el tema estudiado.

1.5 ALCANCE DEL PROYECTO

- Determinar las características físicas y mecánicas del talud ubicado en la Avenida de la Integración ciudad de Tarija, en la parte derecha de la vía en dirección Sur a Norte.
- Realizar la determinación de las propiedades de los materiales que conforman el suelo, realizando la clasificación del tipo de suelo del talud definido para el estudio tomando muestras del mismo.

- ↻ De acuerdo al análisis minucioso de las características del talud y los datos obtenidos en los ensayos realizados y basados en conceptos teóricos asumir los datos faltantes debido a pruebas que no pudieran ser realizadas.
- ↻ Mediante los modelos de Ábacos de Taylor y Jambu realizar el cálculo tomando en cuenta todos los factores que intervienen en la estabilización de taludes que deben ser considerados para la obtención del Factor de Seguridad (FS) que nos permita alcanzar técnica y económicamente el talud óptimo.

2.1 GENERALIDADES

Se define por talud, a cualquier superficie inclinada en la tierra con respecto a la horizontal, estas inclinaciones se dan en forma natural (laderas) o por la intervención humana (cortes y terraplenes).

FOTOGRAFÍA II - 1



Ladera (**forma Natural**)

FOTOGRAFÍA II - 2



Corte (**intervención humana**)

FOTOGRAFÍA II - 3



Relleno o terraplén (**intervención humana**).

El moderno crecimiento y desarrollo en carreteras y vías de comunicación exige del Ingeniero Civil un mayor cuidado en el diseño y construcción de las carreteras, redes ferroviarias e incluso las obras de arte hidráulicas, ya que requieren de métodos o formas que garanticen el cuidado y la protección de las mismas, ya sea por el aspecto económico o por las consecuencias que derivan de la falla del talud.

Para poder emplear métodos o tecnologías para la protección de taludes, es necesario conocer algunas de las características mecánicas del suelo, porque es aquí donde se presentan las fallas más comunes.

Dentro de las características más importantes debemos tomar en cuenta a los suelos estables y los suelos inestables, así como los factores que intervienen en la inestabilidad, factores en su mayoría naturales como el agua, el viento, el sismo y al efecto de las cargas, que son actores directos que afectan negativamente la estabilidad de un talud.

Debemos también de manera fundamental estudiar las modernas tecnologías existentes en la actualidad para el cuidado, protección y mantenimiento de los taludes de nuestras carreteras, valiéndonos de una comparación entre estos métodos y aplicándolos a un tramo vial de nuestra región para establecer la metodología adecuada para la solución más favorable desde un punto de vista técnico – económico.

2.2. CONCEPTOS DE TALUDES.

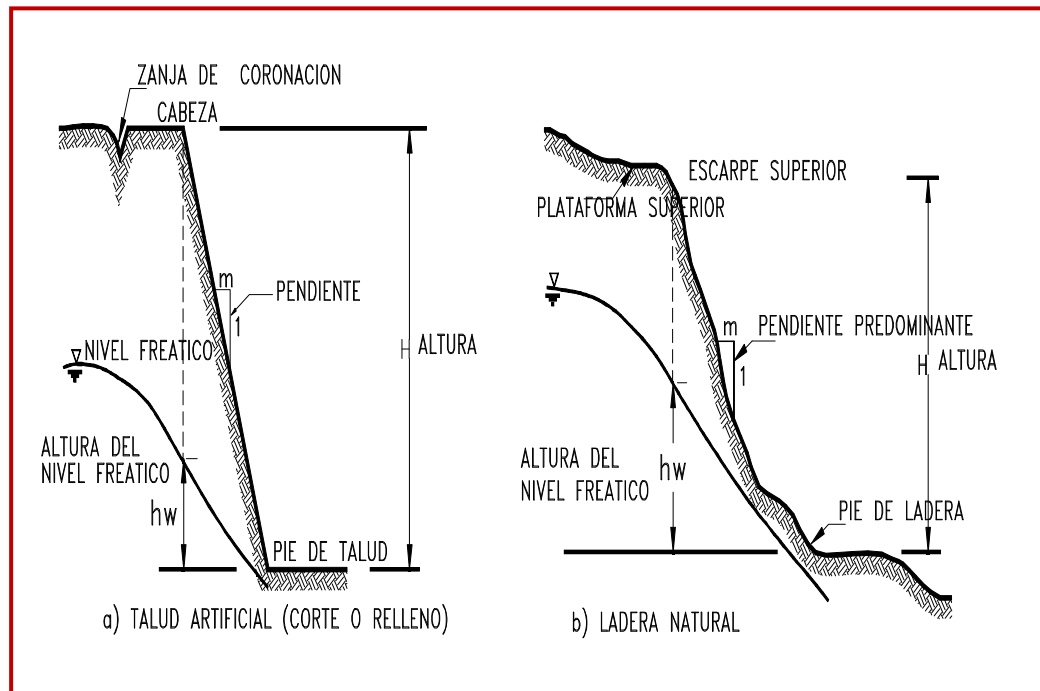
Un talud o ladera es una masa de tierra que no es plana sino que posee pendiente o cambios de altura significativos. En la literatura técnica se define como ladera cuando su conformación actual tuvo como origen un proceso natural (fotografía II - 1) y talud cuando se conformó artificialmente (fotografía II - 2 y II - 3).

Las laderas que han permanecido estables por muchos años pueden fallar en forma imprevista debido a cambios topográficos, sismicidad, flujos de agua subterránea, cambios

en la resistencia del suelo, meteorización o factores de tipo antrópico o natural que modifiquen la estabilidad.

Los taludes se pueden agrupar en tres categorías generales: los terraplenes, los cortes de laderas naturales y los muros de contención. Además, se pueden presentar combinaciones de los diversos tipos de taludes y laderas.

FIGURA II -1



Nomenclatura de taludes y laderas.

FUENTE: es.scribd.com

En el talud o ladera se definen los siguientes elementos constitutivos:

- **Altura**

Es la distancia vertical entre el pie y la cabeza, la cual se presenta claramente definida en taludes artificiales pero es complicada de cuantificar en las laderas debido a que el pie y la cabeza no son accidentes topográficos bien marcados.

- **Pie**

Corresponde al sitio de cambio brusco de pendiente en la parte inferior del talud.

- **Cabeza o escarpe**

Se refiere al sitio de cambio brusco de pendiente en la parte superior.

- **Altura de nivel freático**

Distancia vertical desde el pie del talud o ladera hasta el nivel de agua medida debajo de la cabeza.

- **Pendiente**

Es la medida de la inclinación del talud o ladera. Puede medirse en grados, en porcentaje o en relación m/1, en la cual m es la distancia horizontal que corresponde a una (1) unidad de distancia vertical.

Ejemplo: Pendiente: 45° , 100%, o 1H: 1V.

Existen, además, otros factores topográficos que se requiere definir como son longitud, convexidad (vertical), curvatura (horizontal) y área de cuenca de drenaje, los cuales pueden tener influencia sobre el comportamiento geotécnico del talud.

2.2.1. Talud en Corte

Es la inclinación del terreno después de haber realizado el corte que está construido de acuerdo a criterios de seguridad, estabilidad, mantenimiento, estética y economía, pero su permanencia dependerá fundamentalmente de la naturaleza de los suelos, características geológicas, morfológicas y de las condiciones climatológicas.

En taludes de corte, se debe tener la inclinación del talud de manera que no interfiera la distancia mínima de visibilidad para frenado en las curvas horizontales. En caso de cortes con pendiente espinaada, es conveniente proveer una primera faja del orden de 1:4 (vertical:

horizontal) o menos, que proporcione la visibilidad mencionada y que reduzca las necesidades de defensa.

En el caso de suelos sin discontinuidades heredadas en ocasiones, se pueden realizar cortes altos verticales (Blight, 1988), pero cuando aparecen estructuras heredadas o discontinuidades se pueden presentar deslizamientos al poco tiempo de efectuado el corte. La ejecución de un corte en el pie de un talud puede dejar al descubierto una discontinuidad o un plano de estratificación y provocar un movimiento aún en taludes de pendiente suave (Bligh y otros, 1970).

2.2.2. Talud en Relleno

Los terraplenes y estructuras térreas que se utilizan para rellenos de predios, plataformas, caminos, bordos, desniveles, pisos industriales, estacionamientos, patios de contenedores, ferrocarriles, aeropuertos, rampas de hospitales u otras, etc., son el acumulamiento de tierra o suelo de una cierta calidad, compactado de acuerdo a técnicas ya muy conocidas. La resistencia de dicha acumulación de tierra varía de acuerdo al tipo de suelo que se use y de acuerdo al uso que se pretenda dar a tal obra.

Cuando lo anterior implica la formación de un desnivel, comienza a denominarse talud o terraplén.

Se construyen principalmente con maquinaria pesada, a muy rápidas velocidades de construcción. Son económicos y efectivos. Permiten alcanzar ángulos de reposo que de ninguna manera se podría alcanzar con los suelos naturales y permiten alcanzar grandes alturas a bajos costos de estabilización, llegando incluso a alcanzar la vertical y sustituir con facilidad a muros de contención tradicionales.

Los terraplenes son estructuras muy susceptibles a problemas de deslizamientos y erosión debido a su bajo grado de cementación ya que generalmente su colocación genera una disminución del factor de seguridad del talud pre-existente, por aumento de los esfuerzos actuantes. Adicionalmente, se modifican las condiciones de humedad, la posición del nivel freático y se induce una superficie de debilidad en el contacto entre el terraplén y el suelo natural subyacente.

2.3 DESLIZAMIENTOS

Los deslizamientos son desplazamientos de masas de tierra o rocas por una pendiente en forma súbita o lenta. El deslizamiento o derrumbe, es un fenómeno de la naturaleza que se define como “el movimiento pendiente abajo, lento o súbito de una ladera, formado por materiales naturales - roca – suelo – vegetación – o bien de rellenos artificiales”. Los deslizamientos o derrumbes se presentan sobre todo en épocas lluviosas o durante períodos de actividad sísmica.

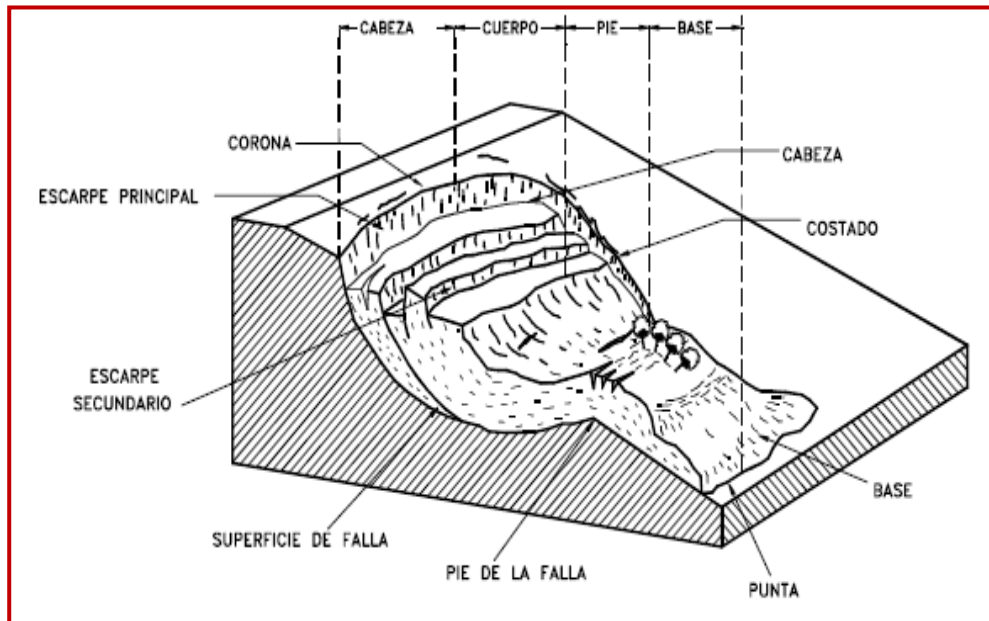
El inicio de un deslizamiento produce por lo general en su punto mas débil, como son las grietas, donde los movimientos del deslizamiento son lentos, llegando luego a formarse la superficie de falla, que puede ser de diferente forma, y a medida que se separa la masa de suelo de la superficie de falla, se incrementa la velocidad hasta que se produzca la falla total, se considera que el deslizamiento total tiene comportamientos distintos debido a los materiales que los constituyen.

2.3.1 Deslizamiento o movimiento en masa típico.

Como se menciona anteriormente, el deslizamiento es un cambio de posición vertical a horizontal, oblicuo en general, en la masa de suelo ese movimiento que origina el cambio de posición, se realiza hacia abajo y hacia fuera y se muestra un deslizamiento o movimiento en masas típico, con sus diversas partes cuya nomenclatura es la siguiente:

2.3.1.1 Partes del Deslizamiento.

FIGURA II - 2



Partes del deslizamiento

✓ **Escarpe principal.**

Corresponde una superficie muy inclinada a lo largo de la periferia del área en movimiento, causado por el desplazamiento del material fuera del terreno original. La continuación de la superficie el escarpe dentro del material forma la superficie de la falla.

✓ **Escarpe secundario.**

Una superficie muy inclinada producida por desplazamientos diferenciales dentro de la masa que se mueve.

✓ **Cabeza.**

Las partes superiores del material que se mueve a lo largo del contacto entre el material perturbado y el escarpe principal.

✓ **Cima.**

Es el punto más alto del contacto entre el material perturbado y el escarpe principal.

✓ **Corona.**

El material que se encuentra en el sitio, prácticamente inalterado y adyacente a la parte más alta del escarpe principal.

✓ **Superficie de falla.**

Corresponde al área debajo del movimiento que delimita el volumen de material desplazado. El volumen de suelo debajo de la superficie de falla no se mueve.

✓ **Pie de la superficie de falla.**

La línea de interceptación (algunas veces tapada) entre la parte inferior de la superficie de rotura y la superficie original del terreno.

✓ **Base.**

El área cubierta por el material perturbado debajo del pie de la superficie de falla.

✓ **Punta o uña.**

El punto de la base que se encuentra a más distancia de la cima.

✓ **Costado o flanco.**

Un lado (perfil lateral) del movimiento.

✓ **Superficie original del terreno.**

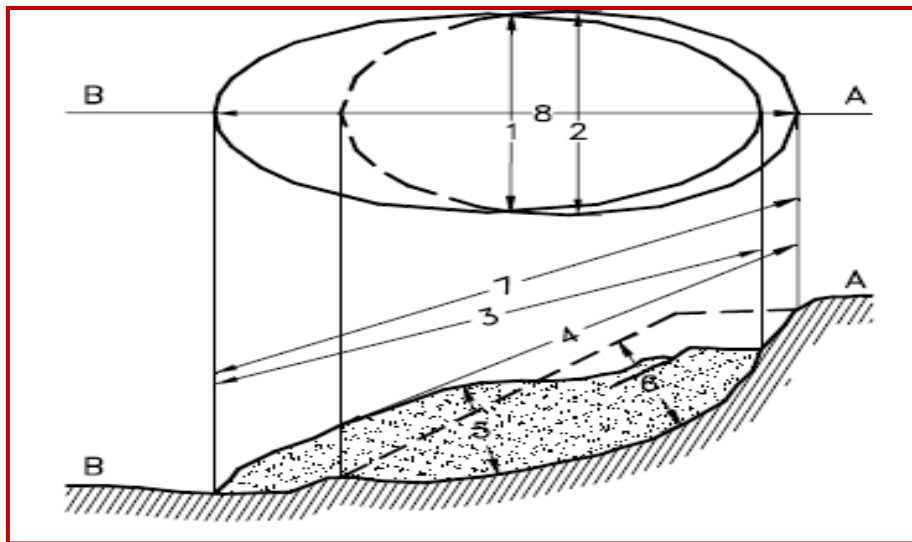
La superficie que existía antes de que se presentara el movimiento.

✓ **Derecha e izquierda.**

Para describir un deslizamiento se prefiere usar la orientación geográfica, pero, si se emplean las palabras derecha e izquierda debe referirse al deslizamiento observado desde la corona mirando hacia el pie.

Las dimensiones que tenemos que conocer son: 1) el ancho de la masa desplazada, 2) ancho de la superficie de falla, 3) longitud de la masa desplazada, 4) longitud de la superficie de falla, 5) profundidad de la masa desplazada, 6) profundidad de la superficie de falla, 7) longitud total y 8) la longitud de la línea central.

FIGURA II - 3



Dimensiones de los movimientos en masa de acuerdo a IAEG Commission on Landslide (1990).

Estas son algunas de las características más importantes de los taludes o de las laderas en carreteras, características por demás importantes para tomarlas muy en cuenta a la hora de pretender estabilizar o proteger los taludes.

2.3.2 Aspectos que influyen en un Deslizamiento

El desplazamiento pendiente abajo, de una masa de suelo, roca o mezcla de ambos, en forma lenta o rápida, se produce por diferentes aspectos que ocasionan el deslizamiento, los cuales pueden ser:

- Falta de soporte en la base del talud.
- Sobre saturación de agua.
- Desintegración gradual del afloramiento rocoso (erosión).
- Movimientos sísmicos.

La mecánica del deslizamiento, origina un movimiento hacia abajo y hacia fuera de toda masa y presenta las siguientes características generales:

La parte superior del área denominada zona de arranque o raíz, la cual va precedida de grietas tensionales y agrietamientos; la parte central constituida por la superficie de desplazamiento, donde se desplaza todo tipo de material y la parte inferior llamada zona de acumulación o lengua, la cual se levanta con grietas radiales.

2.4 CAUSAS DE LOS MOVIMIENTOS DE LADERA

Las principales causas de los movimientos de ladera se presentan cuando la resistencia al esfuerzo cortante es excedida por las tensiones cortantes, en una determinada superficie.

2.4.1 Aumento de Esfuerzos Cortantes

Las causas principales del incremento de tensión son:

- Aplicación de cargas externas (edificios, agua, nieve, etc.)
- Aumento de peso de tierras por humedad (aumento de materiales en cabeza).
- Socavación por derrumbes de cavernas, túneles, erosión, filtraciones, etc.

- Choques bruscos, terremotos, explosivos, vibraciones.
- Grietas de tracción (en suelos cohesivos).
- Presión del agua en las grietas

2.4.2 Disminución de la Resistencia al Corte

Los decrementos de esfuerzos se deben, generalmente, a:

- Hinchamiento de arcilla por absorción de agua.
- Aumento de presión intersticial debido a filtraciones.
- Destrucción del esqueleto del suelo (por vibraciones, explosiones, sismos, etc.)
- Erosión de pie de ladera o talud por deshielo.
- Pérdida de tensión capilar por secamiento o inundación.

2.5 CLASIFICACIÓN DEL TIPO DE FALLAS DE TALUDES

Este capítulo presenta una clasificación de tipos de falla de taludes basada en el reconocimiento de los factores geológicos que condicionan la falla.

Los deslizamientos de taludes ocurren de muchas maneras y aun persiste cierto grado de incertidumbre en su predictibilidad, rapidez de la ocurrencia, y área afectada.

Sin embargo, existen ciertos patrones que ayudan a identificar y reconocer áreas potenciales de fallas, lo cual permite el tratamiento del talud para así eliminar o reducir a un mínimo el riesgo de falla.

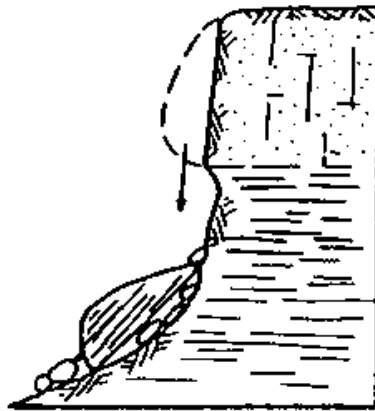
Una clasificación de fallas de taludes está dada en la tabla (Ver anexo III) la cual ha sido adaptada de Hunt (1984). Los principales factores que influyen en la clasificación del tipo de fallas son:

- a) Forma del movimiento.
- b) Forma de la superficie de falla.
- c) Coherencia de la masa fallada.
- d) Causa de la falla
- e) Desplazamiento de la masa.
- f) Tipo de material.
- g) Tasa de movimiento.

2.5.1.- Caídas o Desprendimientos

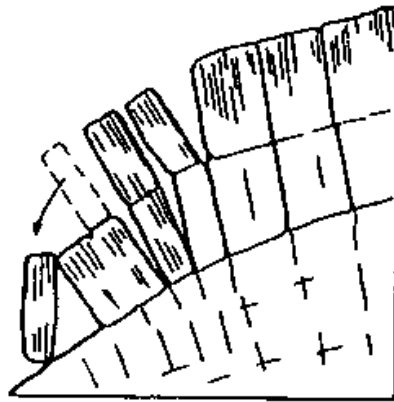
Son fallas repentinas de taludes verticales o casi verticales en las cuales se produce el desprendimiento de un bloque o múltiples bloques, los cuales descienden en caída libre (FIGURA II - 4). El volcamiento de bloques de rocas, generalmente desencadena un desprendimiento (FIGURA II - 5).

