

# CAPÍTULO I

## ASPECTOS GENERALES

### 1. INTRODUCCIÓN.

Debido a que todos los cuerpos tienden a buscar estabilidad, la superficie terrestre presenta una serie de movimientos de masas llamadas deslizamientos de taludes y lo realiza bajo una superficie de rotura. En cualquier terreno que no sea horizontal existen una serie de fuerzas que tienden a nivelarlo: fuerzas de gravedad, filtración, presión del agua etc. Se oponen a ello la resistencia del terreno, raíces y otras. Cuando el primer grupo de fuerzas predomina sobre el segundo, el talud se hace inestable.

Debido a que en la carretera de Tarija bermejo presenta características hidrográficas, geográficas, climáticas complejas así como diversidad de diferentes eventos como de inestabilidad en los taludes lo cual afectan la normal circulación de las movilidades.

En las inestabilidades de suelos vienen adjuntados a los deslizamientos de masas en las que están involucrados diferentes factores como la estabilidad de taludes los cuales tienen que ver como los tipos de movimiento, velocidades, modos de falla, materiales y definiciones geológicas.

Actualmente las inestabilidades son objeto de estudio por diferentes autores y empresas quienes vienen desarrollando métodos de estabilización haciendo uso de materiales, en lo posibles de menor costo pero de mayor calidad.

El contenido del siguiente trabajo de aplicación práctica tiene por finalidad realizar un análisis de la estabilidad en taludes de los suelos residuales en el tramo Mamora-Emborozu. Lo cual recopila una serie de elementos, parámetros e información necesaria, empleando como mecanismo metodológico el uso de sistemas de información bibliográfica que generen herramientas básicas para

gestionar y planificar problemáticas que de ello se deriven y en base a este análisis de estabilidad de taludes se pretende establecer soluciones para los problemas de este tramo específico.

Con la elaboración de este trabajo se pretende realizar un análisis de estudio de los taludes identificados con suelo residual ver sus propiedades y comportamientos que pueda tener el suelo en la área seleccionada de estudio.

Con este estudio de aplicación se pretende dejar este trabajo en la biblioteca de nuestra Universidad para que sirvan como base o fundamento en la toma de decisiones de soluciones a diversas problemáticas relacionadas con el análisis de estabilidad de taludes de suelos residuales en nuestro medio.

Este estudio igualmente tiene relevancia para comprender lo que sucede en el dicho tramo de estudio, ya que permitirá conocer el análisis de estabilidad de los suelos.

## **1.2.- JUSTIFICACIÓN**

El presente trabajo de aplicación se realizara porqué es de gran importancia realizar un análisis de la estabilidad de los suelos residuales en los taludes.

El presente trabajo de aplicación se realizara debido a la existencia de problemas de inestabilidad en taludes. Ya que provocan fallas de corte en los suelos y estos en ocasiones han producido la obstrucción y destrucción de tramos de las vías de comunicación, por ejemplo ocasionando un riesgo para las personas y un grave perjuicio económico.

Lo que se observa es la falta de estudios y conocimiento de la estabilidad de suelos residuales en nuestro medio.

Con base en lo anterior, se ha considerado necesario, realizar un análisis del estudio de los suelos residuales en este tramo que exponga las ventajas y desventajas del estudio y que dé como alternativa un análisis de este tipo de suelos en taludes en el

tramo, aportando significativamente a la solución de los problemas de estabilidad en taludes de vías.

Los problemas de inestabilidad de taludes a lo largo de la carretera elegida son numerosos. Hay varias causas fundamentales para los problemas de estabilidad de taludes, entre estas causas se pueden enumerar: (1) la presencia de taludes en corte demasiado empinados para la cohesión o ángulo de reposo de los materiales que los componen; (2) la falta de implementación de medidas de estabilización durante la construcción de la vía; (3) pérdida de la capa superficial de vegetación durante construcción; (4) existencia de zonas de roca altamente meteorizada y de suelos residuales históricamente inestables; y (5) erosión progresiva desde la parte inferior de estructuras de drenaje hacia la mesa de la vía.

La falta de en la ejecución de los estudios necesarios para garantizar la estabilidad de las obras de contención y taludes, sumados a la no aceptación de las recomendaciones hechas en dichos estudios hacen que existan peligros. Por lo cual en este estudio evaluaremos y analizaremos la estabilidad en taludes de suelos residuales, dando alternativas de solución pero siempre velando por la seguridad y estabilidad de los taludes.

### **1.3.-DISEÑO TEÓRICO:**

#### **1.3.1.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

##### **1.3.1.1.- Situación problemática.**

El problema planteado en el presente trabajo es que en la práctica dentro del mantenimiento de vías de comunicación es fundamental el conocimiento de la estabilidad de los suelos en los taludes para que se pueda realizar una prevención adecuada para que no exista un deslizamiento, sin embargo en contraposición no siempre es posible detectar oportunamente estos problemas que se suscitan en las carreteras.

Determinar el efecto de los suelos residuales que se tiene en los taludes de la carretera de Tarija bermejo en el tramo Mamora-Emborozu.

La necesidad de evaluar la estabilidad de taludes en los suelos residuales en la carretera de Tarija bermejo en el tramo Mamora-Emborozu.

Será que con el estudio de ensayos de corte directo se evaluara su cohesión y fricción de los suelos residuales del tramo anterior ya mencionado.

El debilitamiento de los suelos es por influencia del agua superficial y subterráneo ocasionando pérdida de adherencia y un deslizamiento de los suelos.

#### **1.3.1.2.- Problema.**

Realizando un análisis de estabilidad de taludes de suelos residuales ¿se podrá dar solución de prevención para evitar efectos de deslizamientos que perjudican la normal circulación de los vehículos en la carretera del tramo Mamora-Emborozu?

#### **1.3.2.- OBJETIVOS:**

Los objetivos que se quiere lograr con la elaboración del presente trabajo de aplicación práctica se pueden mencionar los siguientes:

##### **1.3.2.1.- GENERAL:**

- ✓ Realizar un análisis de estabilidad en taludes cuya característica común sea su composición como suelo residual dentro el tramo La Mamora-Emborozu a objeto de obtener sus características propiedades para que en función a ellas se busquen las soluciones más adecuadas.