FIGURA II - 4



Desprendimiento de bloques

FIGURA II - 5



Volcamiento de bloques

En suelos, los desprendimientos son causados por socavaciones de taludes debido a la acción de la erosión de quebradas o del hombre. En macizos rocosos son causados por socavación debido a la erosión, un incremento de la presión debido a la presencia de agua en las diaclasas y/o meteorización a lo largo de las diaclasas en combinación con fuerzas de filtración. En algunos casos los desprendimientos son el resultado de meteorización diferencial.

Los desprendimientos o caídas son relevantes desde el punto de vista de la ingeniería debido a que se trata de la caída de un bloque o varios bloques, los cuales pueden ocasionar daños a estructuras o a otros taludes que se encuentren en la parte inferior pudiendo causar una destrucción masiva.

Los desprendimientos se producen comúnmente en taludes verticales, o casi verticales en suelos débiles a moderadamente fuertes y en macizos rocosos fracturados. Generalmente, antes de la falla ocurre un desplazamiento, el cual puede ser identificado por la presencia de grietas de tensión.

2.5.2.- Derrumbes

Los derrumbes se encuentran asociados a fallas que envuelven suelos y rocas, y en general se subdividen en rotacionales y planares basado en la forma de la superficie de falla.

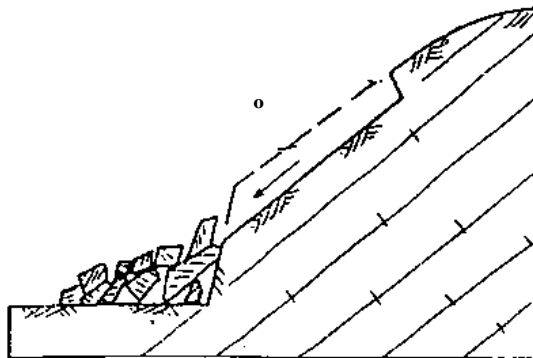
2.5.2.1.- Derrumbes Planares

Los derrumbes planares consisten en el movimiento de un bloque (o bloques) de suelo o roca a lo largo de una superficie de falla plana bien definida. Estos derrumbes pueden ocurrir de una forma lenta a rápida.

Los deslizamientos planares en macizos rocosos consisten en el deslizamiento como una unidad (bloque) o unidades (bloques), talud abajo, a lo largo de una o más superficies planas (FIGURA II - 6). También se puede generar una falla de cuña a lo largo de la intersección de dos planos, consiste de uno o varios bloques de pequeño a gran tamaño (FIGURA II - 7).

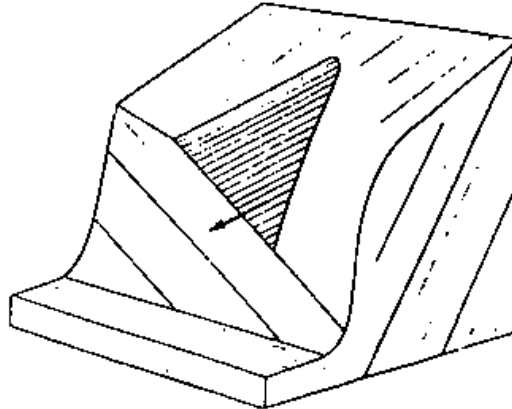
Los deslizamientos en bloque pueden ser destructivos. En regiones montañosas los deslizamientos masivos de roca resultan desastrosos y en muchos casos no pueden ser prevenidos.

FIGURA II - 6



Deslizamiento planar en macizo rocoso

FIGURA II - 7

**Deslizamiento en forma de cuña**

Los deslizamientos planares son característicos en:

- ✓ Rocas sedimentarias que tengan un buzamiento similar o menor a la inclinación de la cara del talud
- ✓ Discontinuidades tales como fallas, foliaciones, o diaclasas formando largos y continuos planos de debilidad que interceptan la superficie del talud.
- ✓ Intersección de diaclasas o discontinuidades que dan como resultado la falla de un bloque en forma de cuña.

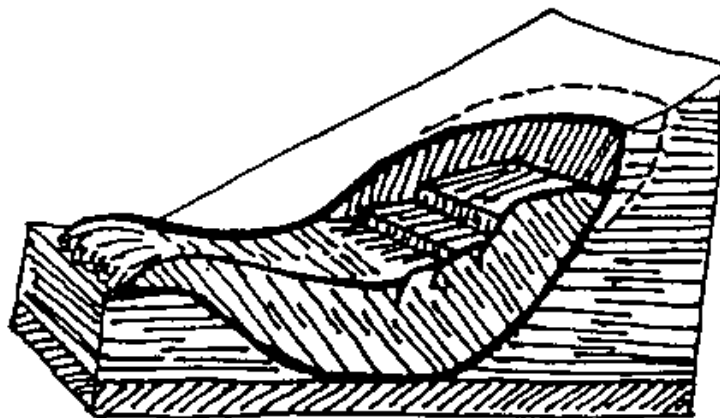
En general, durante los periodos iniciales antes de la falla, se generan grietas de tracción con un pequeño desplazamiento. Luego de la falla, se pueden observar escarpes frescos que dejan los bloques y con posterioridad al movimiento. En algunos casos, este movimiento deja sin vegetación la zona deslizada quedando expuestos escombros al pie del talud.

2.5.2.2.- Derrumbes Rotacionales

Los derrumbes rotacionales tienden a ocurrir lentamente, en forma de cuchara, y el material comienza a fallar por rotación a lo largo de una superficie cilíndrica, aparecen grietas en la

cresta del área inestable y abombamientos al pie de la masa deslizante (FIGURA II - 8). Al finalizar, la masa se ha desplazado sustancialmente dejando un escarpe en la cresta.

FIGURA II - 8



Derrumbe rotacional

La principal causa de este tipo de falla es un incremento en la inclinación del talud, meteorización y fuerzas de filtración. Las consecuencias de este tipo de falla generalmente no son catastróficas, a pesar de que el movimiento puede causar severos daños a estructuras que se encuentren en la masa deslizante o sus alrededores. Cuando se presentan algunos signos tempranos de falla los taludes pueden ser estabilizados.

En rocas, los deslizamientos rotacionales son comunes en lutitas marinas y otras rocas blandas, así como también en rocas sedimentarias altamente fracturadas con algunos planos de debilidad. En suelos, los deslizamientos rotacionales son comunes en depósitos de suelos cohesivos de espesores relativamente importantes, en los cuales no existan planos con marcadas debilidades que causen deslizamientos planares.

En general, la profundidad de la superficie de falla depende de la geología. En arcillas blandas a medias y depósitos de origen marino, la profundidad de la superficie de falla tiende a ser importante. En suelos residuales, la profundidad de la superficie de falla puede variar entre profunda a superficial, dependiendo del perfil de meteorización y el incremento

de resistencia con la profundidad. En depósitos coluviales, la profundidad de la superficie de falla tiende a ser superficial.

En las etapas tempranas de deslizamientos se comienzan a formar grietas de tensión. Después de la falla parcial, se generan una serie de pequeños hundimientos y escarpes. Después de la falla total, en la superficie se pueden apreciar varios escarpes además de grietas de tensiones concéntricas y profundas así como también una gran masa de material incoherente al pie del talud.

2.5.2.3 Desparramiento lateral y Falla progresiva

Las fallas por desparramiento lateral son una forma de falla planar que ocurre en suelos y rocas. La masa se deforma a lo largo de una superficie plana la cual representa una zona débil, tal como lo ilustra la (FIGURA II - 9). Los bloques se separan progresivamente por tensión y retroceden.

FIGURA II - 9



Desparramiento lateral

Este tipo de falla es común en valles de ríos y se asocia también a arcillas firmes y duras fisuradas, lutitas y estratos con buzamiento horizontal con una zona continua de debilidad. También se presenta en coluvios con pendientes suaves los cuales se encuentran sobre suelos residuales o rocas.

Los desprendimientos laterales pueden ser disparados repentinamente por eventos sísmicos. Sin embargo, bajo acciones gravitacionales se generan grietas de tensión. Durante la falla progresiva, las grietas de tensión se abren y los escarpes se forman grandes bloques.

2.5.2.4 Deslizamiento de Escombros

En los deslizamientos de escombros, una masa de suelo o mezcla de suelo y fragmentos de roca se mueven como una unidad a lo largo de superficies planas con alta inclinación. Esos deslizamientos ocurren de manera progresiva pudiendo convertirse en avalanchas o flujos. Las principales causas de deslizamientos de escombros son: el incremento de las fuerzas de filtración y la inclinación del talud. La ocurrencia de este tipo de deslizamiento es común en suelos residuales y depósitos coluviales que reposan sobre una superficie de roca.

2.5.3 Avalanchas

Las avalanchas son el movimiento rápido de escombros de suelo y roca, el cual puede o no comenzar con la ruptura a lo largo de una superficie de falla. Toda la vegetación, el suelo y la roca suelta pueden ser arrastrados. Las principales causas de avalanchas son: las altas fuerzas de filtración, alta pluviosidad, derretimiento de nieve (Nevado de Ruiz), sismos y cedencia gradual de los estratos de roca. Las avalanchas ocurren de manera brusca sin previo aviso y generalmente son impredecibles. Los efectos pueden ser desastrosos pudiendo sepultar extensas aéreas al pie del talud.

Las avalanchas son características de zonas montañosas con pendientes muy inclinadas en suelos residuales donde la topografía causa concentración de la escorrentía. También se puede presentar en zonas de roca muy fracturada.

2.5.4 Flujo de Escombros

Este tipo de falla es similar a las avalanchas a excepción de que la cantidad de agua es mayor, lo cual trae como consecuencia que la masa fluya como lodo. La principal causa es el aporte de grandes lluvias material suelto en la superficie.

2.5.5 Repteo

El Repteo consiste en un lento e imperceptible movimiento o deformación del material de un talud a bajos niveles de esfuerzos, lo cual generalmente solo afecta a las porciones más superficiales del talud aunque también puede afectar a porciones profundas en aquellos casos donde exista la presencia de un estrato poco resistente. El Repteo es el resultado de la acción de fuerzas de filtración o gravitacionales.

El Repteo es característico en materiales cohesivos y rocas blandas como: lutitas y sales, en taludes moderadamente empinados. Los rasgos característicos del Repteo son: la presencia de crestas paralelas y transversales a la máxima pendiente del talud, postes de cerca inclinados, troncos de árboles inclinados y rectos indicativos de movimientos recientes y troncos de árboles inclinados doblados, indicando un movimiento viejo y continuo.

2.6 FACTORES INFLUYENTES EN LA INESTABILIDAD DE TALUDES

2.6.1 Antecedentes Históricos

Los deslizamientos en taludes ocurren de muchas maneras y existe cierto grado de incertidumbre en la capacidad de predicción. Sin embargo, el conocimiento de la ocurrencia de deslizamientos en el pasado en el área de interés constituye un buen punto de partida para la detección y evaluación de potenciales deslizamientos en el futuro. En general, las áreas donde estos fenómenos ya han ocurrido en el pasado son altamente susceptibles a que los mismos se repitan.

Entre las fuentes de información para conocer sobre deslizamientos en el pasado, están: reseñas de deslizamientos publicados en periódicos locales, revistas nacionales o internacionales especializadas en el tema, mapas de zonificación de casos ocurridos de inestabilidad geológica, inventarios de riesgos geológicos, etc.

No es posible conseguir en todos los casos, documentación escrita de casos previos de deslizamientos, por lo que la información de los vecinos del sector- si lo hay- constituye generalmente una valiosa fuente de información. El tipo de información solicitada a los

vecinos sería la descripción de deslizamientos previos en el área, el comportamiento de los taludes durante el período de lluvias, comportamiento durante eventos sísmicos, presencia de antiguas lagunas que se hayan secado, presencia de grietas en construcciones de la zona, grietas en el terreno, inclinación de postes, cerca o árboles con deformaciones, etc.

2.6.2 Geología de la Región

La topografía actual es el producto de millones de años de desarrollo y modificación a lo largo de diferentes procesos geológicos. Este proceso de modificación es continuo y los deslizamientos de taludes constituyen uno de los mecanismos de modificación (Schuste and Krizet 1976). La geología representa un factor primordial en la estabilidad de un talud y existen muchos factores geológicos que ilustran el potencial del deslizamiento de taludes.

A nivel regional, la geología controla los aspectos genéticos del relieve y la topografía de un área lo cual permite estimar su susceptibilidad al movimiento. En general los deslizamientos pueden ocurrir en cualquier tipo de relieve si las condiciones están dadas. Sin embargo, la experiencia de trabajar y observar distintos tipos de relieve ha demostrado que los deslizamientos son más comunes en ciertos tipos de relieves y menos comunes en otros. Una breve descripción de las características de estos relieves se incluye a continuación.

2.6.2.1 Taludes Escarpados

En terrenos escarpados los deslizamientos pueden ocurrir en cualquier tipo de material geológico. Sin embargo, la causa más común de un gran número de derrumbes que ocurren en taludes escarpados es el deslizamiento a lo largo del contacto con la roca de suelos residuales o coluviales. El material meteorizado o suelto no puede mantener la misma pendiente que la roca subyacente y por lo tanto, se encuentra en un balance delicado. Es por esto que, factores como una fuerte lluvia o un corte al pie del talud, pueden disparar el deslizamiento de la masa suprayacente.

2.6.2.2 Acantilados y bancos bajo la acción de corrientes de Quebradas

En acantilados y bancos objeto de ataque por corrientes de quebradas, los deslizamientos son comunes. Si el banco está constituido por suelos o materiales no consolidados, el punto de deslizamiento más débil está ubicado en el máximo punto de curvatura de la quebrada y es en este punto donde se recibe el mayor impacto del agua.

En áreas de afloramiento de roca, el punto de máxima curvatura es generalmente roca dura y los puntos de roca débil se encuentran aguas arriba o aguas debajo de este punto.

2.6.2.3 Áreas de concentración de Drenaje y Filtración

Un estudio cuidadoso de la red de drenaje y áreas de concentración de agua es extremadamente importante. Filtraciones con el subsecuente deslizamiento es probable que ocurra en áreas debajo de reservorios, canales de irrigación o depresiones con agua estancada.

La importancia de reconocer el peligro potencial en áreas derivadas de drenaje superficial, especialmente en rocas porosas y fracturadas, necesita especial énfasis. Extensa experiencia de campo ha comprobado repetidamente que dentro de un área inestable una de las secciones más peligrosas es la parte baja de la línea divisoria de aguas a través de la cual el agua superficial se infiltra de los puntos altos a los bajos al pie de la quebrada.

El reconocimiento de la filtración es ayudado por la identificación de canales cerca de la superficie, áreas húmedas, vegetación alta en el talud. El delineamiento del patrón de drenaje es especialmente importante en la planificación de una construcción nueva.

2.6.2.4 Áreas de Terreno Ondulado

La presencia de terreno ondulado (pequeñas elevaciones o montículos) cuyas características son inconsistentes con aquellas de los taludes generales del área y presentan escarpas en las elevaciones altas son generalmente indicadores de un deslizamiento antiguo.

Una vez que se encuentra un deslizamiento antiguo, sirve como advertencia de que el área en general ha sido inestable en el pasado y por lo tanto nuevas perturbaciones pueden reactivar el movimiento.

2.6.2.5 Áreas de Concentración de Fracturas

El movimiento de taludes puede estar estructuralmente controlado por superficies o planos de debilidad tales como falla, diaclasas, planos de deposición y foliación. Estas estructuras pueden dividir un macizo rocoso en una serie de unidades individuales las cuales pueden actuar independientemente una de la otra. Por lo tanto, el macizo rocoso no puede ser considerado como un medio continuo, sino una serie de bloques individuales.

Estos planos de debilidad facilitan el flujo de aguas y desarrollo de vegetación lo cual debilita los bloques y además reduce la resistencia al deslizamiento. Por lo tanto, debe hacerse una cuidadosa búsqueda para ubicar las áreas con pequeño espaciamiento de diaclasas, especialmente cuando éstas se cruzan y dividen el macizo rocoso en pequeños bloques, lo cual lo hace más inestable.

2.6.3.- Topografía y Estabilidad

Los mapas de topografía representan una excelente fuente de información para la detección de deslizamientos. Algunas veces, grandes áreas de deslizamientos se pueden identificar en mapas topográficos. La identificación de algunos deslizamientos se puede llevar a cabo mediante la identificación de las siguientes características en los mapas topográficos.

- ❖ Expresiones topográficas evidentes, por ejemplo, pendientes empinadas (curvas de nivel con poco espaciamiento) en el escarpe de un deslizamiento, topografía con pequeñas elevaciones o montículos dentro de la masa deslizante (curvas de nivel que siguen un patrón irregular y no simétrico con depresiones poco profundas), presencia de masa separada y característica de flujo en la parte baja.

- ❖ Curvas de nivel ondulado, vías locales dañadas con niveles desiguales y otros lineamientos superficiales tales como líneas de transmisión o cercas.
- ❖ Movimientos menores o irregulares en ubicaciones tales como: zonas de pendientes empinadas, acantilados o bancos, áreas de concentración de drenaje, etc.

El potencial para la identificación de deslizamientos en mapas topográficos depende de la escala y del intervalo de las curvas de nivel en el mapa.

2.6.3.1 Efecto de la Resistencia del suelo y la Pendiente del Talud

Como ya se ha mencionado antes, el suelo tiene dos comportamientos básicos ante la aplicación del esfuerzo cortante. Uno, a través de la fricción intergranular de las partículas que lo integran y la otra por medio de fuerzas que unen a las partículas entre sí. La primera es también llamada condición drenada o a largo plazo, y la segunda, condición no drenada, o a corto plazo.

2.6.4.- Pluviosidad

La pluviosidad tiene un efecto primordial en la estabilidad de taludes ya que influencia la forma, incidencia y magnitud de los deslizamientos. En suelos residuales, los cuales generalmente se encuentran no saturados, la pluviosidad tiene un efecto muy importante ya que el efecto acumulativo puede llegar a causar la saturación del terreno disparando así un deslizamiento. Con respecto a la pluviosidad hay tres aspectos importantes:

- a. El ciclo climático sobre un período de años, por ejemplo, alta precipitación anual vs baja precipitación anual;
- b. La acumulación de pluviosidad en un año dado con relación a la acumulación normal;
- c. Intensidades de una tormenta dada.

Guidicini and Iwasa (1977) realizaron un estudio sobre la ocurrencia de deslizamientos en relación a la pluviosidad. Se estableció el coeficiente de ciclo como parámetro fundamental que toma en cuenta la pluviosidad. El coeficiente de ciclo C_c , fue definido como la precipitación acumulada hasta el día de la falla en porcentaje del promedio de la precipitación anual medida. El estudio cubrió nueve áreas de la región montañosa costera de Brasil la cual presenta un clima tropical caracterizado por: una estación seca de Junio hasta Agosto y una estación húmeda desde Enero hasta Marzo.

Los resultados de estudio indican que la acumulación de precipitación causa un incremento en la saturación del terreno lo cual eleva el nivel freático. Una tormenta que ocurra durante la estación seca o al comienzo de la estación húmeda, tendrá un efecto menor en la estabilidad del talud que una tormenta de la misma intensidad que ocurra hacia el final de la estación húmeda.

2.6.5.- Erosión

La erosión puede ser causada por agentes naturales y humanos. Entre los agentes naturales se pueden incluir: el agua de escorrentía, aguas subterráneas, olas, corrientes y viento. La erosión causada por agentes humanos incluye cualquier actividad que permita un incremento de la velocidad del agua, especialmente en taludes sin protección; entre los principales están la tala de árboles y otro tipo de vegetación que ayudan a mantener el suelo en sitio y así mejorar la estabilidad al talud.

La erosión puede causar la pérdida de soporte de fundación de estructuras, pavimentos, rellenos y otras obras de ingeniería. En terrenos montañosos, la erosión incrementa la incidencia en la inestabilidad de taludes pudiendo resultar en la pérdida de vías u otras estructuras.

La sedimentación y arrastre de aluviones son otros efectos importantes de la erosión. Estos se presentan como resultado de flujo de sedimentos en cuerpos de agua tales como lagos o embalses lo cual incrementa la turbidez de las aguas creando un peligro para la vida acuática, contaminando el agua potable y reduciendo la capacidad de almacenamiento de los embalses y por tanto su vida útil.