##### **1.3.2.2.- ESPECIFICOS:**

- ✓ Identificar los lugares puntuales donde se presente a taludes con suelo residual en el tramo La Mamora-Emborozu.
- ✓ Recopilar la información necesaria para el estudio.

- ✓ Determinar los parámetros residuales de corte en taludes y laderas fallados.
- ✓ Establecer los factores y causas en los taludes.
- ✓ Realizar los ensayos de caracterización de materiales residuales para obtener sus características geotécnicas.
- ✓ Establecer a partir del análisis si es necesario las acciones recomendables para prevención de estabilidad de taludes con presencia de suelos residuales en el tramo de estudio.
- ✓ En función al desarrollo del trabajo y los resultados que se obtendrán en la aplicación práctica establecer conclusiones y recomendaciones.

#### **1.4.- DISEÑO METODOLÓGICO.-**

##### **1.4.1.- UNIDAD DE ESTUDIO.-**

Los taludes con suelos residuales en la carretera del tramo la Mamora-Emborozu.

##### **POBLACIÓN.-**

Diferentes partes del tramo la Mamora-Emborozu que presentan estos taludes de suelos residuales.

##### **MUESTRA.**

Una vez ubicado un número de 4 taludes y cada talud se analizara (a pie, cabeceras y en cuerpo) procederemos a la extracción de muestras de suelos residuales para su estudio en laboratorio de suelos.

##### **MUESTREO.**

De la población de los taludes en el tramo por inspección visual se identificara 4 taludes cuya componente principal son suelos residuales.

##### **1.4.2.- MÉTODOS Y TÉCNICAS EMPLEADAS.-**

**MÉTODOS.-** Para el desarrollo del presente trabajo de aplicación práctica se utilizaron el método experimental, el método inductivo.

Ya que el presente trabajo se buscara a la realización de ensayos de corte directo para determinar su cohesión y fricción del suelo y luego su caracterización de los materiales en los ensayos de (Granulometría) y limites e identificados como material residual para obtener sus características geotécnicas.

**TÉCNICAS.-** Se utilizaron la técnica de observación, la técnica de evaluación la técnica de investigación bibliográfica.

**MEDIOS.-** los instrumentos que se necesitaran:

Equipo de estación total, instrumento para densidad de in situ, instrumento para el ensayo de corte directo, Bolsas, pala, picota, barreno, juego de tamices, caza grande, vidrio, taras, bandejas y balanza.

#### **1.4.3.- PROCEDIMIENTO PARA EL ANÁLISIS Y LA INTERPRETACIÓN DE LA INFORMACIÓN.**

##### **Probabilístico.-**

Al contar con datos de diferentes puntos de observación los mismos serán analizados con una metodología de análisis estadístico con indicadores de tendencia central como media, y medidas de dispersión que son la desviación estándar, varianza y coeficiente de variación.

#### **1.4.4.- ALCANCE DEL ESTUDIO DE APLICACIÓN.-**

El presente trabajo tendrá por su característica de ser un estudio de aplicación el siguiente análisis:

Inicialmente para encarar el desarrollo del trabajo es importante realizar una adecuada revisión bibliográfica que nos permita obtener toda la fundamentación teórica necesaria en los que se refiere a los suelos residuales, sus características, propiedades,

sus desventajas como estratos dentro de los taludes de la carretera. Etc., asimismo será importante el sustento teórico de la estabilidad de taludes, sus principios, metodologías de análisis, evaluación de sus parámetros como la determinación de su estabilidad. También se establecerán a partir de los documentos bibliográficos sustentatorios la relación de la estabilidad con la presencia de materiales residuales en los cuerpos de taludes de carreteras.

La aplicación práctica que es la base del trabajo de aplicación se realizara en el tramo de estudio la Mamora-Emborozu el cual a partir de su ubicación, determinaremos sus características del tramo orientado a los elementos de los taludes a objeto de establecer si evidentemente son taludes cuyos extractos en su cuerpo son materiales residuales, se realizaran ensayos de caracterización a los materiales identificados como extractos de material residual para obtener sus características geotécnicas. Por otra parte obtendremos los elementos geométricos de cada talud en los cuales predomine los extractos de suelo residuales, con ambos resultados podemos realizar el análisis de la estabilidad introduciendo para su valoración los parámetros característicos de los suelos residuales del que están compuestos los taludes de estudio, los que nos permitirá encontrar una relación que nos permite obtener resultados que valore cuantitivamente el efecto de los parámetros del suelo residual sobre todo su cohesión y fricción obtenidos en ensayos de corte directo, en la estabilidad de los mismos que finalmente nos permita obtener conclusiones que permita ser una referencia en profesionales que estén inmersos en la temática del área vial.

## CAPÍTULO II

### ESTABILIDAD DE TALUDES

#### **2.1 Introducción.**

Los taludes (laderas, pendientes, etc.) de una región, debido a los materiales que los constituyen, tienen comportamientos distintos, en razón a la naturaleza de las rocas.

Este diferente comportamiento, se traduce entre otras formas, en deslizamientos y derrumbes, que constituyen un problema de vital importancia en nuestro territorio, de relieve bastante accidentado y de variada morfología.

Estos fenómenos comprometen la seguridad y estabilidad de las obras de Ingeniería, tales como: carreteras, hidroeléctricas, presas, túneles y canales; sus efectos, puede ser a menudo catastrófico, con la pérdida de considerables bienes y muchas vidas y también pueden causar la paralización parcial o total de estos proyectos, pueden interrumpir el tráfico vehicular por varios días y como consecuencia, encarecer los productos de primera necesidad, obligando, el desembolso de grandes sumas de dinero para su rehabilitación.

Tanto por el aspecto de inversión, como por las consecuencias derivadas de su falla, los taludes constituyen hoy una de las estructuras ingenieriles que exigen mayor cuidado por parte del proyectista. Con la expansión de las carreteras, provocaron los primeros intentos para realizar un estudio racional en este campo, pero no fue sino hasta la aparición de la Mecánica de los Suelos cuando fue posible aplicar al diseño de taludes normas y criterios.

Estas normas y criterios apuntan directamente a la durabilidad del talud, esto es a su estabilidad a lo largo del tiempo.

No hay duda de que el talud constituye la estructura más compleja de las vías terrestres por eso es preciso analizar la necesidad de definir criterios de estabilidad de taludes.

## **2.2 Definición de talud.**

Se entiende por talud a cualquier superficie inclinada respecto de la horizontal que hayan de adoptar permanentemente las estructuras de tierra. No hay duda que el talud constituye una estructura compleja de analizar debido a que en su estudio coinciden los problemas de mecánica de suelos y de mecánica de rocas, sin olvidar el papel básico que la geología aplicada desempeña en la formulación de cualquier criterio aceptable.

Cuando el talud se produce en forma natural, sin intervención humana, se denomina *ladera natural* o simplemente *ladera*. Cuando los taludes son hechos por el hombre se denominan cortes o taludes artificiales, según sea la génesis de su formación; en el corte, se realiza una excavación en una formación térrea natural (desmontes), en tanto que los taludes artificiales son los lados inclinados de los terraplenes.

## **2.3 Definición de estabilidad.**

Se entiende por estabilidad a la seguridad de una masa de *tierra* contra la falla o movimiento. Como primera medida es necesario definir criterios de estabilidad de taludes, entendiéndose por tales algo tan simple como el poder decir en un instante dado cuál será la inclinación apropiada en un corte o en un terraplén; casi siempre la más apropiada será la más inclinada que se sostenga el tiempo necesario sin caerse. Este es el centro del problema y la razón de estudio.

A diferentes inclinaciones del talud corresponden diferentes masas de material térreo por mover y por lo tanto diferentes costos. Podría imaginarse un caso en que por alguna razón el talud más conveniente fuese muy tendido y en tal caso no habría motivos para pensar en “problemas de estabilidad de taludes”, pero lo normal es que

cualquier talud funcione satisfactoriamente desde todos los puntos de vista excepto el económico, de manera que las consideraciones de costo presiden la selección del idóneo, que resultará ser aquél al que corresponda la mínima masa de tierra movida, o lo que es lo mismo el talud más empinado.

Es práctica común en ingeniería definir la estabilidad de un talud en términos de un factor de seguridad (FS), obtenido de un análisis matemático de estabilidad. El estudio debe tener en cuenta la mayoría de los factores que afectan la estabilidad. Estos factores incluyen geometría del talud, parámetros geológicos, presencia de grietas de tensión, cargas dinámicas por acción de sismos, flujo de agua, propiedades de los suelos.

### **2.3.1 Parámetros geométricos**

La conformación topográfica del talud: altura, pendiente, curvatura, largo y ancho, actuando en forma conjunta o separada, afectan la estabilidad de un talud, por cuanto determinan los niveles de esfuerzos totales y las fuerzas de gravedad que provocan los movimientos.

La topografía puede controlar la rata de meteorización y la rata de infiltración y movimiento de agua a través del material del talud, afectando la cantidad de agua disponible, lo cual determina la ocurrencia y características de los niveles freáticos.

El nivel de esfuerzos es también determinado por el volumen y ubicación de los bloques o masas de materiales, factores que dependen de las características topográficas.

Entre los parámetros topográficos a estudiar se pueden extractar los siguientes:

#### **2.3.1.1 Pendiente**

Los perfiles más profundos de meteorización se encuentran en los taludes suaves más que en los empinados. Para cada formación, en un estado determinado de

meteorización existe un ángulo de pendiente a partir del cual un talud es inestable. Mientras algunos suelos residuales de origen ígneo permiten ángulos del talud superiores a  $45^\circ$ , en Lutitas meteorizadas saturadas éste no debe exceder los  $20^\circ$  y hasta valores de la mitad del ángulo de fricción.

Según Skempton, teóricamente en suelos granulares limpios y secos el ángulo de inclinación del talud con la horizontal no debe sobrepasar el del ángulo de fricción del material.

### **2.3.1.2 Curvatura**

Se define como concavidad o convexidad ya sea tanto en sentido longitudinal como transversal y afecta el equilibrio de la masa en sí, así como la capacidad de infiltración y de erosión por su efecto en la velocidad del agua de escorrentía.

### **2.3.1.3 Largo - ancho**

Entre más largo sea un talud, mayor recorrido tendrán las aguas de escorrentía sobre éste y por lo tanto el talud estará más expuesto a la erosión superficial.

### **2.3.1.4 Áreas de infiltración arriba del talud**

Es importante identificar áreas de concentración de agua arriba del talud, que coinciden con depresiones topográficas o zonas de regadío intenso. Entre más grande sea la zona que aporte agua al talud, será mayor la cantidad de agua que está afectando la estabilidad del talud.

## **2.3.2 Parámetros Geológicos**

La Geología generalmente, define las características o propiedades del suelo o roca. La formación geológica determina la presencia de materiales duros o de baja resistencia y las discontinuidades pueden facilitar la ocurrencia de movimientos a lo largo de ciertos planos de debilidad.

Los elementos geológicos principales a estudiar son los siguientes:

### **2.3.2.1 Formación Geológica**

Los materiales de origen igneo-metamórfico poseen un comportamiento diferente a los suelos de origen sedimentario, aluviones, coluviones, etc.

### **2.3.2.2 Estructura y discontinuidades**

En los suelos residuales y rocas la estratificación y las discontinuidades actúan como planos de debilidad o como conductores de corrientes de agua subterránea y las características de estas pueden facilitar los movimientos.

### **2.3.2.3 Meteorización**

La descomposición física o química produce alteraciones en la roca o suelo, las cuales modifican substancialmente los parámetros de resistencia y permeabilidad, facilitando la ocurrencia de deslizamientos.

### **2.3.3 Parámetros Hidrológicos e Hidrogeológicos**

Los cambios en el régimen de aguas subterráneas actúan como detonadores de movimientos en las laderas o taludes y estos se encuentran generalmente, relacionados con las lluvias y la hidrología superficial.

En un estudio de deslizamientos se deben tener en cuenta los parámetros relacionados con la hidrogeología y en especial los siguientes factores:

#### **2.3.3.1 Características de las lluvias**

La ocurrencia de períodos lluviosos intensos produce ascensos en los niveles piezométricos y la saturación disminuye las tensiones capilares.