Existen ciertos procedimientos para controlar la erosión y sedimentación. En bancos de ríos y canales, la protección se puede proveer con estructuras de retención, revestimiento de concreto y ripraps. En taludes la protección consiste en:

- a) La siembra de vegetación de la zona de rápido crecimiento además de la instalación de un sistema de control de drenaje superficial.
- b) Instalar fajinas en la dirección transversal del talud, las cuales se pueden sujetar con estacas.
- c) Sellar las grietas superficiales con concreto, suelo o asfalto para prevenir la infiltración lo cual reduce la erosión.

2.6.6.- Licuefacción debida a las Acciones Sísmicas

2.6.6.1 Generalidades

La falla de taludes constituye uno de los principales efectos causados por los sismos, que puede afectar de modo desfavorable obras hechas por el hombre generando grandes pérdidas materiales y hasta humanas. La gran mayoría de las fallas de taludes durante sismos se deben al fenómeno de licuefacción en suelos no-cohesivos. Sin embargo, fallas en suelos cohesivos también han sido observadas durante eventos sísmicos.

2.6.6.2 Causas u Origen

La licuefacción es un fenómeno que consiste en una caída brusca de resistencia al corte de un suelo granular en condiciones no drenadas. La licuefacción puede ser disparada por la repetida aplicación de pequeños incrementos/decrementos de esfuerzos de corte inducidos por vibraciones del terreno asociadas con terremotos o explosiones. La caída de resistencia es de tal magnitud que, momentáneamente, el suelo alcanza la consistencia de un fluido pesado originando grandes deformaciones.

Los depósitos de suelos no cohesivos son susceptibles a la licuefacción si ellos se encuentran en un estado suficientemente suelto y tienen una permeabilidad suficientemente

baja durante el período de las vibraciones del terreno. Los fenómenos de licuefacción han sido observados generalmente en depósitos aluviales recientes de materiales granulares tales como los que se encuentran típicamente en los deltas o zonas de inundación de ríos y lagos. Es importante destacar que en la mayoría de los casos de licuefacción observados, los depósitos son de una edad reciente comprendida entre el pleistoceno y el presente.

2.6.6.2.1 Parámetros Relevantes

Los parámetros más relevantes en la evaluación del potencial de licuefacción son:

- 1) La granulometría (tamaño, gradación y forma de granos)
- 2) La densidad relativa del depósito. Estas características son determinadas por el método de deposición, la edad geológica y la historia de esfuerzos del depósito.

Las arenas finas limpias y las arenas limosas no – plásticas que contienen menos del 10% de finos son las más susceptibles a la licuefacción porque tiene la tendencia a ser depositadas en una condición suelta y además presentan una permeabilidad baja para impedir el drenaje durante las vibraciones del terreno. En general los materiales con un coeficiente de uniformidad C_u (definido como el tamaño del 60% de los granos más finos del depósito) entre 2 y 5 y un tamaño promedio dado por el D_{50} que varía entre 0.02 mm y 2.0 mm son los más propensos a la licuefacción.

Los depósitos granulares con densidades relativas mayores al 80% son poco susceptibles a la licuefacción ya que estos tienden a generar presiones de poros negativas al ser sometidos a esfuerzos de corte no drenados. Por otra parte la licuefacción es posible en depósitos granulares con densidades relativas menores al 65 % puesto que en la mayoría de los casos generan presiones de poros positivas cuando son sometidos a esfuerzos de corte no drenados.

2.7 CARACTERIZACIÓN DEL TALUD ENSAYOS

En aquellos lugares que se identifiquen como más propensos a la inestabilidad, deberá procederse a obtener información adicional para lograr una mejor caracterización del subsuelo, para conocer así los parámetros que sirvan de base para el análisis y solución del problema.

La obtención de información consta de tres fases:

- En la primera fase se debe recopilar toda la información disponible (oral y escrita) acerca del sitio en estudio; esto puede incluir desde relatos de eventos pasados por parte de lugareños, hasta estudios geológicos y geotécnicos realizados previamente, pasando por los planos topográficos, pluviosidad y sismicidad de la zona.
- La segunda fase es el trabajo de campo en el cual se ejecutan ensayos en sitio y además se obtiene muestras de suelo.
- La tercera fase consiste en el trabajo de laboratorio, en el cual se determinan las propiedades y características del material mediante ensayos de caracterización y resistencia.

2.7.1. Perforaciones

Los objetivos principales de las perforaciones son: definir la litología existente en el área en estudio y tomar muestras para su posterior análisis en el laboratorio.

El número y la ubicación de las perforaciones a realizar en un estudio determinado, está ligado al tamaño y forma del área considerada en el problema. Los criterios que se utilizan para determinar estas dos características básicas del estudio, varían grandemente, sobre todo cuando el estudio se refiere a áreas planas.

En el caso de los taludes, es recomendable hacer un mínimo de tres perforaciones pudiendo este número ser incrementado dependiendo del tamaño del talud. Una en la cresta con una profundidad aproximada de 1.5 veces la altura del talud, una hacia la mitad del talud con

una profundidad comparable con la altura de este talud, y una última al pie del mismo con una profundidad aproximada de 1/3 de la altura antes mencionada.

Con esto se quiere obtener la mayor información posible del material que esté dentro de la falla para así poder determinar los parámetros necesarios para la caracterización del suelo y su comportamiento ante cargas estáticas y dinámicas.

2.7.2 Calicatas

Mediante las calicatas que constituyen un método de exploración más superficial que el anterior, es posible tomar muestras más voluminosas de material, al mismo tiempo que ofrecen una vista “interna” del suelo y permiten la detección de posibles planos de falla (sobre todo en materiales arcillosos). Estas calicatas generalmente son excavadas a mano teniendo dimensiones típicas de 1.5 x 1.5 x 2.0 metros de profundidad, aunque también pueden realizarse utilizando procedimientos mecánicos.

Las visitas a las calicatas tienen un cierto nivel de peligrosidad, al ser posible la ocurrencia de derrumbes en las paredes de las mismas. Para evitar esto, es recomendable reforzarlas mediante estacas horizontales e inclinadas.

2.7.3 Ensayos de Campo

En campo, se busca obtener la mayor cantidad de información posible.

Para lograr este objetivo, es necesario realizar los ensayos que mejor se relacionen con el suelo en cuestión, ya que a partir de estos ensayos y mediante correlaciones que han sido desarrollados a lo largo del tiempo, se pueden inferir ciertas propiedades de los materiales en estudio. Estas correlaciones, en la mayoría de los casos se ajustan bastante bien a la realidad con un margen de error tolerable (~30%). Algunos de estos ensayos se exponen a continuación:

2.7.4 Ensayos de Laboratorio

En laboratorio se busca, primeramente, identificar el tipo de material con el que se está tratando; luego, establecer los parámetros del suelo (la resistencia) requeridos para realizar los análisis posteriores.

2.7.4.1 Ensayos de Clasificación

Lo primero que se debe realizar en el laboratorio es identificar visualmente las muestras de suelo obtenidas de las perforaciones y calicatas, para tener una buena idea acerca del tipo y número de ensayos a realizar posteriormente.

Algunos de los ensayos más frecuentemente realizados para clasificar el suelo se nombran a continuación junto con una breve descripción de los mismos:

✱ **Granulometría por tamizado:**

Consiste en hacer pasar una muestra de suelo por tamices de diferente área de apertura, para determinar la proporción de los diferentes tamaños de partículas que componen dicha muestra.

✱ **Hidrómetro:**

Consiste en determinar la velocidad de decantación de las partículas que conforman una muestra de suelo con diámetro de partícula menor que 0.06 mm con el objetivo de determinar su distribución dentro de la muestra.

✱ **Limites de Atterberg:**

Arbitrariamente definidos, son los contenidos de humedad que corresponden a los estados frontera del comportamiento del suelo.

El límite líquido separa el comportamiento plástico del suelo, del líquido; el límite plástico separa el comportamiento plástico del suelo del semi-sólido.

✱ **Peso unitario:**

Mediante este ensayo se mide el peso del suelo en un determinado volumen.

✱ **Gravedad específica:**

Mide la densidad de las partículas que componen el suelo.

2.7.4.2 Ensayos de Resistencia

Estos ensayos tienen por finalidad obtener una estimación de la resistencia del suelo. Para la estimación de la resistencia no drenada del suelo se utilizan ensayos tales como el penetrometro y la veleta de bolsillo (también pueden ser realizados en campo) y los ensayos no drenados con y sin confinamiento en la cámara triaxial (mucho más costosos).

En el caso de la resistencia drenada del suelo, también se puede utilizar la cámara triaxial con velocidades más bajas de aplicación de las cargas y el ensayo de corte directo. Este último está generalmente reservado a los materiales granulares.

2.7.5 Muestro

Dependiendo del material que se vaya consiguiendo en las perforaciones y del grado de precisión de los datos geotécnicos que se desean obtener, se realizará el muestreo en las perforaciones.

2.7.6 Instrumentación

En el estudio de taludes, la detección de inestabilidad puede ser ayudada mediante el uso de instrumentos diseñados para ser colocados dentro del subsuelo. Estos instrumentos, con la ayuda del tiempo, revelarán ciertas características del talud, que complementaran la información proveniente de los ensayos de campo y de laboratorio.

2.7.6.1 Inclinómetros

El inclinómetro es tal vez el instrumento más directamente relacionado con el movimiento de una masa de suelo. Este dispositivo, que se hace bajar verticalmente por una tubería previamente colocada dentro del subsuelo hasta una profundidad mayor a la que se sospecha que pasa la superficie de falla, registra sus cambios de inclinación a medida que se desliza por ésta. Estas lecturas son almacenadas y comparadas con otras que se toman a diversos intervalos de tiempo (cada semana, cada mes, etc.) con el objetivo de encontrar algún sector de la tubería en el cual se produzcan cambios de inclinación con respecto al tiempo. Este es un medio bastante eficiente y seguro para establecer la posición de la superficie de falla de un deslizamiento.

2.7.6.2 Piezómetros

Como ya se dijo antes, el agua es un factor de importancia primordial en la estabilidad de un talud en una gran mayoría de las ocasiones. Es por esto, que la determinación precisa de su posición dentro del suelo, es de vital importancia para el ingeniero. Para ello se utilizan los piezómetros, estos instrumentos miden la presión de agua intersticial que hay en un determinado nivel del subsuelo y para ello se pueden emplear diferentes técnicas.

El piezómetro de boca abierta, es el más sencillo de todos, y en muchos casos, es el que se utiliza como referencia. Consiste básicamente de un tubo expuesto a la presión atmosférica, con ranuras protegidas, en el cual cae el agua libre de suelo. Al estabilizarse esta agua (dependiendo del tipo de suelo), tendrá un nivel correspondiente con el del agua contenida entre las partículas de suelo. El piezómetro de boca abierta es recomendable usarlo cuando se esté tratando con suelos granulares de relativamente alta permeabilidad. Existen piezómetros más complicados como los de hilo vibratorio y los neumáticos, que proporcionan una mayor precisión y una respuesta al cambio de presión más rápido que los de boca abierta. El uso de estos piezómetros es especialmente recomendable cuando se esté tratando con suelos más cohesivos, de baja permeabilidad.

2.8 EVALUACIÓN DE LA ESTABILIDAD DE UN TALUD

La estabilidad de un talud natural, de corte o relleno, comúnmente se evalúa por medio de métodos de estabilidad basados en el equilibrio límite del suelo. Estos métodos toman en cuenta los factores principales que influyen la resistencia del suelo o masa rocosa.

La cuantificación de la estabilidad de un talud se basa en el concepto de factor de seguridad. En esta sección se incluye una descripción del concepto de factor de seguridad, la determinación o estimación de los parámetros de resistencia, incluyendo valores típicos, y una breve descripción de los métodos de análisis.

2.8.1 Concepto de Factor de Seguridad

El factor de seguridad es un valor determinante en un cálculo de estabilidad, se puede decir que existen varias formas de definirlo, a continuación mencionamos algunas de estas.

- 1) El valor mínimo de la relación, entre la fuerza activa y la fuerza resistente, para diversas posiciones de la superficie de falla, es el factor de seguridad.

$$FS = \frac{f_r}{f_a}$$

Donde:

FS = Factor de seguridad.

f_r = fuerza resistente

f_a = fuerza activa

2) Básicamente se dice que un talud es estable cuando su ángulo de inclinación respecto a la horizontal, da un valor tal que esté dentro de un factor de seguridad, el cual garantice la estabilidad.

3) El factor de seguridad es la relación de la resistencia al corte disponible, con respecto a la fuerza tangencial necesaria para equilibrarlo.

$$FS = \frac{\tau}{\tau'}$$

Donde:

$$\tau = C + \sigma \operatorname{Tg} \phi$$

τ' = Fuerza componente del peso.

τ = Resistencia al corte

τ' = Fuerza tangencial

4) En el caso de suelos puramente friccionantes el factor de seguridad es la relación entre los valores de las tangentes de los ángulos, de fricción interna y de inclinación respectivamente, como se ve a continuación:

$$FS = \frac{\operatorname{tg} \phi}{\operatorname{tg} \alpha}$$

Donde:

ϕ = ángulo de fricción interna.

α = ángulo de inclinación.

5) El factor de seguridad es la relación del momento de las fuerzas resistentes a lo largo de la superficie de falla, con respecto al momento del peso de la masa deslizando.

$$FS = \frac{Mr}{Md}$$

Donde:

Mr = Momento resistente.

Md = Momento deslizando.

Los momentos son respecto al centro del círculo de deslizamiento usado por varios métodos de cálculos de estabilidad de taludes.

Por lo expresado anteriormente, se puede evidenciar que el valor numérico del factor de seguridad, es de gran importancia en la determinación de la estabilidad de un talud. Ya que si el valor del factor de seguridad es la unidad ($FS = 1$) el talud se halla en un estado de equilibrio límite, si es un valor menor que uno ($FS > 1$), deberá considerarse al talud como inseguro, con tendencia más proclive a deslizarse en cualquier momento, luego pues indicar que el factor de seguridad en ningún caso deberá ser inferior a la unidad, si aquello ocurriese se deberán realizar el cálculo de la estabilidad o los parámetros usados para tal efecto.

Por consiguiente, un factor de seguridad cuyo valor sea superior a la unidad ($FS > 1$), garantiza la estabilidad del talud, por lógica es de suponer que si quisieran obtener valores muy superiores a la unidad para el factor de seguridad, aquello no es posible por diversas causas, siendo la principal la economía del proyecto.

En otras palabras, se puede decir, que el factor de seguridad “mide la capacidad del talud, para mantenerlo estable” bajo diversas condiciones, un factor de seguridad definido, además definitivo no se puede establecer ya que depende de muchos factores entre ellos el tiempo, dado que el factor de seguridad varia en el tiempo. Tampoco se puede determinar a priori valores límites mínimos admisibles, que tengan aceptación unánime, por lo anteriormente expresado.

TABLA II - 1

FACTOR DE SEGURIDAD (FS)	SIGNIFICADO
Menor que 1	Inseguro
1.0 - 1.2	Seguridad dudosa
1.2 - 1.4	Satisfactorio para Cortes y Terraplenes
1.5	Seguro para presas

Fuente: Estabilidad y refuerzo de Taludes Prof. Germán Crujar.

2.8.2 Determinación de la Resistencia del Suelo

Los principales parámetros que definen la resistencia del suelo son el ángulo de fricción interna en el caso de suelos granulares y la resistencia al corte no drenada en caso de suelos cohesivos. La determinación o estimación de estos parámetros se hace por medio de ensayos in-situ o ensayos de laboratorio.

2.8.3 Comportamiento drenado vs no-drenado

Cuando el suelo es sometido a un cambio de esfuerzos, la estructura del suelo se modifica y por lo tanto el suelo tiene la tendencia a experimentar un cambio de volumen. Esta tendencia se manifiesta en la generación de un exceso de presión de poros. Si este cambio de esfuerzo es aplicado a una cierta tasa y/o las condiciones de drenaje son tales que el exceso de presión de poros es cero cuando se produce la falla, se dice que la falla ha tenido lugar bajo condiciones drenadas. Por otra parte, si el cambio de esfuerzo es aplicado muy rápido o las condiciones de drenaje son tales que el exceso de presión de poros no tiene oportunidad de disiparse cuando la falla tiene lugar, entonces se dice que la falla ocurrió bajo condiciones no drenadas (Terzaghi et. al, 1996).

En la mayoría de los problemas prácticos en campo, las arcillas duras y altamente sobre consolidadas fallan bajo una condición drenada. Una razón para ello es que estas arcillas, el exceso de presión de poros es negativo y por lo tanto a medida que este se disipa las arcillas sobre consolidadas se debilitan.

Por su parte, las arcillas blandas y limos fallan en condiciones no drenadas. Una razón para ello es que el exceso de presión de poros positivo y por lo tanto la condición crítica es a corto plazo (cuando existen estos excesos de presión positivos) pues a medida que estas arcillas disipan este exceso de presión de poros las mismas se consolidan y ganan resistencia.

La mayoría de los suelos granulares disipan el exceso de presión de poros rápidamente debido a su alta permeabilidad y por lo tanto fallan en condiciones drenadas excepto cuando son sometidos a carga dinámica (sismos) cuando una falla no drenada es posible.

2.8.4 Resistencia al Corte en suelo Granulares

Como se mencionó anteriormente, los suelos granulares en la mayoría de los problemas de campo, excepto bajo carga dinámica, movilizan la resistencia al corte drenado.

2.8.5 Resistencia al Corte en Arcillas sobre Consolidadas

Como se mencionó las arcillas sobre consolidadas en la mayoría de los problemas de campo movilizan la resistencia al corte drenado.

2.8.6 Resistencia al Corte en Limos y Arcillas blandas

Como se menciona en las arcillas blandas en la mayoría de los problemas de campo, movilizan la resistencia al corte no-drenada.

La resistencia al corte no-drenada se puede medir directamente en campo con un ensayo de veleta o en laboratorio con un ensayo de compresión simple sin confirmar. Skempton propuso la siguiente correlación para estimar la resistencia al corte no drenado.

$$\frac{Su}{\sigma'_p} = 0.11 + 0.0037I_p$$

Donde:

$I_p =$ *Indice de plasticidad*

$\sigma'_p =$ *Presion de cosolidacion*

Finalmente, se ha incluido la tabla, la cual sirve como guía para la estimación de la resistencia al corte no drenado en arcillas y el ángulo de fricción para suelos granulares. Esta tabla es tomada de Terzagui y Peck (1967).

TABLA II - 2

ARENAS			LIMOS O ARCILLAS		
Nspt	Φ	Densidad Relativa	Nspt	Su(Kgr/cm ²)	Consistencia
			< 2	0 - 0.12	muy blanda
0 - 4	< 30	muy suelta	2 - 4	0.12 - 0.25	blanda
4 - 10	30 - 32	suelta	4 - 8	0.25 - 0.5	media
10 - 30	32 - 35	media	8 - 15	0.5 - 1	firme
30 - 50	35 - 38	densa	15 - 30	1 - 2	muy firme
> 50	> 38	muy densa	> 30	> 2	dura

Terzagui y Peck (1967).

2.9 MÉTODOS PARA LA ESTABILIZACIÓN DE UN TALUD

Tan pronto quede comprobado que hay riesgo de inestabilidad en un determinado talud, se deberá buscar la mejor solución para el problema. Esta solución deberá contemplar aspectos como el costo implicado, la naturaleza de las obras afectadas (tanto en la cresta como al pie del talud), el tiempo estimado en el que se puede presentar el problema, la disponibilidad de los elementos constructivos de la solución, etc.

Existen tres grandes métodos para lograr la estabilidad de un talud:

- **Aumentar la resistencia del suelo:** son las soluciones que aplican drenaje en el suelo para bajar el nivel freático o la inyección de sustancias que

aumenten la resistencia del suelo, tales como el cemento o algún otro elemento conglomerante.

- ***Disminuir los esfuerzos actuantes en el talud:*** soluciones tales como el cambio de geometría del talud mediante el corte parcial o total de éste a un ángulo menor o la remoción de la cresta para reducir su altura.
- ***Aumentar los esfuerzos de confinamiento (σ_3) del talud:*** se puede lograr la estabilización de un talud mediante obras, como los muros de gravedad, hidrosiembras, pantallas atirantadas o las bermas hechas del mismo suelo.