### **2.3.3.2 Régimen de aguas subterráneas**

Los niveles de agua freáticas pueden fluctuar de manera considerable con el tiempo y modificar la resistencia de los materiales y el estado de esfuerzos.

Es importante determinar las áreas de recarga y descarga, partiendo de la base del conocimiento del clima regional y análisis del terreno, incluyendo el tipo y distribución de la roca, fallas, fracturas, manantiales y humedales.

### **2.3.4 Parámetros Geotécnicos**

#### **2.3.4.1 Resistencia al Cortante**

La resistencia al corte representa la modelación física del fenómeno de deslizamiento.

Los parámetros de ángulo de fricción y cohesión determinan el factor de seguridad al deslizamiento de una determinada superficie dentro del terreno.

Los ángulos de fricción varían de cero en materiales muy blandos, a 50 grados en gravas angulosas o mantos de arenisca y las cohesiones de cero en materiales granulares limpios, a más de 10 Kg/cm<sup>2</sup> en suelos muy bien cementados y valores superiores en las rocas masivas.

#### **2.3.4.2 Permeabilidad**

La permeabilidad mide la resistencia interna de los materiales al flujo del agua y puede definir el régimen de agua subterránea, concentración de corrientes, etc.

Los valores del coeficiente de permeabilidad varían de 100 cm/seg., en roca fracturada o suelos compuestos por arenas y gravas, hasta 10<sup>-10</sup> cm/seg., en arcillas impermeables o en pizarras y granitos sanos.

#### **2.3.4.3 Sensitividad**

La sensitividad se define como la relación de la resistencia pico al corte entre una muestra inalterada y otra re moldeada. En algunos suelos arcillosos esta relación puede ser hasta de 4, lo que equivale a que se pierde gran parte de la resistencia al re moldearse; y en la literatura se conoce de casos catastróficos, donde por acción del cambio de esfuerzos, el suelo se remoldea in situ, pierde su resistencia y se produce el deslizamiento.

#### **2.3.4.4 Expansividad**

Los suelos arcillosos al contacto con el agua expanden su volumen produciéndose movimientos de extensión dentro de la masa del suelo. En suelos sensitivos se puede producir pérdida de resistencia al corte por acción del remoldeo generado por el proceso expansivo, factor que se ha detectado en suelos de origen volcánico en el suroccidente de Colombia.

La expansividad de un suelo se puede medir por medio de ensayos de presión de expansión o expansión libre o por su relación con los límites de plasticidad. La expansividad de suelos arcillosos en los rellenos de juntas puede generar deslizamientos de rocas.

#### **2.3.4.5 Erosionabilidad**

La erosionabilidad es la facilidad con la cual el suelo puede ser desprendido y transportado por acción del agua. Este factor puede afectar la estabilidad de un talud, en cuanto produce cambios topográficos desestabilizantes o genera conductos internos de erosión.

#### **2.3.5 Parámetros ambientales y antrópicos**

El clima ejerce una influencia en la rata de meteorización. Según Blight las reacciones químicas se duplican con cada 10oC de aumento de la temperatura.

Factores tales como: evaporación, fuerzas sísmicas, vegetación y modificaciones causadas por el hombre, pueden producir alteración del talud lo cual afecta su inestabilidad.

#### 2.4 Caracterización del perfil de suelos residuales

El perfil de meteorización es muy importante en la estabilidad de los taludes en un suelo residual, porque este generalmente controla la superficie de falla potencial, el mecanismo de falla, el régimen de hidrología subterránea y la distribución de la presión de poros (Brand, 1985). Generalmente, los perfiles de los suelos residuales se componen de zonas de diferente meteorización que van desde el suelo propiamente dicho hasta la roca sana.

Se han tratado de definir zonas homogéneas, pero en la práctica no existe zonificación real dentro de un perfil, sino un cambio gradual de las características de los materiales con la profundidad, incluso es muy difícil definir en forma precisa el límite de la roca sana con el suelo residual o la roca descompuesta (Saprolito).

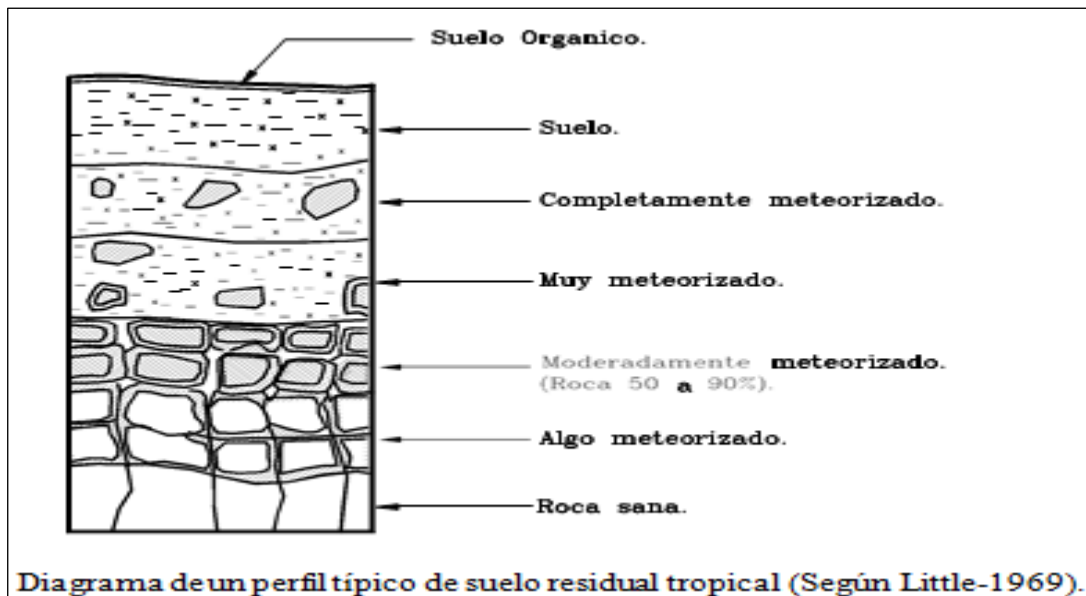


Fig. 2.1

Como los suelos residuales se descomponen de la roca parental, el perfil de suelo representa una historia del proceso de meteorización. Los sistemas de clasificación de perfiles presentan diferentes estados de meteorización y separan los perfiles verticales en diferentes zonas.

La permeabilidad y la resistencia al cortante varían gradualmente con la profundidad, las cuales controlan la respuesta a la infiltración de la lluvia y la localización de las superficies de falla.

Los espesores del perfil de suelo y las propiedades dependen de la roca parental, discontinuidades, topografía y clima. Como estos factores varían horizontalmente, el perfil puede variar en distancias relativamente cortas. Además se forman perfiles muy profundos en regiones tropicales en donde los agentes meteorizados son especialmente fuertes.

Las discontinuidades afectan en forma significativa la permeabilidad y la resistencia al cortante de la masa de suelo, por esta razón en los ensayos de laboratorio de muestras relativamente pequeñas se obtienen coeficientes de permeabilidad y resistencias al cortante muy diferentes a la realidad.

A medida que se avanza en el perfil las propiedades de los suelos van cambiando en forma rápida y esto dificulta no solamente los ensayos sino los análisis, debido a que la estructura del material se vuelve muy importante a medida que se va profundizando, pasando de un comportamiento de suelo a un comportamiento de roca.

Sistema de clasificación del perfil de meteorización empleado en Hong Kong (Oficina de control geotécnico, 1979)

Grado	Descomposición	Detalles de diagnóstico en las muestras
VI	Suelo	No aparece textura reconocible de roca. Las capas superficiales pueden contener materia orgánica y raíces.
V	Completamente descompuesta	Roca completamente descompuesta pero aún aparece textura de roca ligeramente reconocible.
IV	Muy descompuesta	Pedazos grandes que pueden ser destruidos con las manos.
III	Moderadamente descompuesta	Pedazos grandes que no pueden ser descompuestos por las manos (muestras tomadas con broca a rotación).
II	Algo descompuesta	Aparece como roca sana pero tiene manchas muestras de descomposición.
I	Roca sana	

Tabla 2.1

La variabilidad de las propiedades de resistencia, humedad y permeabilidad, a través del perfil dificulta la utilización de los modelos tradicionales de la mecánica de los suelos "homogéneos e isotrópicos".

Otros elementos disturbantes son las discontinuidades y la presencia de bloques de materiales diferentemente meteorizados. Las características de un perfil de suelo residual dependen del tipo y propiedades de la roca originaria. Los perfiles son marcadamente diferentes para formaciones de origen igneo-metamórfico y para formaciones sedimentarias.

Los perfiles de suelos residuales producto de rocas foliadas o estratificadas son marcadamente isotrópicos y generalmente son más débiles y permeables a lo largo de los planos de orientación (Sowers, 1985).

## 2.5 Equilibrio límite y factor de seguridad

El análisis de los movimientos de los taludes o laderas durante muchos años se ha realizado utilizando las técnicas del equilibrio límite. Este tipo de análisis requiere

información sobre la resistencia del suelo, pero no se requiere sobre la relación esfuerzo-deformación.

El sistema de equilibrio límite supone que en el caso de una falla, las fuerzas actuantes y resistentes son iguales a lo largo de la superficie de falla equivalentes a un factor de seguridad de 1.0.

El análisis se puede realizar estudiando directamente la totalidad de la longitud de la superficie de falla o dividiendo la masa deslizada en tajadas o dovelas. Cada día se han mejorado los sistemas de Dovelas desarrollados a inicios del siglo XX y existe.

Método	Superficies de falla	Equilibrio	Características
Ordinario o de Fellenius (Fellenius 1927)	Circulares	De fuerzas	Este método no tiene en cuenta las fuerzas entre las dovelas y no satisface equilibrio de fuerzas, tanto para la masa deslizada como para dovelas individuales. Sin embargo, este método es muy utilizado por su procedimiento simple. Muy impreciso para taludes planos con alta presión de poros. Factores de seguridad bajos.
Bishop simplificado (Bishop 1955)	Circulares	De momentos	Asume que todas las fuerzas de cortante entre dovelas son cero. Reduciendo el número de incógnitas. La solución es sobre determinada debido a que no se establecen condiciones de equilibrio para una dovela.
Janbú Simplificado (Janbú 1968)	Cualquier forma de superficie de falla.	De fuerzas	Al igual que Bishop asume que no hay fuerza de cortante entre dovelas. La solución es sobre determinada que no satisface completamente las condiciones de equilibrio de momentos. Sin embargo, Janbú utiliza un factor de corrección $F_0$ para tener en cuenta este posible error. Los factores de seguridad son bajos.
Sueco Modificado. U.S. Army Corps of Engineers (1970)	Cualquier forma de la superficie de falla.	De fuerzas	Supone que las fuerzas tienen la misma dirección que la superficie del terreno. Los factores de seguridad son generalmente altos.

Lowe y Karafiath (1960)	Cualquier forma de la superficie de falla.	De fuerzas	Asume que las fuerzas entre partículas están inclinados a un ángulo igual al promedio de la superficie del terreno y las bases de las dovelas. Esta simplificación deja una serie de incógnitas y no satisface el equilibrio de momentos. Se considera el más preciso de los métodos de equilibrio de fuerzas.
Spencer (1967)	Cualquier forma de la superficie de falla.	Momentos y Fuerzas	Asume que la inclinación de las fuerzas laterales son las mismas para cada tajada. Rigurosamente satisface el equilibrio estático asumiendo que la fuerza resultante entre tajadas tiene una inclinación constante pero desconocida.
Morgenstern y Price (1965)	Cualquier forma de la superficie de falla.	Momentos y Fuerzas	Asume que las fuerzas laterales siguen un sistema predeterminado. El método es muy similar al método Spencer con la diferencia que la inclinación de la resultante de las fuerzas entre dovelas se asume que varía de acuerdo a una función arbitraria.
Sarma (1973)	Cualquier forma de la superficie de falla.	Momentos y Fuerzas	Asume que las magnitudes de las fuerzas verticales siguen un sistema predeterminado. Utiliza el método de las dovelas para calcular la magnitud de un coeficiente sísmico requerido para producir la falla. Esto permite desarrollar una relación entre el coeficiente sísmico y el factor de seguridad. El factor de seguridad estático corresponde al caso de cero coeficientes sísmicos. Satisface todas las condiciones de equilibrio; sin embargo, la superficie de falla correspondiente es muy diferente a la determinada utilizando otros procedimientos más convencionales.
Elementos finitos	Cualquier forma de la superficie de falla.	Analiza esfuerzos y deformaciones.	Satisface todas las condiciones de esfuerzo. Se obtienen esfuerzos y deformaciones en los nodos de los elementos, pero no se obtiene un factor de seguridad.
Espiral logarítmica	Espiral logarítmica	Momentos y fuerzas.	Existen diferentes métodos con diversas condiciones de equilibrio.