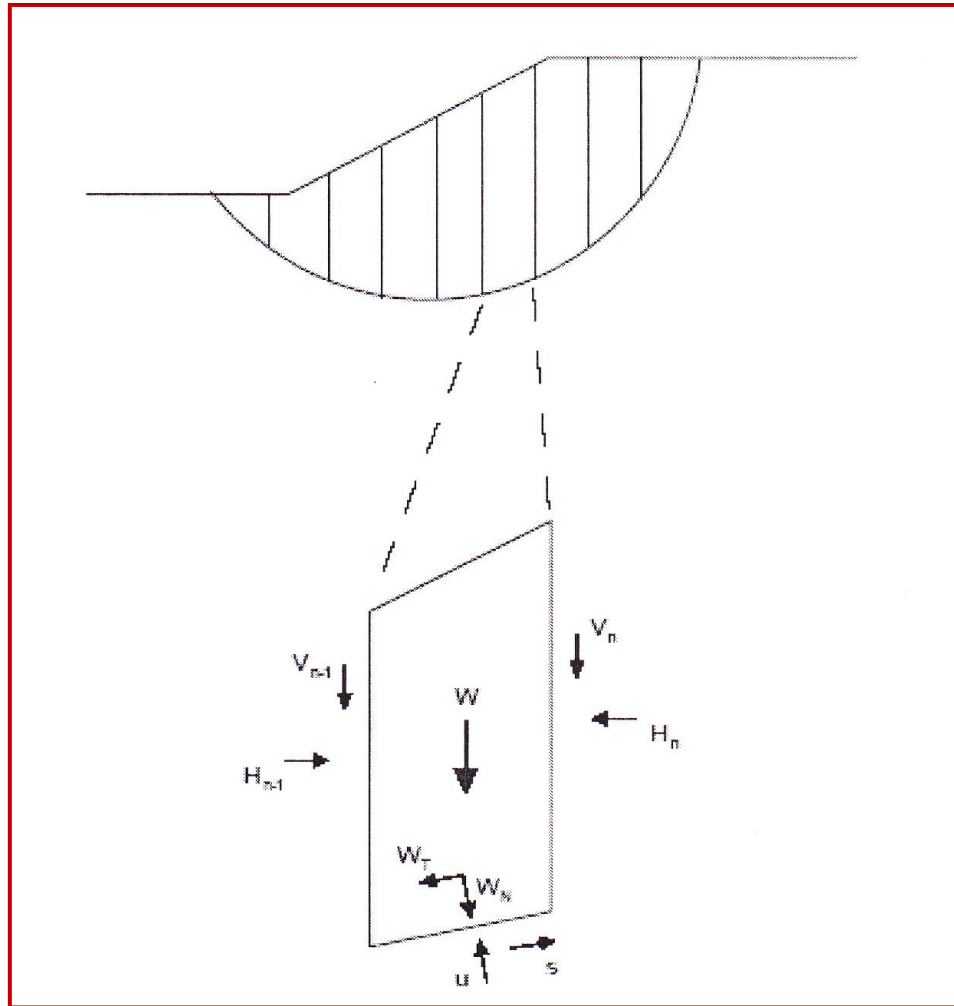
2.9.1 MÉTODOS DE CÁLCULO DE ESTABILIDAD DE TALUDES

Casi la totalidad de los métodos utilizados actualmente se basan en el denominado de las rebanadas que consiste en dividir el macizo potencialmente deslizante en rebanadas verticales, calcular el equilibrio de cada una de ellas, y finalmente analizar el equilibrio global, obteniendo un Factor de Seguridad (FS) que se define como la relación entre fuerzas o momentos resistentes y fuerzas o momentos motores.

El peso de la rebanada (W) se descompone en un empuje tangencial (WT) y otro vertical (WN), paralelo y normal, respectivamente, a la base de aquella. (WT) origina una tensión cortante, a la que se opone la propia resistencia al corte (s) del terreno, definida por la cohesión y la fuerza normal(WN) disminuida en la presión intersticial(u).

Las fuerzas V y H, con sus subíndices, definen la interacción entre rebanadas y es la evaluación de estas reacciones internas lo que establece la diferencia fundamental entre los métodos. Si las circunstancias así lo requieren puede ser necesario considerar la incidencia de sobrecargas, fijas o temporales, las fuerzas de filtración a través del macizo, así como las acciones sísmicas.

FIGURA II - 10



Principio de los métodos de rebanadas

Una vez calculado FS para una determinada curva de rotura potencial, se repite el proceso para otra distinta, así sucesivamente hasta obtener un mínimo para FS, suponiéndose entonces que esta será la curva pésima. Como puede fácilmente deducirse, en el cálculo manual el proceso es lento y tedioso, prestándose a errores durante la manipulación de tan gran número de parámetros y quedando siempre la incertidumbre de si el valor del FS que estimamos al final es realmente el mínimo, o todavía podemos encontrar otra curva que lo mimice más, y aunque hay procedimientos para ir acortando progresivamente los FS, se necesita un número significativamente elevado de horas de trabajo para llegar a un valor confiable.

Con el cálculo electrónico el procesamiento es prácticamente instantáneo, y permite analizar un gran número de alternativas, por lo que el valor mínimo de FS puede acortarse dentro de un intervalo razonablemente aceptable en un tiempo muy corto.

Se exponen a continuación los fundamentos de algunos de los métodos más utilizados y contrastados por la práctica.

2.9.1.1 MODELO DE ÁBACOS DE TAYLOR

No se puede tratar la estabilidad de taludes sin mencionar **el modelo de ábaco de Taylor** desarrollado por esta autor desde 1937 y que, durante bastante tiempo, ha sido el único procedimiento utilizado para el estudio global de una masa de tierra que desliza.

Taylor expreso la estabilidad de taludes en suelos homogéneos en términos de un número de estabilidad N_o :

$$N_o = \frac{C}{F * H * \gamma}$$

Donde:

F = es el factor de seguridad

H = altura vertical del talud

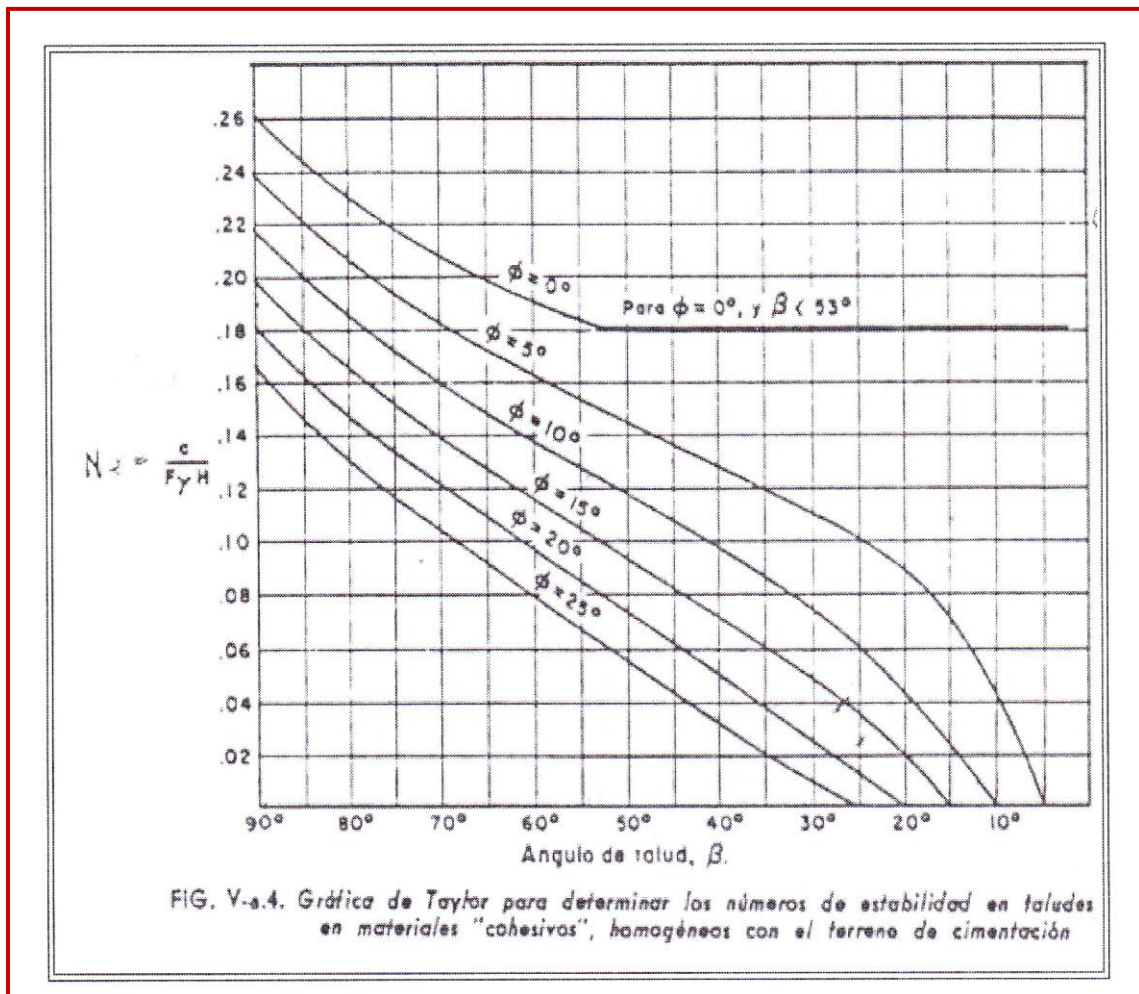
C = Cohesión

γ = peso específico

Pero Taylor produjo una carta donde relaciona N_o con ϕ_u y el ángulo de pendiente β para valores de D. Normalmente $\phi_u = 0$, y si D es grande y β es menor que 53° entonces N_o tiende a un valor constante de 0.18. N_o crece para valores de β mayores a 53° y decrece para valores menores de 53° cuando la profundidad de emplazamiento es limitada por un

estrato.

FIGURA II - 11



Ábaco de Taylor (cohesivos)

Cuando sobre el talud homogéneo actúan exclusivamente las acciones gravitatorias, y la comprobación de la seguridad por el método del círculo de rozamiento, tanteando un número de líneas de rotura resulta suficientemente amplio, ha sido resuelto por los modelos de ábacos de Taylor.

Puede determinarse para cualquier ángulo del talud y cualquier profundidad " $n_d H$ " a la base firme, un número de estabilidad adimensional:

$$N_o = \frac{\gamma * H_c}{C}$$

Y calcularse con la ecuación inmediatamente anterior el valor de H_c que es la altura crítica del talud, o sea, la altura vertical del talud para un factor de seguridad igual a (1).

Entonces el Factor de Seguridad de un talud propuesto puede determinarse aproximadamente por:

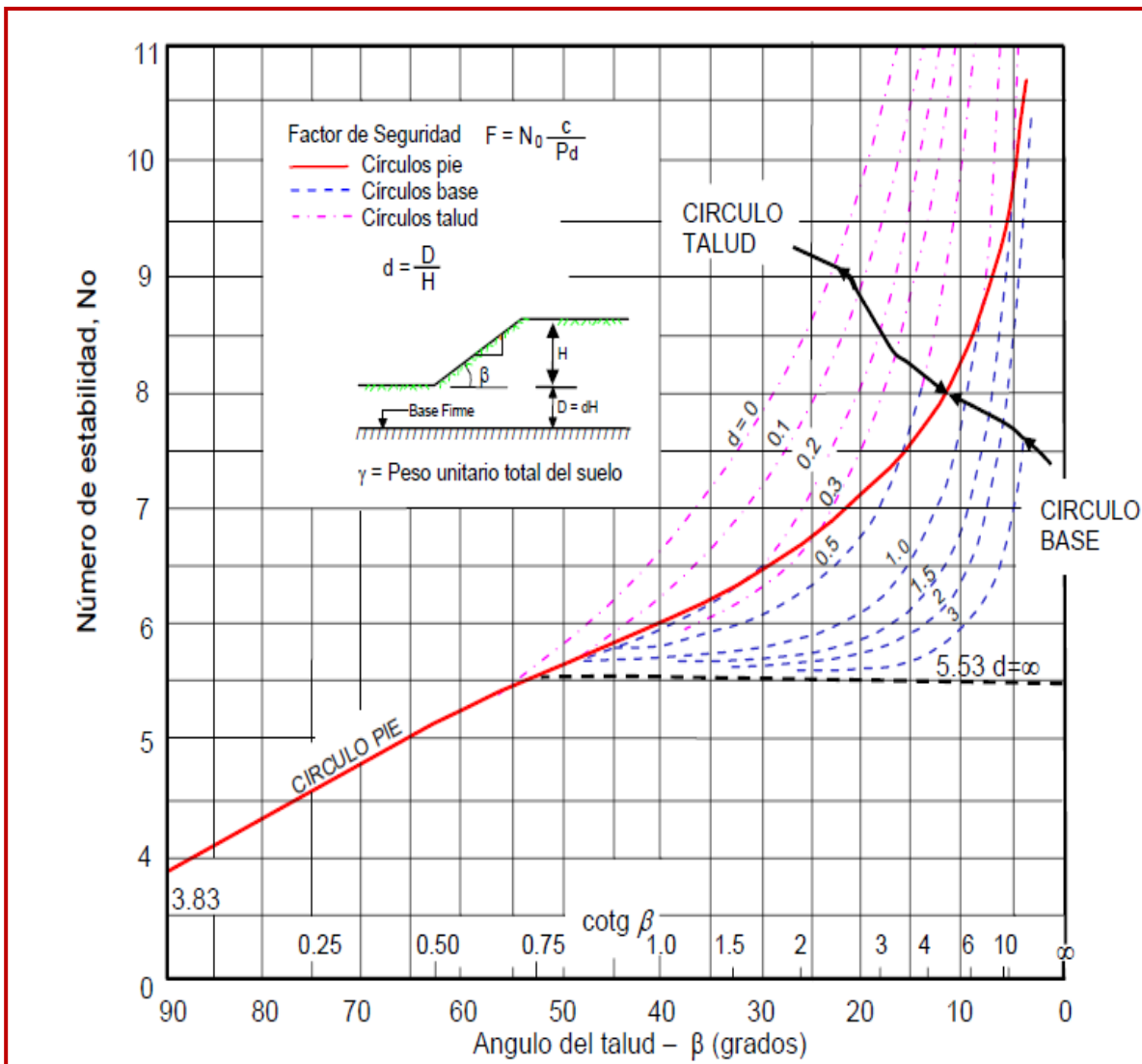
$$FS = \frac{H_c}{H}$$

En esta solución, además se tienen en cuenta la posible presencia de una capa rígida profunda que, si bien tiene poca trascendencia en aquellos casos en que el ángulo de rozamiento es apreciable (> 10), resulta decisiva en aquellos casos extremos del cálculo en situaciones sin drenaje, en los que se supone $\Phi = 0$.

Para el caso particular de $\Phi = 0$, se puede aplicar el ábaco de la (FIGURA II – 12) del que puede obtenerse la cohesión necesaria para el equilibrio estricto en función de los datos geométricos del talud, que indican en la figura, y del peso específico del suelo.

En el ábaco se indica además, el tipo de línea circular cuya estabilidad requiere una cohesión más alta (línea de rotura crítica). Esta línea puede ser un círculo de pie, de talud o profundo. La forma genérica de estas tres tipologías puede verse en:

FIGURA II - 12



Ábaco de Taylor para $\Phi = 0$

2.9.1.2 MODELO DE ÁBACOS DE JAMBU

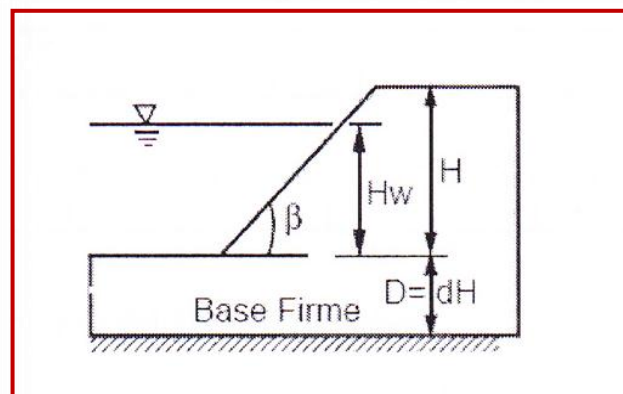
El **Modelo de Ábacos de Jambu** presenta dos procedimientos, uno para suelos cohesivos ($\phi = 0$), y otro para suelos friccionantes ($\phi > 0$). Para suelos cohesivos, el procedimiento es el mismo de Taylor. Para los suelos friccionantes o mixtos, el procedimiento es un poco más complejo. A continuación se da el procedimiento para las tablas de Jambu para $\phi = 0$. Paso a paso:

Paso 1. Parámetros que se requieren para el análisis

- Altura de cada suelo H (metros)
- Pendiente del talud β (grados)
- Cohesión del suelo C_u (Ton/m^2)
- Altura del nivel freático H_w (m)
- Peso específico del suelo γ (Ton/m^3)
- Profundidad hasta el manto de suelo duro impenetrable D (metros)

Paso 2. Calcular el factor de profundidad “d”

FIGURA II - 13



Variables de talud

Calcular el factor d , por medio de la siguiente fórmula:

$$d = \frac{H_w}{H}$$

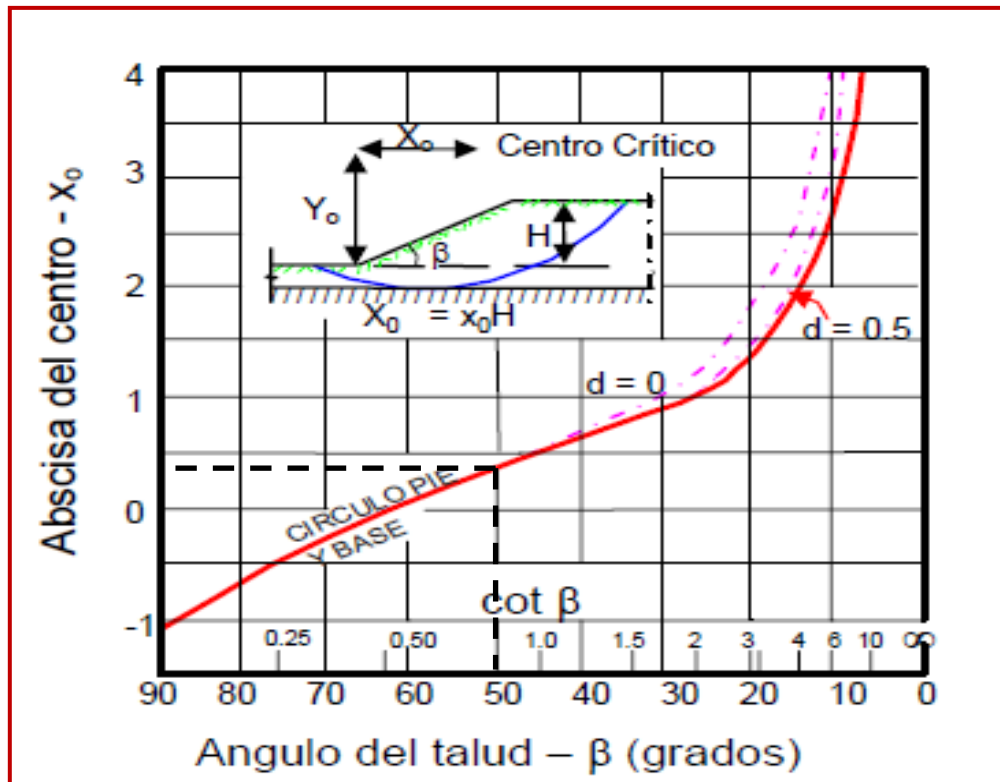
Donde:

H_w = Altura del nivel freático

H = Profundidad del pie del talud más bajo del círculo de falla.

Paso 3. Obtener la localización del círculo (X_o , Y_o). (FIGURA II - 14)

FIGURA II - 14



Coordenada X_o para el círculo crítico (Jambu 1968).

Paso 5. Calcular el Factor de Reducción

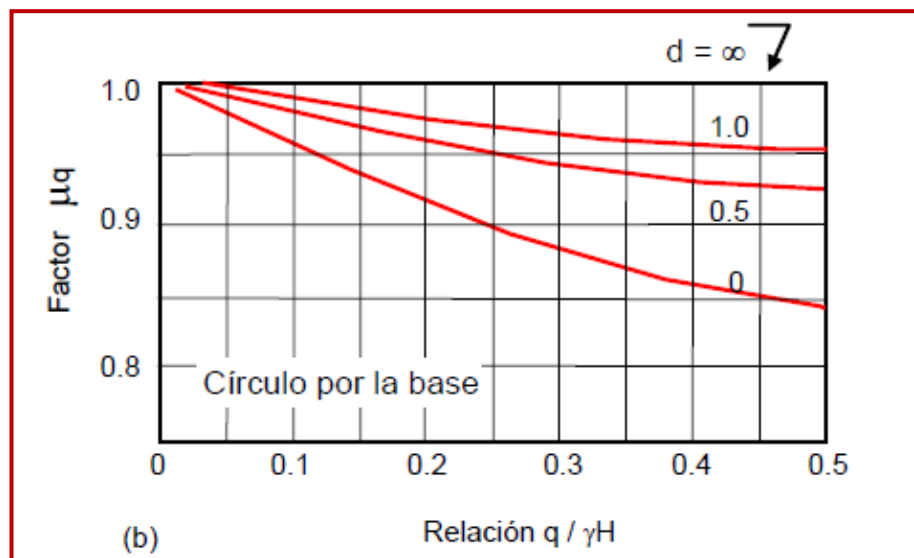
Puede encontrarse Factor de reducción por carga adicional, factor de reducción por sumergencia e infiltración, factor de reducción por grieta de tracción sin presión hidrostática en la grieta y factor de reducción por grieta de tracción con presión hidrostática en la grieta. En las (FIGURAS II – 16 A II – 19), se muestran las tablas que se emplearán según el caso que se presente.

Paso 6. Calcular P_d

P_d se calcula con la siguiente fórmula:

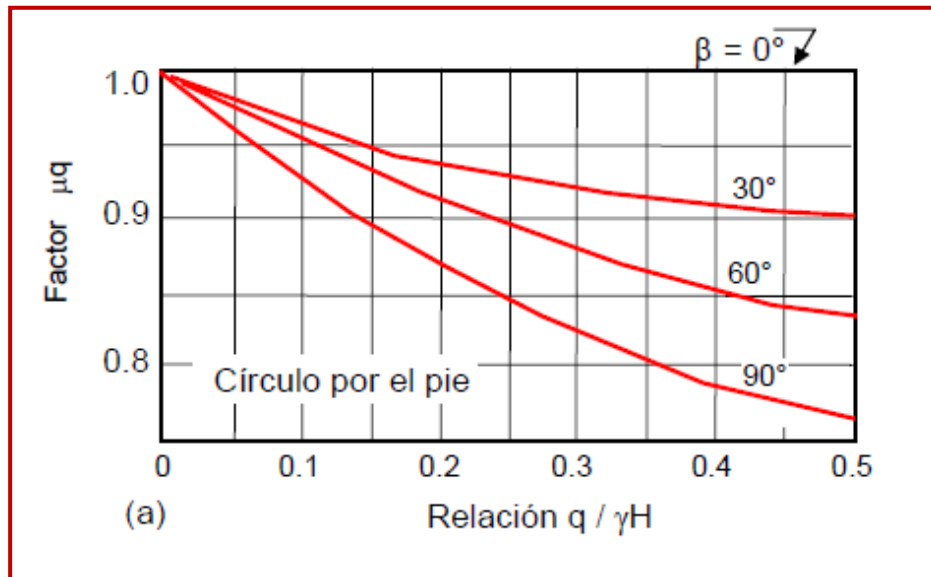
$$P_d = \frac{(\gamma * H) + (\gamma_w * H_w)}{\mu_q * \mu_w * \mu_t}$$

FIGURA II - 16



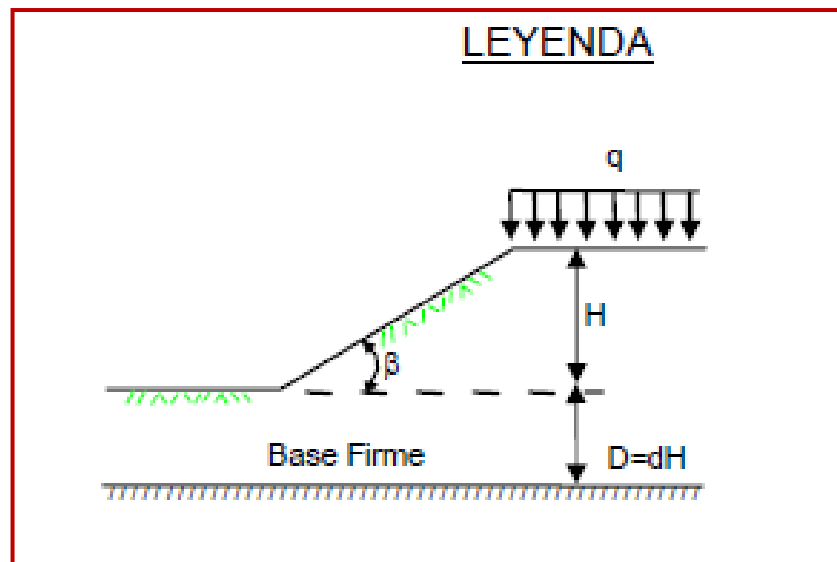
Gráfica para obtener μ_q cuando el círculo pasa por la base

FIGURA II - 17



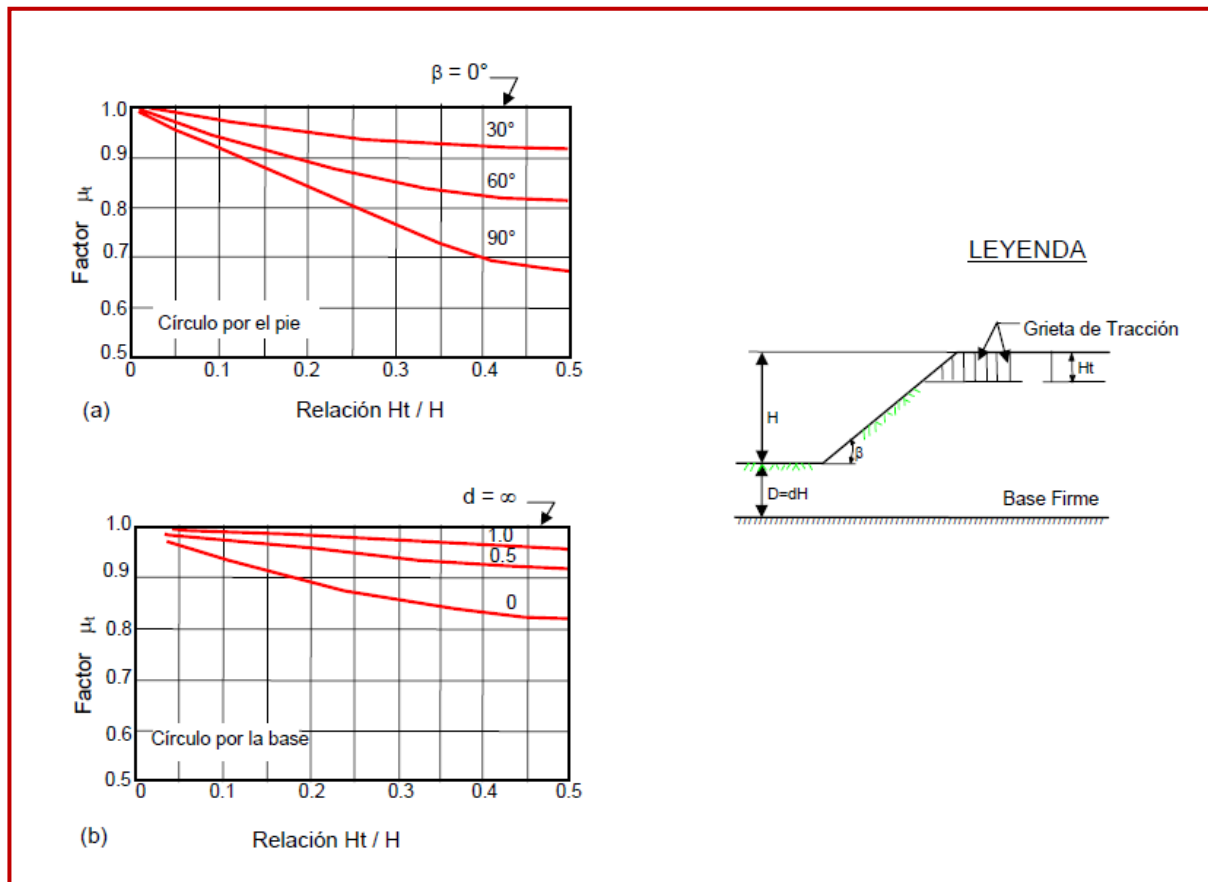
Gráfica para obtener μ_q cuando el círculo pasa por el pie

FIGURA II - 18



Factor de reducción por carga adicional para tablas de Jambu.

FIGURA II -19



Factor de reducción por grieta de tracción sin presión hidrostática en ésta (Jambu, 1968).

Donde:

γ = peso unitario promedio del suelo

H = altura del talud

q = sobrecarga

γ_w = peso unitario del agua

H_w = altura de agua fuera del talud

μ_q = factor de reducción por sobrecarga

μ_w = factor de reducción por sumergencia

μ_t = factor de reducción por grieta de tensión

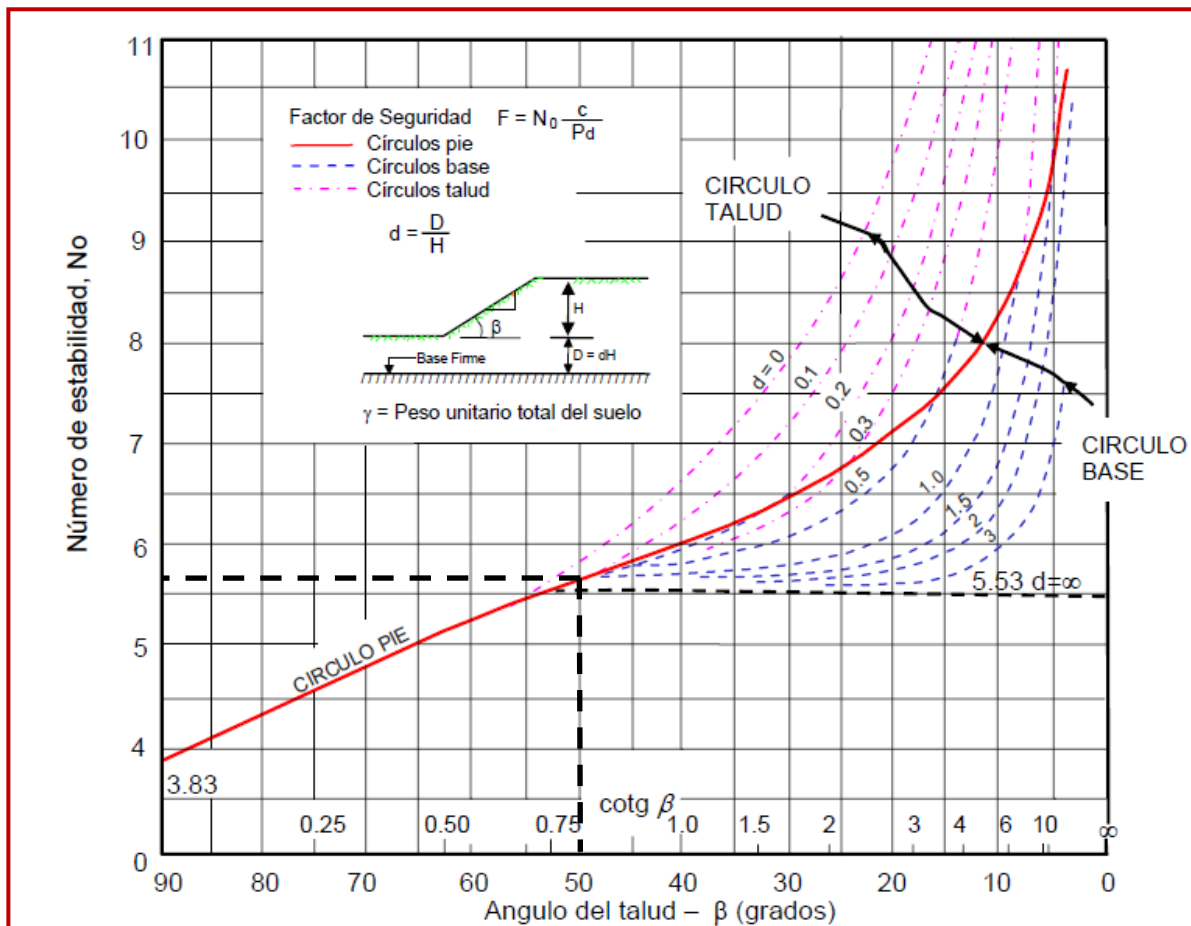
Si no hay sobrecarga, $\mu_q = 1$; si no hay sumergencia, $\mu_w = 1$ y si no hay grieta de tensión, $\mu_t = 1$.

En la fórmula de Pd se toma $q = 0$, $\mu_q = 1$ par la condición no consolidada.

Paso 7. Calcular el número de estabilidad No

De la (FIGURA II – 20), se determina el valor del número de estabilidad (No), que depende del ángulo del talud.

FIGURA II - 20



Número de estabilidad.

Paso 8. Calcular la cohesión requerida

Se calcula despegando C_{req} de la fórmula del número de estabilidad N_o .

$$N_o = \frac{\gamma * H}{C_{req}}$$

Paso 9. Calcular el Factor de Seguridad

Se utiliza la expresión:

$$FS = \frac{N_o * C_{req}}{P_d}$$

Su proceso requiere varios tantos hasta hallar el factor de seguridad que satisfaga la relación y el límite mínimo dado.

2.9.1.3 ANÁLISIS DE APLICABILIDAD DE MODELOS

Para realizar el análisis de aplicabilidad de los modelos tomaremos solo dos factores:

- Un primer factor de análisis será los parámetros de entrada
- Un segundo factor de análisis será la metodología del proceso

Análisis Bajo el factor de parámetros de entrada:

Si analizamos a todos los métodos comprobamos que coincidentemente los parámetros de entrada que utilizan en la generalidad los métodos son el ángulo de fricción interna Φ y el factor de cohesión C .

Esto implica que desde el punto de los parámetros no hay ventaja de unos métodos frente a otros ya que en su mayoría los parámetros de entrada son los mismos, los cuales necesariamente deben obtenerse con la mayor certeza posible.

La hipótesis de Taylor asume que las tensiones normales en la superficie de rotura están concentradas en un único punto, lo que supone un cierto error, aunque, en general, queda del lado de la seguridad. Además, el Modelo de ábacos de Taylor solo permite introducir la presencia de agua en el caso de suelo homogéneo y nivel freático horizontal.

La tabla siguiente nos muestra un resumen de los parámetros de cada método.

TABLA II - 3

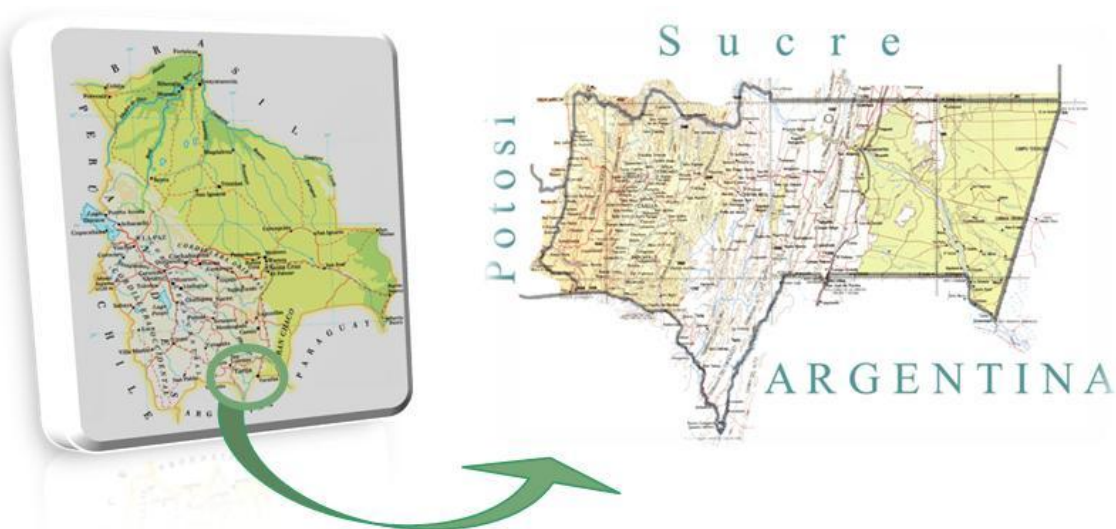
Autor	Parámetros	Inclinación de talud	Método analítico utilizado	Observaciones
Taylor (1948)	c_u c, ϕ	0-90° 0-90°	$\phi = u$ Círculo de fricción	Análisis no drenado Taludes secos solamente
Jambu Morgenstem (1960)	y c, ϕ, r_u	11-26,5°	Jambu	Primero en incluir efectos de agua.
Gibson Morgenstem (1960)	y c_u	0-90°	$\phi = 0$	Análisis no drenado con cero resistencia en la superficie y c_u aumenta linealmente con la profundidad.
Spencer (1967)	c, ϕ, r_u	0-34°	Spencer	Círculos de pié solamente
jambú (1968)	c_u C, ϕ, r_u	0-90°	$\phi = 0$ jambú GPS	Una serie de tablas para diferentes efectos de movimiento de agua y grietas de tensión.
Hunter y Schuster (1968)	y c_u	0-90°	$\phi = 0$	Análisis no drenado con una resistencia inicial en la superficie y c_u aumenta linealmente con la profundidad.
Chen y Ginger (1971)	c, ϕ	20-90°	Análisis límite	
Oconnor y mitchell (1977)	y c, ϕ, r_u	11-26°	Jambu	Bisop y Morgenstem (1960) extendido para incluir $N_s=0,1$
Hock y Bray (1977)	c, ϕ	0-90°	Círculo de fricción de cuña de	Incluye agua subterránea y grietas de tensión.
	C, ϕ	0-90°	Cuña	Análisis de bloque en tres dimensiones.
Cousins (1978)	c, ϕ	0-45°	Círculo de fricción	extensión del método de Taylor (1948)
Charles Soares (1984)	y ϕ	26-63°	Jambu	Envolvente de falla no lineal de Mohr-Coulomb.
Barnes (1991)	c, ϕ, r_u	11-63°	Jambu	Extención de Jambu y Morgenstem(1960) para un rango mayor de ángulos del talud.

Parámetros de Aplicabilidad

3.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL TRAMO

El departamento de Tarija, se encuentra ubicado al Sur de Bolivia, entre los paralelos 21° 32' y 22° 55' de latitud sur y los meridianos 62° 15' y 65° 28' de longitud Oeste de la Línea de Greenwich. Limita con la República Argentina al Sud y al Este con la República del Paraguay, al Oeste con los Departamentos de Chuquisaca y Potosí, y al Norte con el Departamento de Chuquisaca, ver gráfico.

MAPA III - 1

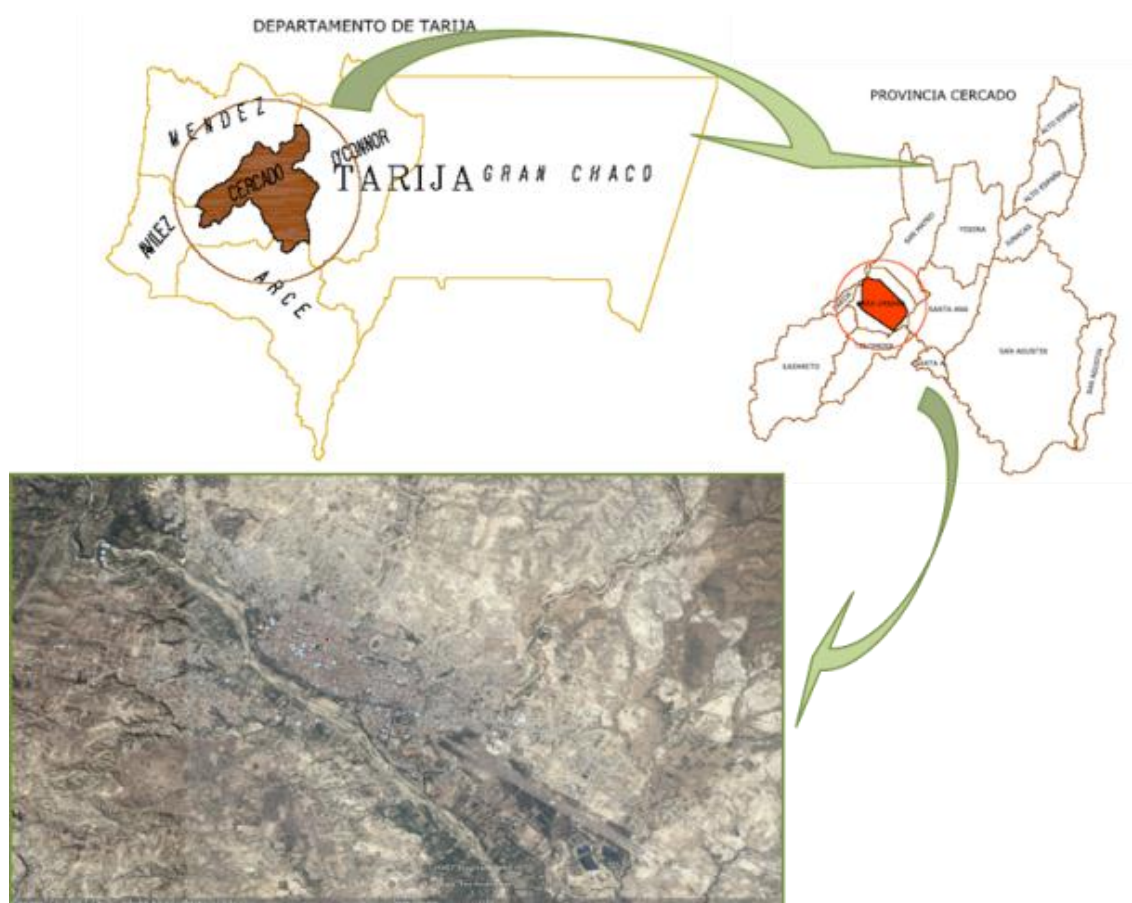


Departamento de Tarija

La capital del departamento de Tarija, localizada a orillas del Río Guadalquivir, “Río Grande”, se encuentra emplazada en la parte central del área geográfica del departamento, la que mediante la red fundamental, conecta al departamento con el sector norte del país, mientras que por el sur mediante la carretera asfaltada a la ciudad de Bermejo, que a la vez permite al país establecer la conexión con la República Argentina, en tanto que por el este, la conexión con dos ciudades importantes del departamento como Yacuiba y Villa Montes.