Tabla 2.2 Métodos de análisis de estabilidad de taludes

El Factor de Seguridad es empleado por los Ingenieros para conocer cual es el factor de amenaza de que el talud falle en las peores condiciones de comportamiento para el cual se diseña. Fellenius (1927) presentó el factor de seguridad como la relación entre la resistencia al corte real, calculada del material en el talud y los esfuerzos de corte críticos que tratan de producir la falla, a lo largo de una superficie supuesta de posible falla:

$$F_s = \frac{\textit{resistencia al corte}}{\textit{resistencia al cotante}}$$

En superficies circulares donde existe un centro de giro y momentos resistentes y actuantes:

$$F_s = \frac{\textit{momento resistente}}{\textit{momento actuante}}$$

Existen, además, otros sistemas de plantear el factor de seguridad, tales como la relación de altura crítica y altura real del talud y método probabilístico.

La mayoría de los sistemas de análisis asumen un criterio de “equilibrio límite” donde el criterio de falla de Coulomb es satisfecho a lo largo de una determinada superficie

## 2.6 Métodos de análisis

A continuación se presentan algunos métodos de análisis universalmente conocidos para el cálculo del Factor de Seguridad.

### 2.6.1 Método Ordinario o de Fellenius

Conocido también como método Sueco, método de las Dovelas o método U.S.B.R. Este método asume superficies de falla circulares, divide el área de falla en tajadas verticales, obtiene las fuerzas actuantes y resultantes para cada tajada y con la sumatoria de estas fuerzas obtiene el Factor de Seguridad.

Una vez hecho esto, se calcula el equilibrio de cada una de las dovelas, para finalmente analizar el equilibrio global, obteniéndose así un Factor de Seguridad (FS), al que se le puede definir como la relación entre fuerzas o momentos resistentes y fuerzas o momentos actuantes según sea el método, sobre la masa a deslizarse.

Las fuerzas que actúan sobre una dovela son.

- a. El peso o fuerza de gravedad, la cual se puede descomponer en una tangente y una normal a la superficie de falla.

b. Las fuerzas resistentes de cohesión y fricción que actúan en forma tangente a la superficie de falla.

c. Las fuerzas de presión de tierras y cortante en las paredes entre dovelas, las cuales no son consideradas por Fellenius, pero sí son tenidas en cuenta en otros métodos de análisis más detallados.

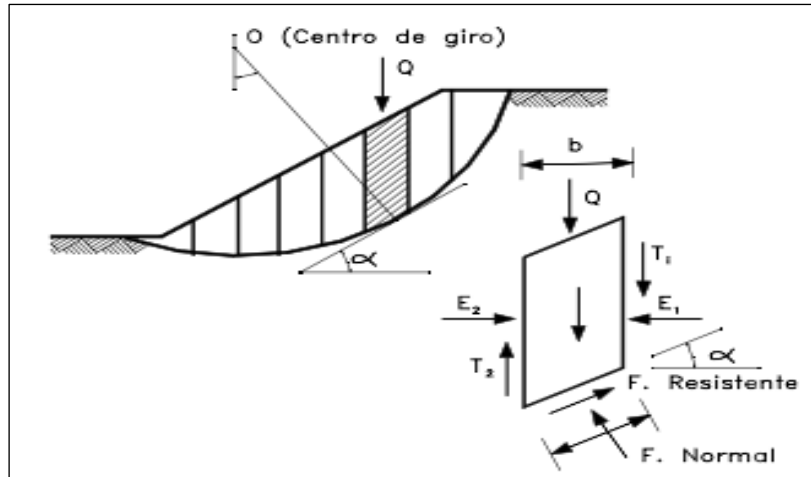


Fig. 2.2

Fuerzas que actúan sobre una dovela en los métodos de dovelas.

El método de Fellenius calcula el Factor de seguridad con la siguiente expresión:

$$F.S = \frac{\sum [Cb \sec \alpha + (W \cos \alpha - ub \sec \alpha) \tan \theta]}{\sum W \sin \alpha}$$

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

$W$  = Peso total de cada tajada.

$u$  = Presión de poros =  $\gamma_w h_w$

$b$  = Ancho de la tajada

$C', \theta$  = Parámetros de resistencia del suelo.

### 2.6.2 Método de Bishop

Bishop (1955) presentó un método utilizando Dovelas y teniendo en cuenta el efecto de las fuerzas entre las Dovelas.

Debido a que el método de las rebanadas o dovelas no es muy preciso para suelos friccionantes, Bishop (1955) propuso otro método originalmente desarrollado para superficies de fallas circulares, el cual considera la condición de equilibrio entre las fuerzas de interacción verticales actuantes entre las rebanadas.

El cálculo de la metodología original se basa en buscar el equilibrio de momentos respecto al centro del arco circular que coincide con la superficie de falla; en la posterior versión modificada, se puede aplicar a superficies no curvas, teniendo que definir centros ficticios. Este es un método iterativo en el cual se parte de un Factor de Seguridad calculado de una superficie falla dada.

$$F.S = \frac{\sum [c \cdot B + (W - u \cdot B) \cdot c/ma]}{\sum W \operatorname{sen} \alpha}$$

$$ma = 1 + \frac{\operatorname{Tan} \alpha \cdot \operatorname{Tan} \theta}{FS}$$

W : Peso de la dovela

u : Presión de poros.

B : Base de la dovela

c : Cohesión del suelo

$\varphi$ : Ángulo de fricción del suelo.

$\alpha$ : Ángulo de la superficie de falla en la dovela.

FS : Factor de seguridad.