La división político administrativa de área urbana del Municipio de la provincia Cercado y la ciudad de Tarija, comprende trece distritos con superficies muy heterogéneas, los distritos del 1 al 5, coincidentemente corresponde a los cinco barrios tradicionales de la ciudad de los años 60, presentan superficies promedios de 55 Has., mientras que los distritos del 6 al 13, tienen extensiones cuyo promedio supera las 498,75 Has.

MAPA III – 2



Municipio de Cercado

FOTOGRAFÍA III -1



Emplazamiento zona de Estudio

El proyecto se localiza en el sector de la Avenida de la Integración ubicado al lado del Río Guadalquivir en la margen derecha a la altura de los Barrios Guadalquivir, Juan Pablo II y Libertad. Distrito 6 de la Ciudad de Tarija, que comunica la Avenida Las Américas (Oficinas de la Unidad Operativa de Transito) con la Avenida Panamericana (rotonda ex parada al Norte), dicha Avenida consta de cuatro carriles, dos de ida y dos de vuelta.

En este contexto se consideró que para dar mayor aplicabilidad al trabajo, era necesario escoger un lugar del sector con las características más críticas tomando en cuenta parámetros tales como: altura, y topografía de la zona circundante al talud. Así se remitió a recopilar toda la información disponible del sector, correspondiente al lado derecho de la Avenida (de Sud a Norte), dicha Avenida tiene una longitud de 2,9 Km; el sector elegido se encuentra entre las progresivas 2 + 300 a 2 + 650.

Datos del Lugar:

Latitud sur	21°33' 60"
Altura sobre el nivel del mar	1915 m
Temperatura promedio	18° C

3.2 CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA

En general el valle central de Tarija, se encuentra formado por un manto de sedimentos lacustres del cuaternario de aproximadamente 90 m de espesor, depositado horizontalmente, constituidos principalmente de arcillas, limos y en mucho menos cantidad de arenas finas y gravas, que descansa sobre un lecho rocoso de lutitas y silititas.

La zona está conformada por estratos predominantes de arcillas y limos normalmente consolidados de origen lacustre, con poca variación de colores que van de marrón claro a gris.

Se observa depósitos de suelo erosionados, también fisuras producto del escurrimiento de agua en épocas de lluvia. Las arcillas inorgánicas plásticas constituyen el material predominante.

3.2.1 TOPOGRAFÍA

El trazo seleccionado para la elaboración de la topografía, se inicia en inmediaciones del barrio Guadalquivir donde se encuentra localizada dicha avenida la cual atraviesa los barrios Juan Pablo II y en gran parte el barrio Libertad, por ser área verde del mismo, llegando a unirse con la Avenida Panamericana a la altura de la rotonda (ex parada al Norte).

3.2.2 GEOLOGÍA

La información geológica del lugar en estudio es incompleta ya que la información de mapas geológicos es muy general, por el hecho de la escala a la que se encuentran, lo cual no nos muestra claramente las circunstancias geológicas locales, con el detalle que requiere un proyecto cualesquiera sea la naturaleza de éste, sin embargo se cuenta con informes de la geología del valle central de Tarija los cuales aclaran el panorama.

La geología de la zona muestra clara presencia de depósitos de sedimentos lacustres correspondiente al cuaternario.

Si bien las rocas que se observan en los cerros circundantes muestran signos que pertenecen al cámbrico como areniscas cuarzosas, aparecen también rocas del devónico, lutitas, pizarras y areniscas. En general el valle central de Tarija se encuentra formado por un manto de sedimentos lacustres del cuaternario depositado horizontalmente, constituidos principalmente de arcillas, limos y en muchos menos cantidad arenas finas y gravas, que descansa sobre un lecho rocoso de lutitas y cuarcitas de ordovícico, mostrando así una clara discordancia.

Los sedimentos más antiguos datan del período cámbrico donde se forman cuencas de sedimentación que duran hasta el ordovícico.

Posteriormente, por erupciones volcánicas se producen estratos delgados de tobas y luego nuevos procesos de sedimentación que dan lugar a las formaciones superiores limo-arcillosas, en algunos casos con presencia arenosa.

La zona de ubicación de las lagunas está conformada por estratos predominantes de arcillas limos normalmente consolidados de origen lacustre, con la presencia de estratos intercalados de arena de grano medio y arenas de grano muy fino.

Si bien las transformaciones tectónicas originaron grandes fallas que dieron lugar a la formación de la actual red hidrográfica, en la geología de la zona no se visualizan fallas.

3.2.3 EROSIÓN

Se debe señalar como característica importante la erosión moderada a grave que se presenta en parte del departamento de Tarija, especialmente en la llanura fluvio-lacustre del valle central. La zona presenta degradación por el fenómeno de la erosión hídrica en todas sus formas, especialmente en cárcavas de grado avanzado en los suelos formados sobre depósitos fluvio lacustre.

FOTOGRAFÍA III - 2



Degradación por erosión

En el cuaternario se forma la cuenca cerrada de origen tectónico dando lugar a un gran lago que corresponde al valle Central de Tarija. La formación de una falla que da origen a la red hidrográfica, hace que se produzca un proceso de erosión intensa que tiene como efecto el relleno de los antiguos lechos con mantos de sedimentos aluviales, que forman los depósitos inferiores de características arcillosas.

Constituyen el material predominante, son limos y arcillas de alta compresibilidad con alto contenido de material inorgánico. Debido a que el manto freático se encuentra bastante profundo y a los ciclos de humedecimientos, desecamiento, la parte superior de los suelos se va debilitando produciendo material muy fino que se erosiona fácilmente.

La erosión puede causar la pérdida de soporte de fundación de estructuras, rellenos y otras obras de ingeniería. En terrenos montañosos, la erosión incrementa la incidencia en la estabilidad de taludes pudiendo resultar en la pérdida de vía u otras estructuras. Como se observa en la fotografía la erosión ya afectó al talud ocasionando algunos desprendimientos.

FOTOGRAFÍA III - 3



Desprendimientos de Talud

3.3 METODOLOGÍA DE ESTUDIO

La información que se utiliza en el presente estudio corresponde a información Primaria y Secundaria. La *información Primaria* son los datos que arrojan las pruebas de laboratorio y la *información Secundaria*, es tomada de otros estudios similares y de la bibliografía de la temática relacionada con el estudio.

Recolección de información primaria:

- **Primera fase**, recopilación de toda la información disponible (Oral y escrita) acerca del sitio en estudio; esto puede incluir desde relatos de eventos pasados por parte de lugareños, hasta estudios geológicos y geotécnicos realizados previamente, pasando por los planos topográficos, pluviosidad y sismicidad de la zona.
- **Segunda fase**, trabajo de campo, inspección visual de las características de la zona de estudio para la identificación de los diferentes taludes o laderas a lo largo del recorrido de la Avenida de la integración y posteriormente la selección de los taludes que presenten riesgo de falla o deslizamiento.

El talud seleccionado para aplicar el cálculo de FS tiene las siguientes características.

TABLA III - 1

TALUD		
DETALLE	UNIDAD	VALOR
Angulo del talud	°	75
Longitud del talud en estudio	m	100
Altura promedio del talud	m	12

Datos del Talud en estudio

Toma de muestras para el análisis respectivo en laboratorio (excavando una calicata a una profundidad de 0.4 m, de la cabeza, medio y pie del talud objeto de nuestro estudio).

A continuación se presenta un esquema de fotografías que se tomaron en el lugar tanto de las características del talud como de la recolección de muestras de suelo.

FOTOGRAFÍA III - 4



Medición de la Pendiente del talud

FOTOGRAFÍA III - 5



Medición de la Longitud del Talud

FOTOGRAFÍA III - 6**Medición de la Altura del Talud****FOTOGRAFÍA III - 7****Recolección de muestra de la Cabeza del Talud**

FOTOGRAFÍA III - 8



Recolección de muestra Cuerpo del Talud

FOTOGRAFÍA III - 9



Recolección de muestra Pie del Talud

- **Tercera fase,** Trabajo de laboratorio, en el cual se determinan las propiedades y características del material mediante ensayos de clasificación de suelos, peso específico, caracterización y resistencia (cohesión del suelo y ángulo de fricción interna).
- **Cuarta fase,** trabajo de gabinete, este aspecto contempla el análisis profundo de todos los ensayos realizados en el laboratorio para su posterior, utilización en el cálculo del Factor de Seguridad (FS) con los Modelos de Ábacos de Taylor y Jambu.

3.3.1 Trabajo de Laboratorio

Las muestras obtenidas fueron analizadas en el Laboratorio de Suelos y Hormigones de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho (UAJMS).

En esta fase, el trabajo está orientado a conocer la distribución granulométrica de las partículas sólidas que constituyen los suelos investigados, proporcionando un nivel de referencia que, conjuntamente con los otros trabajos de laboratorio, permitieron conocer las características, las propiedades físicas y mecánicas de los suelos que conforman el talud objeto de estudio.

La relación de ensayos de laboratorio es la siguiente:

1. Clasificación de los suelos (clasificación S.U.C.S, AASHTO)
 - ▶ Granulometría.
 - ▶ Límites de Atterberg.
 - ▶ Humedad Natural.
2. Peso Específico Relativo de los suelos.
3. Ángulo de fricción Interna y Cohesión del suelo.

4. Resultados de laboratorio.

- **1. Clasificación de suelos.**

- ▶ **Granulometría**

1.1 Introducción

Para el estudio adecuado de esta práctica es necesario tener conocimiento de su definición.

El análisis granulométrico de un suelo está basado en el estudio del tamaño de las partículas de suelo. Esto se realiza con la ayuda de un juego de mallas, que tienen un tamaño graduado establecido por las normas ASTM y AASHTO, en donde se obtienen los pesos retenidos para luego realizar cálculos y la curva granulométrica.

1.1.2 Objetivo

Es obtener el porcentaje de material que pasa en cada tamiz, para luego graficar una curva granulométrica y así tener una visión de la distribución del tamaño de los granos presentes en una masa de suelo.

1.1.3 Fundamento Teórico

Dentro del análisis de los suelos, se encuentra el de la granulometría, que no es más que obtener la distribución porcentual de los tamaños de partículas que conforma un suelo. Esto se realiza con ayuda de un juego de mallas, que tienen un tamaño graduado establecido por las normas ASTM y AASHTO, en donde se obtienen los pesos retenidos para luego realizar posteriores cálculos y la curva granulométrica.

Si bien se realiza una distribución de tamaños, esto no incide en la forma que puedan tener los granos de suelo, ya que al retener material en una malla se observa diferentes tamaños y el porcentaje que se calcula está basado estrictamente en los pesos que se retiene en la malla, referido al peso total que se utiliza en el ensayo.

El factor fundamental del ensayo es la curva granulométrica, que se dibuja en una escala logarítmica, ya que de no ser así, la representación gráfica tendría que usar una escala demasiado grande.

FOTOGRAFÍA III – 10



Método del lavado.

FOTOGRAFÍA III - 11



Juego de Tamices.

Ensayo por Cribado (método del lavado)

1.1.4 Procedimiento

- Este método, se usa para el material que pasa el Tamiz N°10, donde también se puede realizar con una representación menor del peso total. Esto quiere decir que se puede usar un peso de 1500 gramos aproximadamente.

- La muestra hay que dejar reposar en agua hasta que esta sature completamente, haciendo que el suelo tenga características de barro o lodo. Generalmente se usa un tiempo cómodo de 24 horas o más, si es que se quiere un tiempo más cortó utilizar 5 horas.
- Sin perder material se introduce la muestra en la malla N°200, Luego con ayuda del agua se puede lavar el suelo, hasta que el agua pasante tome aspectos más claros sin sedimentación.

FOTOGRAFÍA III – 12



FOTOGRAFÍAS III – 13



Material en el tamiz Nro. 200

- Luego el material que se retiene en la malla N° 200, disponer dentro de un recipiente para realizar un secado del suelo y proceder a re-tamizar por las mallas N°40 y N°200.
- Pesar el material retenido en cada malla dispuesta para el fino.
- De la misma manera se tiene que corregir los porcentajes que pasan de acuerdo a la fórmula mencionada en el párrafo anterior

FOTOGRAFÍA III – 14



Tamizado de la Muestra

FOTOGRAFÍA III – 15



Pesado de la muestra

1.1.5 Cálculos

Una vez que se obtienen los pesos retenidos en cada malla disponer los datos en la planilla anexa a esta guía, de tal forma que se puedan realizar los respectivos cálculos.

- Toda Granulometría debe tener un cálculo de la humedad higroscópica, en donde se obtendrá el peso seco que servirá de base para los cálculos.
- Calcular el peso acumulado de los pesos retenidos.
- Calcular el porcentaje acumulado tomando como referencia el peso total de la muestra usada multiplicada por su peso acumulado dividido por 100.
- Luego invertir los porcentajes retenidos y transformarlos en porcentajes pasantes, para esto se debe restar al 100% cada porcentaje retenido acumulado, anotar en su respectiva columna.

- Para el material que pasa el tamiz N°10, se realizan los mismos cálculos.
- Si es que se tomó un peso menor del material que pasa el tamiz N° 10, se debe realizar un ajuste al peso total introduciendo en la planilla una columna del % que pasa del Total.
- Al dibujar la Curva Granulométrica, tiene que ser a escala logarítmica donde las abscisas corresponden al tamaño de las partículas y las ordenadas a los porcentajes que pasan.
- Determinar los coeficientes de uniformidad y el coeficiente de curvatura.

▶ Límites de Consistencia

1.2.1 Objetivo

Determinación de los límites de consistencia de los suelos que se expresan en porcentaje del contenido de humedad del suelo.

1.2.2 Equipo Utilizado

EQUIPO COMÚN.

- Tamiz N° 40
- Horno Secador 105 a 110°C.
- Balanza de precisión de 0.01 gr.
- Platos u otros recipientes.

LÍMITE LÍQUIDO.

- Equipo de Casagrande.
- Ranurador.
- Espátula.
- 5 taras pequeñas.

LÍMITE PLÁSTICO.

- 3 Taras pequeñas.
- Base de vidrio.

FOTOGRAFÍA III – 16



FOTOGRAFÍAS III – 17



Equipo Utilizado

1.2.3 Procedimiento de Laboratorio

Límite Líquido

- Tamizamos el suelo por el tamiz N.40 lo colocamos en un plato le agregamos agua y homogenizamos la mezcla hasta formar una pasta suave teniendo cuenta eliminar todo el aire atrapado en las partículas de suelo.

FOTOGRAFÍA III – 18



Límite Líquido

- Ubicamos el aparato de Casagrande en una superficie plana, segura y limpia.
- Calibramos la altura de caída de la copa, haciendo que la misma tenga un centímetro de caída, la medición se las realizó con el mismo ranurador del equipo que se encuentra acondicionado para tal efecto.
- Pesamos cinco cápsulas vacías y limpias, anotando los pesos de cada cápsula con su respectiva identificación en la planilla de Límite Líquido.
- Con la espátula poner la muestra suavemente y tratando siempre que sea de manera horizontal, sobre la copa de Casagrande (esta debe estar siempre en su nivel inferior

de reposo), eliminando el aire entrampado y limpiando aquella muestra que se encuentre pegada en los alrededores de la copa.

FOTOGRAFÍA III – 19



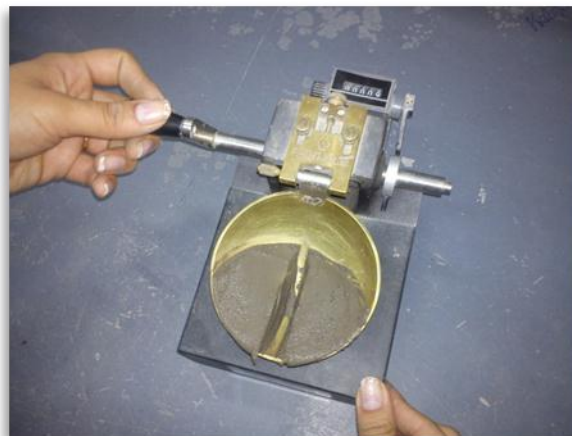
FOTOGRAFÍAS III – 20



Colocado de la muestra al equipo

- Una vez que la muestra se encuentre horizontal y el vaso limpio de otras impurezas, sujetar con una mano la copa de Casagrande y con la otra realizar la ranura de manera firme en una sola pasada, tratando de que en el fondo de la ranura se encuentre visible el color de la copa a lo largo de toda la muestra.

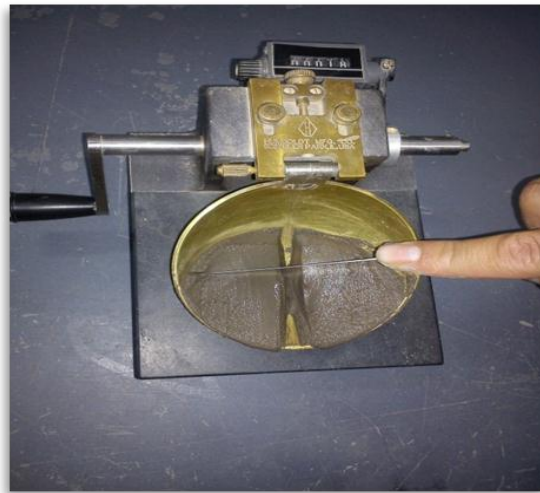
FOTOGRAFÍA III – 21



Procedimiento para el límite líquido

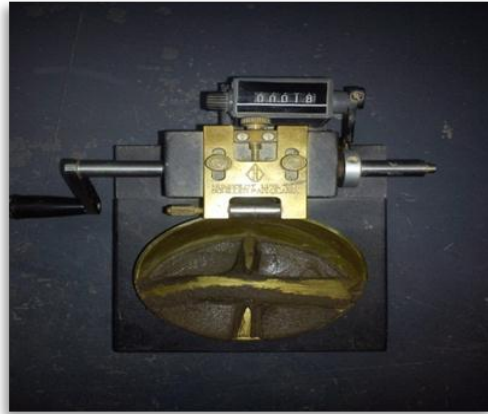
- Una vez realizada la ranura, accionamos la copa de Casagrande, al ritmo de dos golpes por segundo, no perdiendo la cuenta del número de golpes accionado hasta que en la ranura se produzca una unión de aproximadamente 1.27 cm, el ancho de la espátula tiene este valor. Anotamos el número de golpes en la planilla.

FOTOGRAFÍA III – 22



Proceso de sacado de la muestra

- Con la espátula y en forma perpendicular a la ranura, realizamos dos cortes a la muestra, estos deben pasar por los extremos de la parte que se unió. Luego extraemos la porción de suelo entre los cortes y procedemos a depositarla en una de las cápsulas que ya se encuentran pesadas e identificadas.

FOTOGRAFÍA III – 23**Toma de la muestra**

- Pesar el suelo húmedo más cápsula, registrar el dato en la planilla correspondiente al número de golpes anotado.

FOTOGRAFÍA III – 24**Espécimen en las cápsulas**

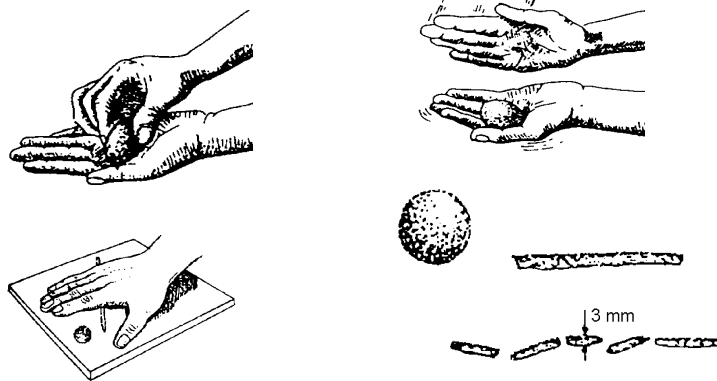
- Introducimos la cápsula más muestra húmeda en el horno, dejamos calentar a una temperatura de 100 a 105 °C, durante 24 horas, luego extraemos del horno y pesamos la cápsula más muestra seca, registramos en la planilla.

- Con estos valores se pueden calcular los diferentes contenidos de humedad a sus respectivos números de golpes y llenamos la planilla del límite líquido.

Límite Plástico

- A la muestra preparada con agua, le agregamos material seco que pase por el tamiz N° 40, y mezclar homogéneamente, hasta que la misma adquiere una consistencia más plástica.
- Disponemos el vidrio sobre la superficie plana y limpia (el vidrio debe estar limpio y seco).
- Pesamos tres cápsulas limpias y las identificamos (peso de cápsula), registramos en la planilla de límite plástico.
- Agarramos con las manos una porción de material y se procede a amasarlo, hasta que el mismo pueda ser manipulado plásticamente.
- Se hace una pelotita de material, para luego transformarlo en un pequeño rollito, rodándolo sobre el vidrio, hasta que el mismo tenga un diámetro aproximado de tres milímetros (3mm), observar si el rollito presenta pequeñas rajaduras en ese diámetro.
- En el caso de que no presente las rajaduras a los tres milímetros, quiere decir que el suelo todavía tiene mucha humedad, entonces volvemos a manipular el rollito en la mano para que siga perdiendo humedad y comenzar de nuevo el proceso.

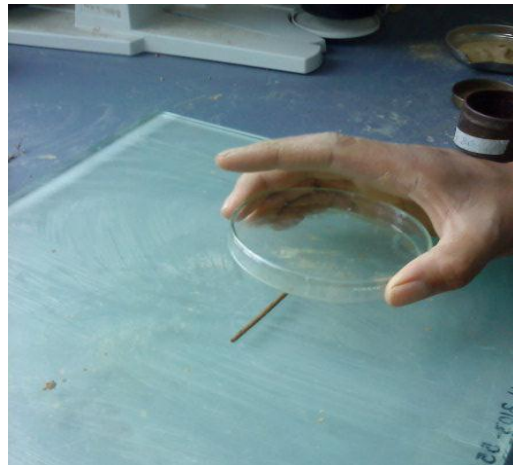
FIGURA III – 1



FOTOGRAFÍA III – 25



FOTOGRAFÍA III - 26



Amasado de la muestra

- Una vez que el rollito a los tres milímetros, presente los agrietamientos buscados, quiere decir que se encuentra con la humedad del límite plástico.
- Con la espátula cortar pequeños trocitos del material y seleccionando aquellos que se encuentren con las rajaduras, luego introducir.

1.2.4. Cálculos

- Con los pesos obtenidos de la prueba se procede a calcular el contenido de humedad correspondiente a los números de golpes.

$$\%w = \frac{P_w}{P_{ss}} * 100 \quad 2,7$$

Dónde:

%w = Porcentaje de humedad.

Pw = Peso del agua.

Pss = Peso de suelo seco

- Conocido ya el contenido de humedad para cada número de golpes se dibuja una curva de flujo en escala semilogarítmica, de modo que los contenidos de humedad se dibujen en las ordenadas en escala aritmética y el número de golpes en el eje de las abscisas en escala logarítmica
- Entramos a la curva con el número de golpes igual a 25 e interceptamos a la curva, el correspondiente a este contenido de humedad será el límite líquido.
- Para el límite plástico se usa la misma ecuación con la que encontramos el contenido de humedad posteriormente sacamos un promedio de los 3 puntos el resultado será el límite plástico.

► Contenido de Humedad

1.3.1 Introducción

La humedad a simple vista en un suelo cualquiera no la podemos visualizar siempre está presente. Es un requisito indispensable en esta práctica y en una serie de obras de ingeniería el hallar en que porcentaje conforma la masa del suelo con el que se trabaja. Una muestra de suelo tiene vacíos llenos de aire y otros con agua. En esta práctica nos avocaremos a los vacíos contenidos por el agua.

1.3.2 Objetivo General

► Determinar el contenido de humedad de una muestra de suelo.

1.3.3 Fundamentación teórica.

El concepto de humedades en los suelos, se define como la cantidad de agua que se encuentra dentro de una muestra de suelo y se expresa en porcentaje.

$$w(\%) = \frac{P_a}{P_{SS}} * 100$$

1-a

Dónde:

W = Contenido de humedad, en por ciento.

P_a = Peso del agua presente en el suelo.

Pss = Peso del suelo después de secado al horno.

Dentro del suelo, el agua se presenta en dos formas; libre y retenida.

- **El agua libre.**-Es el agua que circula a través del suelo sin dificultad alguna y por la acción de la gravedad puede ser drenada.
- **El agua retenida.**-Se encuentra retenida dentro del suelo y la causa de su formación se define:
- **Agua Higroscópica.**- Es la que absorbe un suelo de la humedad del aire.
- **Agua Capilar.**- Es la retenida por efecto de la tensión superficial.

La muestra que se tome para la determinación de la humedad deberá ser representativa del suelo cuya humedad se desea conocer. Si dicha muestra de humedad va a ser tomada en el campo y transportada al laboratorio para hacer la determinación correspondiente, deberá colocarse en un recipiente que tenga una tapa metálica o en otro que tenga la capacidad de poder conservar la humedad.

La determinación de la humedad dependerá del tamaño máximo del agregado, por lo que se recomienda lo siguiente.

- a) Para muestras de suelo de agregado máximo de 2", se deberá tomar aproximadamente un (1) kilogramo y las pesadas deberán hacerse en la balanza de 0.1 gr de aproximación.
- b) Para el material que pase la malla N°4, la muestra deberá pesar aproximadamente ochenta (80) gramos y se utilizará una balanza de 0.01 de gramo de aproximación.

Estas cantidades en dependencia del ensayo que se realice pueden ser variadas de acuerdo a su funcionalidad.

1.3.4 Equipo.

- Recipientes para humedad (taras de lata con tapa)
- Balanza de precisión de 0.01 gr
- Balanza de precisión de 0.1 gr.
- Horno con regulador de temperatura (105 a 110°C)
- Calentador eléctrico o de llama abierta.
- Alcohol blanco.
- Espátula.

1.3.5 Procedimiento.

Es necesario entender que a un suelo húmedo se le debe aplicar calor a temperaturas que superen los 100 °C, para que se garantice que el agua que se encuentra dentro del suelo, se evapore secándolo.

Actualmente se utilizan varios métodos para calcular el contenido de humedad, teniendo resultados variados, pero es preciso definir que el primero de los métodos que mencionaremos a continuación es el estandarizado, por lo que los demás deberían considerar al mismo como base de una posible calibración o corrección.

Se considerarán tres muestras del mismo suelo iguales en peso y se determinarán sus humedades de acuerdo a los siguientes criterios.

1.3.6 Métodos Estandarizados.

MÉTODO DEL HORNO

FOTOGRAFÍA III – 27



FOTOGRAFÍA III - 28



Muestras dentro del Horno

- Se pesarán las cápsulas (P.cap), registrando dichos datos en la planilla de contenido de humedad, cabe hacer notar que deben identificarse las cápsulas ya sea con números o letras.
- Se llenarán las cápsulas con el suelo (Psh + Cap), registrando el peso de suelo húmedo más cápsula.
- Introducir las Cápsulas con suelo al horno durante 24 horas, a una temperatura de 105 o 110°C.
- Extraer del horno y pesar, registrando el valor obtenido de peso de suelo seco más cápsula (Pss. + Pcap.), si es que se encuentran muy calientes o si se demora el pesaje, hay que tener las cápsulas cubiertas de manera que no absorba humedad de la atmósfera dentro del laboratorio.

1.3.7 Métodos no Standarizados.

A continuación se refieren métodos rápidos, usualmente usados en obra, aunque no se encuentran estandarizados, pero con una adecuada calibración y determinación de factores de seguridad en los laboratorios, los mismos nos sirven para dar una estimación de la humedad en los suelos.

MÉTODO DE HORNALLA:

FOTOGRAFÍA III – 29



Muestra de suelo sobre la Hornalla

- Es un método rápido y sencillo, pero que hay necesidad de realizar una corrección respecto del método estándar.
- Se sigue el mismo procedimiento del estandarizado, con la excepción de que **el calor** es generado por un calentador de laboratorio o una hornalla de llama abierta en un lapso mínimo de 30 minutos.
- La cápsula con el suelo húmedo se coloca sobre del calentador, esperando que se sobrecaliente, se estima que el material está seco cuando se instala un vidrio

de reloj sobre la cápsula y este no forma vapor de humedad, si no se cuenta con el vidrio esperar los treinta minutos o más.

- Luego se procede al peso de la muestra seca más cápsula.

MÉTODO DE ALCOHOL:

FOTOGRAFÍA III – 30



Muestra de suelo con Alcohol

- Se pesarán las cápsulas o recipientes más el suelo húmedo.
- Agregar alcohol blanco en una cantidad necesaria para saturar completamente el suelo, luego prender fuego hasta que el alcohol termine de combustionarse, por lo menos repetir dos veces esta prueba.
- Pesar el suelo seco más cápsula para registrarlo.

1.3.8 Cálculos.

Los cálculos están divididos en dos partes:

- La fórmula principal $(1 - a)$, es prácticamente la que nos determina el cálculo del contenido de humedad. Pero para facilitar los pasos que se mencionaron en el procedimiento se propone la planilla adjunta al final de este ensayo.
- Una vez que se hayan determinado las humedades por las tres formas descritas, calcular las siguientes diferencias, para estimar posibles factores de corrección.

$$Fc1 = wA - wB$$

$$Fc2 = wA - wC$$

$$Fc3 = wA - wD$$

Es recomendable que los porcentajes de los factores de corrección deben ser estudiados con una buena base de datos, con el fin de calcular los respectivos promedios.

2. PESO ESPECÍFICO

2.1 Objetivo.

El objetivo principal del ensayo es aprender la metodología para obtener el peso específico relativo de un suelo utilizando las magnitudes de la formula principal.

2.2 Fundamentación teórica.

El peso específico relativo de los sólidos de un suelo se determina en laboratorio haciendo uso de un frasco con marca de enrase. El peso específico se determina mediante la siguiente formula.

$$\gamma = \frac{W_s}{W_{fw} + W_s + W_{fsw}}$$

Dónde:

γ = Peso específico relativo de un suelo

W_s = Peso del suelo seco

W_{fw} = Peso del Frasco lleno de agua

W_{fsw} = Peso del frasco con suelo y agua

Todas las magnitudes son mensurables en Laboratorio. El peso del frasco lleno de agua hasta el enrase es función de la temperatura de prueba, este valor generalmente se extrae de la curva de calibración.

El peso del suelo seco se determina antes de la prueba en materiales gruesos y después de ella en suelos finos plásticos, la razón es que si los suelos arcillosos son secados antes de la prueba estos pueden formar grumos y dentro ellos crear vacíos de aire.

Luego de calculados los pesos específicos a veces se tiene la necesidad de ajustar estos datos a una temperatura patrón de 20°C, cuya densidad de agua es 0.99791

2.3 Procedimiento.

2.3.1 Limpieza de Frasco Volumétrico

- Se lava el frasco con agua jabonosa, luego se enjuaga con agua hasta eliminar el jabón.
- Seguidamente se enjuaga con alcohol para eliminar los restos de agua, si es posible después enjuagar con éter sulfúrico y para evaporar los vapores del éter poner el frasco boca abajo.

2.3.2 Método en suelos arcillosos.

- Pesar 80 gramos de suelo húmedo.
- Colocar el suelo en un plato, añadir agua y mezclar hasta formar una pasta suave.
- Colocar dentro del frasco la pasta y batir hasta que se forme una suspensión uniforme.

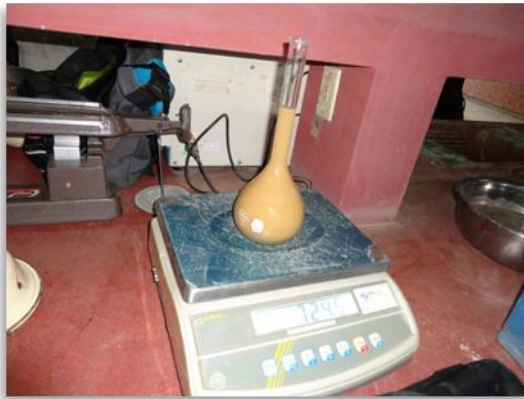
FOTOGRAFÍA III – 31



Espécimen dentro del frasco

- Luego se introduce la muestra con mucho cuidado en un frasco previamente calibrado y llenar este con agua hasta la mitad.
- Se tiene que extraer todo el aire atrapado dentro de los suelos, para esto se debe rolar el frasco con mucho cuidado.
- Someter el frasco de agua con suelo a efectos de temperatura dentro de un baño María, hasta que alcance una temperatura de 40°C.
- Llenar el frasco con agua a temperatura ambiente hasta que la parte inferior del menisco coincida con la marca de enrase.
- Pesar el frasco y luego medir la temperatura en el centro del frasco volumétrico.

FOTOGRAFÍA III – 32



Proceso de pesaje

- Someter a un enfriamiento el frasco para repetir el proceso unas cinco veces a diferentes temperaturas.

FOTOGRAFÍA III – 33**Proceso de enfriamiento**

- Una vez obtenidos los tres puntos de pesos específicos hay que vaciar el contenido del frasco dentro de un plato para introducir al horno y obtener el peso del suelo seco.

2.4 Cálculos.

- Se tiene que hacer uso de la fórmula principal, cuyas unidades son mensurables en el laboratorio.
- Llenar las planillas adjuntas del peso específico a diferentes temperaturas, para calcular sus respectivos pesos específicos.
- Calcular un promedio de los tres pesos específicos.

3. Cohesión del Suelo y Ángulo de Fricción Interna.

3.1 Introducción:

La resistencia al corte se define como el máximo valor de esfuerzo cortante que el suelo puede soportar.

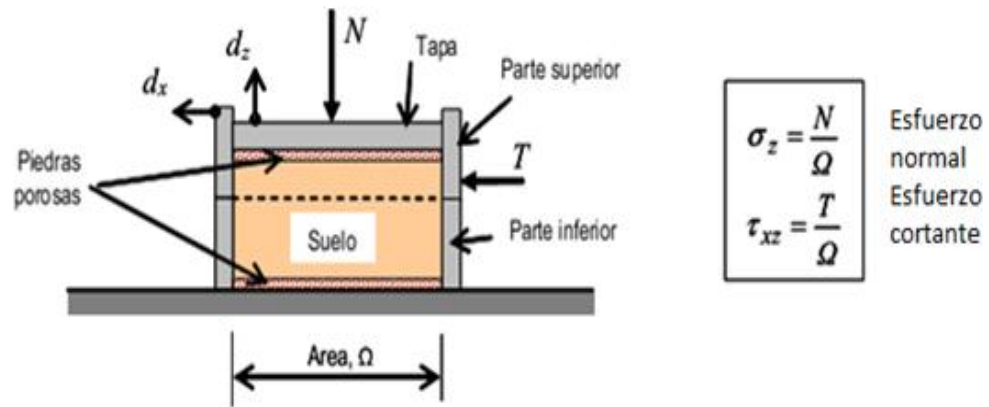
La estabilidad de un talud no puede analizarse sin un conocimiento apropiado de los valores de resistencia al corte independientemente del método de análisis que se utilice.

Existen varios ensayos de laboratorio para medir la resistencia y deformabilidad de suelos. Puesto que el modo fundamental de rotura es por esfuerzos de corte, el objetivo fundamental es hacer actuar esfuerzos tangenciales sobre la probeta. Hay dos tipos de ensayos:

3.2 Ensayos de corte directo: Sobre la tapa se aplica una carga vertical que, repartida en el área de la probeta, supone una tensión normal σ_z . A continuación, se aplica una carga horizontal, que supone una tensión tangencial τ_{xz} , de forma que se produzca el deslizamiento entre las dos partes de la muestra (para ello es indiferente que la parte inferior sea fija y la superior móvil, o viceversa, habiendo aparatos de los dos tipos). Durante el ensayo se miden los desplazamientos relativos (horizontal, dx , y vertical, dz) entre las dos mitades de la muestra (FIGURA.1.a).

El objetivo del ensayo es mantener constante la tensión normal, y aumentar la tangencial hasta rotura. Por ello, la carga vertical suele aplicarse mediante sistemas de tensión controlada (lo más usual es mediante pesas). En cambio, para la tensión tangencial es más conveniente aplicarla como deformación controlada, haciendo deslizar la probeta a una velocidad constante, mediante un gato de empuje, y medir la carga horizontal que se aplica en cada momento.

FIGURA III – 2



(1.a) Disposición de la Muestra, Fuerza y Desplazamiento

FOTOGRAFÍA III – 34



Ensayo de Corte Directo

FOTOGRAFÍA III – 35



Preparación de los Especímenes

FOTOGRAFÍAS III – 36



Especímenes después de la Prueba

FOTOGRAFÍA III – 37



Toma de datos del ensayo

Estos esfuerzos se calculan dividiendo las respectivas fuerzas por el área ($\Omega \Omega$) de la muestra o de la caja de corte y deberían satisfacer la ecuación de Coulomb:

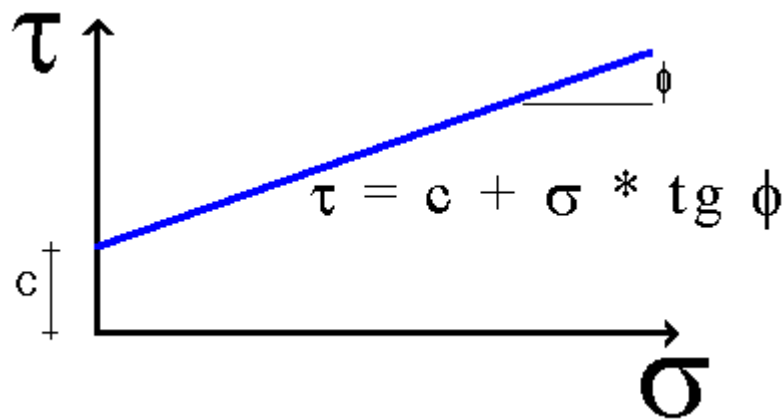
$$\tau = c + \sigma_n * \tan \phi$$

Según esta ecuación la resistencia al corte depende de la cohesión (c) y la fricción interna del suelo ($\phi \phi$).

Al aplicar la fuerza horizontal, se van midiendo las deformaciones y con estos valores es posible graficar la tensión de corte (τ), en función de la deformación (ϵ) en el plano de esta tensión de corte. De la gráfica es posible tomar el punto máximo de tensión de corte como la resistencia al corte del suelo.

Los valores de τ se llevan a un gráfico en función del esfuerzo normal (σ_n), obteniendo la recta intrínseca (FIGURA.2), donde τ va como ordenada y σ_n como abscisa. El ángulo que forma esta recta con el eje horizontal es el ángulo ϕ y el intercepto con el eje τ , la cohesión c .

FIGURA III – 3



(FIG-2) Recta Intrínseca

Los ensayos de corte directo en laboratorio se pueden clasificar en tres tipos según exista drenaje y/o consolidación de la muestra, por lo tanto los valores de c y ϕ dependen esencialmente de la velocidad del ensayo y de la permeabilidad del suelo. (Salas, 1975).

- **Ensayos con drenaje (D)**, realizables en todo tipo de suelos, con las precauciones comentadas sobre la velocidad de carga e inundación de muestra para suelos finos.
- **Ensayos consolidados-sin drenaje (C-U)**, en los que la carga normal se aplica con drenaje, esperando el tiempo preciso para la consolidación, y la tangencial sin drenaje. En este aparato sólo son posibles en suelos relativamente impermeables (arcillas).

- **Ensayos sin drenaje (U)**, en los que tanto la carga normal como la tangencial se aplican sin drenaje. Se trata de ensayos posibles, pero en principio sin sentido práctico, ya que la aplicación de la tensión normal no produce efecto alguno.

4. Resultados de Laboratorio.-

El análisis fue realizado en el laboratorio de suelos de la “UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO”.

Las muestras extraídas del sector de estudio muestra que se trata de un suelo A-6(11) según AASHTO, el material típico de este grupo es una arcilla plástica inorgánica que usualmente tiene el 75% o más del material que pasa el Tamiz N° 200 (36 min); este grupo también incluye mezclas de suelo arcilloso y hasta el 64 % de arena y grava retenida sobre el Tamiz N° 200: CL según la clasificación unificada de suelos (SUSCS).