### 2.6.3 Método de Janbú

Janbú (1973) presenta un método de Dovelas para superficies de falla curvas, no circulares.

Diseñado para superficies no necesariamente circulares, también supone que la interacción entre rebanadas es nula, pero a diferencia de Bishop, este método busca el equilibrio de fuerzas y no de momentos. Experiencias posteriores hicieron ver que la interacción nula en el caso de equilibrio de fuerzas era demasiado restrictiva, lo que obligó a introducir un factor de corrección  $f$  o empírico aplicable al FS

De acuerdo con Janbú (ecuación modificada):

$$F.S = \frac{f_0 \cdot \sum [c \cdot B + (W - u \cdot B) \cdot \tan \theta] / \cos \alpha \cdot m_a}{\sum W \tan \alpha}$$

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

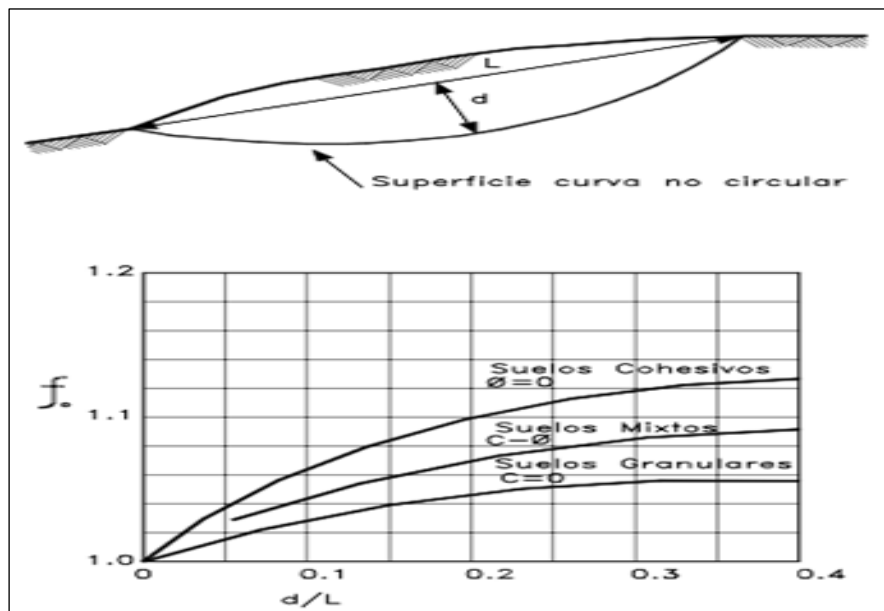


Fig. 2.3 Diagrama para determinar el factor  $f_0$  para el método de Janbú.

$W$  : Peso de la dovela.

$u$  : Presión de poros.

$B$  : Base de la dovela.

$c$  : Cohesión del suelo.

$\varphi$ : Ángulo de fricción del suelo.

$\alpha$ : Ángulo de la superficie de falla en la dovela.

$f_0$  : Factor de corrección.

$FS$  : Factor de seguridad.

## **2.7 Análisis de estabilidad de taludes en roca**

Con excepción de los casos de rocas sanas completamente sin fracturas, los cuales son muy raros, la mayoría de las masas de roca deben ser consideradas como un ensamble de bloques de roca intacta, delimitados en tres dimensiones por un sistema o sistemas de discontinuidades.

Estas discontinuidades pueden ocurrir de una forma errática o en forma repetitiva como grupos de discontinuidades. Este sistema de discontinuidades usualmente, se le conoce como fábrica estructural de la masa de roca y puede consistir de orientación de granos, estratificación, juntas, foliaciones y otras discontinuidades de la roca. La resistencia de la roca a lo largo de la estratificación es diferente a la resistencia normal a la estratificación.

### **2.7.1 Tipos de falla**

#### **2.7.1.1 Análisis de falla planar**

Las fallas planas ocurren a lo largo de una superficie aproximadamente plana y se analizan como un problema en dos dimensiones.

Aunque pueden existir otras discontinuidades que definen los límites laterales de los movimientos, solo se tiene en cuenta el efecto de la discontinuidad principal. El tamaño de las fallas planares puede ir desde unos pequeños metros cúbicos a montañas enteras.

El análisis cinemático tiene en cuenta cuatro condiciones estructurales así:

- a. La dirección de la discontinuidad debe estar a menos de 20 grados de la dirección de la superficie del talud.
- b. El buzamiento de la discontinuidad debe ser menor que el buzamiento de la superficie del talud.
- c. El buzamiento de la discontinuidad debe ser mayor que su ángulo de fricción.
- d. La extensión lateral de la masa potencial de falla debe ser definida por superficies laterales que no contribuyen a la estabilidad. Si las condiciones anteriores se cumplen la estabilidad puede evaluarse por el método del equilibrio límite. El análisis de estabilidad requiere la solución de fuerzas perpendiculares y paralelas a la superficie de falla potencial.

#### **2.7.1.2 Análisis de falla en cuña**

La falla en cuña ocurre cuando la masa de roca se desliza a lo largo de dos discontinuidades que se interceptan en un ángulo oblicuo a la superficie del talud.

La formación de una falla en cuña depende primordialmente, de la litología y de la masa de roca.

El análisis cinemático de una falla en cuña es controlado por la orientación de la línea de intersección de los dos planos. Las condiciones estructurales que se deben cumplir son las siguientes:

- a. La dirección de la línea de intersección debe ser aproximadamente cercana a la del buzamiento de la superficie del talud.
- b. El buzamiento de la línea de intersección debe ser menor que el de la superficie del talud.
- c. El buzamiento de la línea de intersección debe ser mayor que el ángulo de fricción promedio de las dos superficies.

### **2.7.1.3 Análisis de falla al volteo**

Las fallas al volteo ocurren en masas de roca que están subdivididas en una serie de columnas de gran buzamiento y con rumbo aproximadamente paralelo a la superficie del talud. En la falla al volteo la columna de roca rota alrededor de un punto cerca a la base de la misma columna. .

## **2.8 Función de acciones para la estabilidad.**

Los métodos de protección de taludes normalmente empleados tienen dos objetos principales: proteger el talud de la erosión o evitar su aflojamiento y la rotura progresiva subsiguiente.