Registra, una humedad de 5,91, un límite líquido de 26, un límite plástico de 13, índice plástico de 13. Peso específico de $1,84 \text{ T/m}^3$, cohesión de $2,37 \text{ T/m}^2$ y ángulo de fricción de 17° (Ver anexo I).

Luego de la obtención de datos de laboratorio y las características medidas que **son del Pie del Talud** porque es donde puede presentarse la falla, se procedió a hacer uso de los modelos de Ábacos de Taylor y Jambu para encontrar **el Factor de Seguridad**.

3.3.2 Trabajo de Gabinete

De informes recopilados de estudios hechos en el valle central de Tarija, reportan que el mismo está sujeto a procesos de consolidación normal de manera que las arcillas del valle central de Tarija son semejantes y presentan características semejantes, por lo cual los resultados obtenidos de ensayos de laboratorio se adoptarán tomando muy en cuenta los resultados que se obtuvieron en dicho estudio, como clasificación del Suelo, Peso Específico, Cohesión y su Ángulo de Rozamiento Interno.

3.3.2.1 Cálculo de la Altura crítica del Talud

Se consideró importante determinar la altura crítica del talud ya construido en función de la cohesión encontrada de su peso específico, ángulo de rozamiento interno y el ángulo de inclinación del talud.

$$H_c = \frac{4 * C}{\gamma} \sqrt{N * \phi}$$

$$H_c = \frac{4 * C}{\gamma} \tan \left(45 + \frac{\phi}{2} \right)$$

$$H_c = 7,34 \text{ m.}$$

Siendo que la altura crítica de este talud para estas condiciones es igual 7,34 m., se observa que la altura del talud en estudio supera de manera holgada la H_c calculada, por cuanto se presupone que apenas alcance la condición de saturamiento puede llegar a fallar.

Se realizó el cálculo de la inestabilidad del talud para la sección crítica en estudio, para lo cual se necesita definir a priori la superficie potencial de falla pudiendo ser esta: plana o circular.

Las roturas en superficies planas en suelos son prácticamente inexistentes, por lo que esta hipótesis no es útil para el presente estudio, siendo estas superficies más aplicables a taludes rocosos (ya que la presencia de discontinuidades casi paralelas al talud puede definir superficies de rotura planas). El método de la cuña formada por una superficie limitante plana formando un polígono es más aplicable a terraplenes sobre suelos muy blandos y presas, por tanto, tampoco válida para el presente estudio.

La tercera alternativa es considerar una superficie potencial de falla circular que supone que la masa en movimiento es un cilindro de directriz circular, siendo esta hipótesis la que representa mejor el problema real en taludes de altura finita, por lo cual fue adoptada como superficie de falla para el talud en estudio. Además en el caso de suelos de grano fino, cohesivo de igual naturaleza en su mayoría, de manera que pueda considerarse homogéneo, el método utilizado del círculo de deslizamiento es el más adecuado.

Definida la superficie de falla se debe determinar el método de cálculo para determinar la estabilidad del talud, en este caso se utilizarán los modelos de ábacos de Taylor y Jambu.

3.3.2.2 Cálculo de FS mediante Modelos de Ábacos de Taylor

- ◆ Puede determinarse para cualquier ángulo del talud y cualquier profundidad a la base firme, un número de estabilidad adimensional.
- ◆ Con el dato del ángulo de talud se encuentra en el ábaco el número de estabilidad.
- ◆ Entonces, el factor de seguridad de un talud propuesto puede determinarse aproximadamente por:

$$H_c = \frac{N_o * C}{\gamma}$$

$$FS = \frac{H_c}{H}$$

Para un talud de 20°

Con el ángulo del Talud 20° entramos al Modelo de Ábaco de Taylor, obtenemos el Número de Estabilidad (No=9,9), reemplazando el valor en la fórmula de Altura Crítica tenemos (Hc = 14,732) y con lo cual calculamos el FS= 1,403.

Para un talud de 25°

Con el ángulo del Talud 25° entramos al Modelo de Ábaco de Taylor, obtenemos el Número de Estabilidad ($N_o=8,7$), reemplazando el valor en la fórmula de Altura Crítica tenemos ($H_c = 12,946$) y con lo cual calculamos el $FS= 1,233$.

Para un talud de 30°

Con el ángulo del Talud 30° entramos al Modelo de Ábaco de Taylor, obtenemos el Número de Estabilidad ($N_o=7,8$), reemplazando el valor en la fórmula de Altura Crítica tenemos ($H_c = 11,607$) y con lo cual calculamos el $FS= 1,105$.

Para un talud de 35°

Con el ángulo del Talud 35° entramos al Modelo de Ábaco de Taylor, obtenemos el Número de Estabilidad ($N_o=7,2$), reemplazando el valor en la fórmula de Altura Crítica tenemos ($H_c = 10,714$) y con lo cual calculamos el $FS= 1,020$.

Para un talud de 40°

Con el ángulo del Talud 40° entramos al Modelo de Ábaco de Taylor, obtenemos el Número de Estabilidad ($N_o=6,6$), reemplazando el valor en la fórmula de Altura Crítica tenemos ($H_c = 9,821$) y con lo cual calculamos el $FS= 0,935$.

Para un talud de 45°

Con el ángulo del Talud 45° entramos al Modelo de Ábaco de Taylor, obtenemos el Número de Estabilidad ($N_o=6,2$), reemplazando el valor en la fórmula de Altura Crítica tenemos ($H_c = 9,226$) y con lo cual calculamos el $FS= 0,879$.

Para un talud de 50°

Con el ángulo del Talud 50° entramos al Modelo de Ábaco de Taylor, obtenemos el Número de Estabilidad ($N_o=5,8$), reemplazando el valor en la fórmula de Altura Crítica tenemos ($H_c = 8,631$) y con lo cual calculamos el $FS= 0,822$.

Para un talud de 55°

Con el ángulo del Talud 55° entramos al Modelo de Ábaco de Taylor, obtenemos el Número de Estabilidad ($N_o=5,4$), reemplazando el valor en la fórmula de Altura Crítica tenemos ($H_c = 8,036$) y con lo cual calculamos el $FS=0,765$.

Para un talud de 60°

Con el ángulo del Talud 60° entramos al Modelo de Ábaco de Taylor, obtenemos el Número de Estabilidad ($N_o=5,25$), reemplazando el valor en la fórmula de Altura Crítica tenemos ($H_c = 7,813$) y con lo cual calculamos el $FS=0,744$.

Para un talud de 65°

Con el ángulo del Talud 65° entramos al Modelo de Ábaco de Taylor, obtenemos el Número de Estabilidad ($N_o=5,0$), reemplazando el valor en la fórmula de Altura Crítica tenemos ($H_c = 7,44$) y con lo cual calculamos el $FS=0,709$.

TABLA III – 2

TALUD (GRADOS)	No (ábaco)	ALTURA CRÍTICA Hc	FACTOR DE SEGURIDAD FS
20	9,9	14,732	1,403
25	8,7	12,946	1,233
30	7,8	11,607	1,105
35	7,2	10,714	1,020
40	6,6	9,821	0,935
45	6,2	9,226	0,879
50	5,8	8,631	0,822
55	5,4	8,036	0,765
60	5,25	7,813	0,744
65	5	7,440	0,709

Resumen de cálculo de FS por Taylor

3.3.2.3 Cálculo de FS mediante Modelos de Ábacos de Jambu

Para calcular la longitud activa, primero se determina la zona activa, que está delimitada por el círculo de falla, que corresponda al talud. Una vez que se tiene el talud se procede a asumir círculos de falla hasta lograr un círculo de falla según ábacos.

El procedimiento a seguir es el siguiente:

Paso 1. Parámetros que se requieren para el análisis

Paso2. Calcular el factor de profundidad d

Paso 3. Obtener la localización del círculo crítico (Xo, Yo). (FIGURAS II – 14 Y II -15)

Paso 4. Calcular C promedio (Cohesión del suelo)

Paso 5. Calcular el Factor de reducción

Paso 6. Calcular Pd

Paso 7. Calcular el número de estabilidad No

Paso 8. Calcular la cohesión requerida

Paso9. Calcular el factor de seguridad

Obtenidos todos los datos necesarios se procede al remplazo en la fórmula

$$FS = \frac{N_o * C}{P_d}$$

Para un talud de 20°

Con el ángulo del Talud 20° entramos al Modelo de Ábaco de Jambu, obtenemos el Número de Estabilidad ($N_o=9,9$), hallamos ($P_d = 13,513$) y con lo cual calculamos el $FS=1,944$.

Para un talud de 25°

Con el ángulo del Talud 25° entramos al Modelo de Ábaco de Jambu, obtenemos el Número de Estabilidad ($N_o=8,7$), hallamos ($P_d = 13,513$) y con lo cual calculamos el $FS=1,610$.

Para un talud de 30°

Con el ángulo del Talud 30° entramos al Modelo de Ábaco de Jambu, obtenemos el Número de Estabilidad ($N_o=7,8$), hallamos ($P_d = 13,513$) y con lo cual calculamos el $FS=1,444$.

Para un talud de 35°

Con el ángulo del Talud 35° entramos al Modelo de Ábaco de Jambu, obtenemos el Número de Estabilidad ($N_o=7,2$), hallamos ($P_d = 13,513$) y con lo cual calculamos el $FS=1,333$.

Para un talud de 40°

Con el ángulo del Talud 40° entramos al Modelo de Ábaco de Jambu, obtenemos el Número de Estabilidad ($N_o=6,6$), hallamos ($P_d = 13,513$) y con lo cual calculamos el $FS=1,265$.

Para un talud de 45°

Con el ángulo del Talud 45° entramos al Modelo de Ábaco de Jambu, obtenemos el Número de Estabilidad ($N_o=6,2$), hallamos ($P_d = 13,513$) y con lo cual calculamos el $FS=1,148$.

Para un talud de 50°

Con el ángulo del Talud 50° entramos al Modelo de Ábaco de Jambu, obtenemos el Número de Estabilidad ($N_o=5,8$), hallamos ($P_d = 13,513$) y con lo cual calculamos el $FS=1,074$.

Para un talud de 55°

Con el ángulo del Talud 55° entramos al Modelo de Ábaco de Jambu, obtenemos el Número de Estabilidad ($N_o=5,4$), hallamos ($P_d = 13,513$) y con lo cual calculamos el $FS=1,000$.

Para un talud de 60°

Con el ángulo del Talud 60° entramos al Modelo de Ábaco de Jambu, obtenemos el Número de Estabilidad ($N_o=5,25$), hallamos ($P_d = 13,513$) y con lo cual calculamos el $FS=0,972$.

Para un talud de 65°

Con el ángulo del Talud 65° entramos al Modelo de Ábaco de Jambu, obtenemos el Número de Estabilidad ($N_o=5,0$), hallamos ($P_d = 13,513$) y con lo cual calculamos el $FS=0,926$.

TABLA III – 3

TALUD (GRADOS)	No (gráfico)	C	Pd	FS
20	9,9	2,50	13,513	1,944
25	8,7	2,50	13,513	1,610
30	7,8	2,50	13,513	1,444
35	7,2	2,50	13,513	1,330
40	6,6	2,50	13,513	1,265
45	6,2	2,50	13,513	1,148
50	5,8	2,50	13,513	1,074
55	5,4	2,50	13,513	1,000
60	5,25	2,50	13,513	0,972
65	5,0	2,50	13,513	0,926

Resumen de cálculo de FS por Jambu.

3.3.2.4 Comparación entre Modelos Ábacos de Taylor y Jambu

TABLA III – 4

TALUD (GRADOS)	FACTOR DE SEGURIDAD	
	TAYLOR	JAMBU
20	1,403	1,944
25	1,233	1,610
30	1,105	1,444
35	1,020	1,330
40	0,935	1,265
45	0,879	1,148
50	0,822	1,074
55	0,765	1,000
60	0,744	0,972
65	0,709	0,926

Comparación de FS Ábacos de Taylor y Jambu.

3.4 ANÁLISIS UNITARIOS DE COSTOS

3.4.1 ÍTEM: MOVIMIENTO DE TIERRA

Descripción:

Este ítem comprende todos los trabajos de movimiento de tierra para la obtención de la pendiente del talud establecida según cálculos.

Materiales, Herramientas y Equipo:

El contratista suministrará todos los materiales, herramientas, equipo necesario y apropiado de acuerdo a lo requerido.

Clasificación:

De acuerdo a la naturaleza y características del suelo se establece la siguiente clasificación:

- a) Suelo clase I (blando). Material de fácil remoción con pala y poco uso de picota
- b) Suelo clase II (semiduro). Arcillas compactadas o grava consolidada en matriz arcillo-limoso.
- c) Suelo clase III (duro). Roca suelta, conglomerados, areniscas y todos aquellos suelos compactos.

El tipo de terreno que corresponde al talud es b, o sea suelo semiduro.

Procedimiento para la ejecución:

Los movimientos de tierra se efectuarán a cielo abierto y de acuerdo con los alineamientos, pendientes y cotas indicadas en los planos del proyecto y según el reglamento autorizado.

Se resguardarán las estructuras que se hallen próximas al lugar de trabajo y tomará medidas más aconsejables para mantener en forma ininterrumpida los servicios existentes, se evitarán obstrucciones e incomodidades al tránsito peatonal o vehicular.

Módulo: MOVIMIENTO DE TIERRAS (Ver anexo II).

3.5 COMPARACIÓN DE COSTOS

Después de haber realizado el cálculo de FS para diferentes ángulos de inclinación de talud con el fin de encontrar valores mayores a 1.2 que garanticen la estabilidad del talud estudiado se obtuvo por cada método los siguientes:

3.51 MEDIANTE LOS MODELOS DE ÁBACOS DE TAYLOR:

$$\text{FS} = 1.233$$

$$\text{Longitud del Talud} = 100 \text{ m.}$$

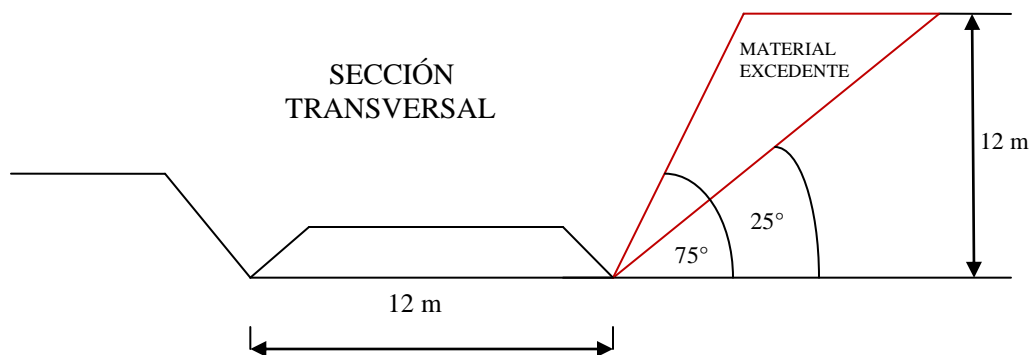
$$\text{Ángulo de inclinación de talud} = 25 \text{ grados.}$$

$$\text{Área} = 185,50 \text{ m}^2$$

$$\text{Volumen} = (185,50 * 100) \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen} = 18550.00 \text{ m}^3$$

FIGURA III -4



Determinación de volúmenes Modelos de Ábacos Taylor

TABLA III - 5

MODELOS DE ÁBACOS DE TAYLOR					
ITEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	P. UNITARIO	P. TOTAL Bs.
1	MOVIMIENTO DE TIERRA	M3	18550,00	32,00	593600,00

Presupuesto Modelos de Ábacos de Taylor

3.5.2 MEDIANTE LOS MODELOS DE ÁBACOS DE JAMBU:

$$FS = 1,265$$

$$\text{Longitud del Talud} = 100 \text{ m.}$$

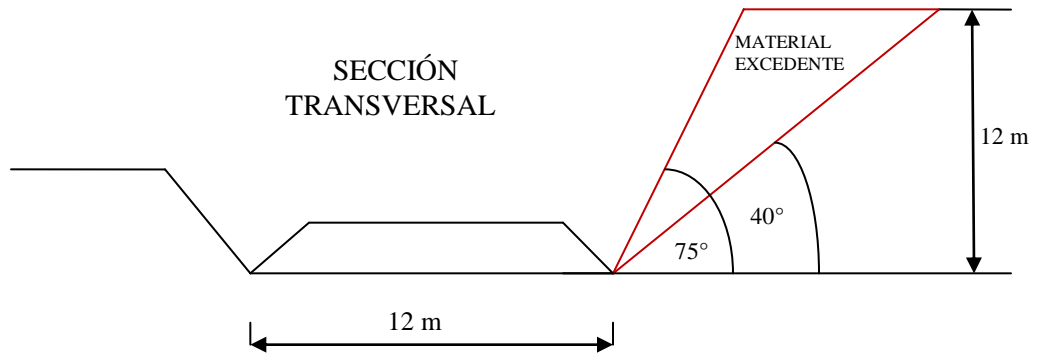
$$\text{Ángulo de inclinación de talud} = 40 \text{ grados.}$$

$$\text{Área} = 75,10 \text{ m}^2$$

$$\text{Volumen} = (75,10 * 100) \text{ 3m}$$

$$\text{Volumen} = 7510,00 \text{ m}^3$$

FIGURA III – 5



Determinación de volúmenes Modelos de Ábacos Jambu.

TABLA III – 6

MEDIANTE LOS MODELOS DE ÁBACOS DE JAMBU

MODELOS DE ÁBACOS DE JAMBU					
ITEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	P. UNITARIO	P. TOTAL Bs.
1	MOVIMIENTO DE TIERRA	M3	7510,00	32,00	240320,00

Presupuesto por el Modelo de Ábacos de Jambu.

Según el análisis realizado anteriormente se obtiene mayor área con el talud calculado con el método de Taylor (18550,00 m³) por lo tanto el volumen de tierra que debe ser removida es mayor a la obtenida del análisis por el modelo de Jambu (7510,00 m³).

Esta diferencia de volumen económicamente representa 353280,00 Bs. más con el talud calculado con el método de Taylor en comparación con el costo del movimiento de tierra calculado por el método de Jambu.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. CONCLUSIONES

El trabajo realizado en la zona permite obtener las siguientes conclusiones:

- El estudio ha permitido disponer de un modelo efectivo para determinar la estabilidad de los taludes y de esta manera conseguir una mayor garantía para la correcta elaboración y ejecución de los proyectos donde se presenten taludes.
- El Factor Seguridad de la estabilidad del talud ha sido evaluado con Modelos de Ábacos de Taylor y Jambu, modelos que han dado resultados diferenciados $FS = 1,233$ y $FS = 1,265$ respectivamente.
- Estos Modelos de Ábacos no son los más precisos, sin embargo, el más utilizado por su facilidad de cálculo y en especial por que toma en cuenta más características del talud es el de Jambu, en relación al de Taylor que debido a los ábacos no permite introducir muchos datos del talud.
- Los factores más importantes que influyen en la estabilidad del talud, son las condiciones geométricas del talud y las condiciones del suelo del talud representada por su ángulo de fricción y la cohesión del suelo.
- Existe una variabilidad significativa entre los modelos de estabilidad de taludes estudiados, un hecho importante puede ser que los métodos tienen como base de cálculo los factores de resistencia que son el ángulo de fricción y la cohesión, valores éstos que en cada modelo no tienen la misma influencia numérica.
- Después de un análisis técnico económico se puede concluir mencionando que el Método de Jambu brinda resultados técnicamente más apropiados para el cálculo del Factor de Seguridad por las consideraciones que tiene en su análisis y económicamente tiene menor costo, tomando en cuenta que el movimiento de tierra para este método es menor con un volumen igual a $V = 7510,00 \text{ m}^3$,

comparado con el resultado de Taylor que arroja un volumen de $V=1850,00 \text{ m}^3$.

- El talud ubicado en la Avenida de la Integración, se encuentra estable en período seco del año, y por el contrario, pasa a un estado de inestabilidad en la época de lluvias, debido al tipo de material que se tiene.
- La elección de un modelo para determinar la estabilidad de los taludes depende mayormente de la facilidad con que se obtienen los parámetros de entrada, el proceso metodológico y el grado de confiabilidad de los resultados.

4.2 RECOMENDACIONES

- Ⓢ En un estudio de taludes, se recomienda tomar varias muestras de material del que está compuesto un talud, es decir de distintos lugares, no solo a lo largo, sino también a lo alto, para poder analizar si es un talud homogéneo, ya que de esto depende la metodología de análisis.
- Ⓢ Es muy importante la extracción de muestras del lugar en estudio, su recolección y manipulación ya que de estos depende todo el análisis y la confiabilidad del cálculo de la estabilidad del talud.
- Ⓢ Se recomienda utilizar el modelo de ábacos de Jambu en estudio de estabilización de taludes que presenten características similares, por cuanto proporcionan resultados favorables tanto técnico, económico y ambiental.