## **CAPITULO III**

### **SUELOS RESIDUALES.**

#### **3.1 Introducción**

En su trabajo práctico el ingeniero civil ha de enfrentarse con muy diversos e importantes problemas planteados como ser en las carreteras la estabilidad de taludes en suelos residuales.

El suelo es el material de construcción más abundante del mundo y en muchas zonas constituye, de hecho, el único material disponible localmente. Cuando el ingeniero emplea el suelo como material de construcción, debe tomar en cuenta diversos factores como el origen, formación y constitución del suelo, para poder seleccionar el tipo más adecuado para ubicar la obra.

En las zonas tropicales, incluyendo el norte de Sur América y Venezuela, predominan los suelos originados por los productos de la meteorización que se acumulan en el sitio en el que se van formando; estos tipos de suelos se conocen como suelos residuales. Cuando factores climáticos como la lluvia y el viento, transportan o arrastran materia de los suelos residuales, y los depositan en otros lugares, se forman otros tipos de suelos conocidos como suelos transportados, entre los que se encuentran los formados por movimientos a causa de la gravedad, también conocido como coluviones, asociados generalmente a las laderas de los suelos residuales.

El concepto de suelo residual se opone al de suelo transportado, debido a que las características de ambos son muy diferentes. Los suelos transportados, como los coluviones, son por lo general depósitos sueltos y con bloques angulosos, mientras que los suelos residuales consisten en agregados o cristales de mineral meteorizado que se rompe y se vuelve progresivamente fino.

## 3.2 Conceptualización.

### 3.2.1 Principales tipos de suelos

De acuerdo con el origen de sus elementos, los suelos se dividen en dos amplios grupos; suelos cuyo origen se debe a la descomposición física o química de las rocas, o sea de los **suelos inorgánicos**, y los suelos cuyo origen es principalmente **orgánico**.

#### 3.2.1.1 Suelos orgánicos

Ellos se forman casi siempre in situ. Muchas veces la cantidad de materia orgánica, ya sea en forma de humus o de materia no descompuesta o en estado de descomposición, es tan alta con relación a la cantidad de suelo inorgánico que las propiedades que pudiera derivar de la porción mineral quedan eliminadas. Esto es muy común en las zonas pantanosas en las cuales los restos de vegetación acuática llegan a formar verdaderos depósitos de gran espesor, conocidos con el nombre genérico de turbas. Se caracterizan por su color negro o café oscuro por su poco peso cuando están secos y su gran compresibilidad y porosidad. La turba es el primer paso de la conversión de la materia vegetal en carbón.

#### 3.2.1.2 Suelos inorgánicos

El producto del intemperismo de las rocas permanece en el sitio donde se formó, da origen a un **suelo residual**; en caso contrario, forma **un suelo transportado**, cualquiera que haya sido el agente transportador (por gravedad: talud; por agua: aluviales o lacustres; por viento: eólicos; por glaciares: Depósitos glaciares).

Las condiciones climáticas en regiones tropicales con alta humedad y altas temperaturas determinan una intensa meteorización química, originando suelos residuales muy desarrollados. Su composición mineralógica, su fábrica y las condiciones geoquímicas del medio controlan el comportamiento geotécnico de estos suelos. Cuando se precipitan altos contenidos de hierro y aluminio se

forman **lateritas**. Si las condiciones de drenaje son deficientes pueden formarse los denominados **suelos negros**, ricos en esmectitas. Si el drenaje es alto se forman las **arcillas rojas**, ricas en halloysitas.

### 3.2.1.3 Suelos transportados

Los suelos transportados no hacen parte del objeto específico de este Informe, pero dado que son materiales comunes en la naturaleza es necesario hacer algunos comentarios. Los suelos derivados de sedimentos que se encuentran típicamente en las latitudes altas (depósitos glaciales, depósitos de geliflujión, etc.) son por supuesto raros o desconocidos en los trópicos. Sin embargo son transportados por movimientos en las laderas como caída libre, deslizamientos, erosión laminar, flujos de lodo, o por actividad fluvial o eólica.

Suelos transportados y sedimentados. Puede ser mediante el agua de ríos (suelos aluviales), mar, lagos, glaciares, o del viento (dunas, depósitos eólicos), o por gravedad en laderas (suelos coluviales). El medio de transporte (que actúa a la vez como agente de erosión y medio de sedimentación), tiene una gran influencia en las propiedades del suelo resultante: distribución de tamaños de partículas, y forma y textura de las mismas. Así, los suelos eólicos suelen ser muy uniformes, mientras que los aluviales presentan un mayor grado de mezcla de tamaños, y los glaciares aún más.

Los rasgos útiles para el diagnóstico de los horizontes de suelo transportado incluyen: ausencia de estructura de roca, distribución selectiva por tamaño de partículas, estratificación débil, incremento de materiales finos en la dirección de la pendiente, ausencia o desarrollo débil de la estructura del suelo y presencia de material rocoso extraño procedente de sitios de la parte superior de la pendiente. La unión con el suelo residual infrayacente frecuentemente está marcado por cambios en la distribución del tamaño de partículas, en el color y en la composición química adicionalmente a la capa de grava o línea de piedras.

Los suelos enterrados en el coluvión frecuentemente indican dos o más episodios de depósito con periodos de estabilidad, posiblemente como resultado de cambios climáticos en el Cuaternario. Muchas corazas particularmente las lateritas de la parte inferior de las pendientes se han formado o cerca de la base de la capa transportada, y los óxidos de hierro cementantes fueron precipitados a partir del agua subterránea que fluía lateralmente sobre el saprolito o la roca infrayacentes.

### 3.2.1.4 Los suelos residuales

Los suelos residuales se originan de un suelo derivado por la meteorización y descomposición de la roca in situ, el cual no ha sido transportado de su localización original.

Son el producto de la meteorización en el sitio de las formaciones rocosas; también en algunas formaciones de suelos aluviales (depósitos causados por corrientes de agua), estos han sido meteorizados en tal forma que pueden asimilarse en su comportamiento a los suelos residuales. Los suelos residuales se les encuentra comúnmente acompañados por coluviones y un gran porcentaje de los movimientos de las laderas de suelos residuales están relacionados con la inestabilidad de los coluviones.

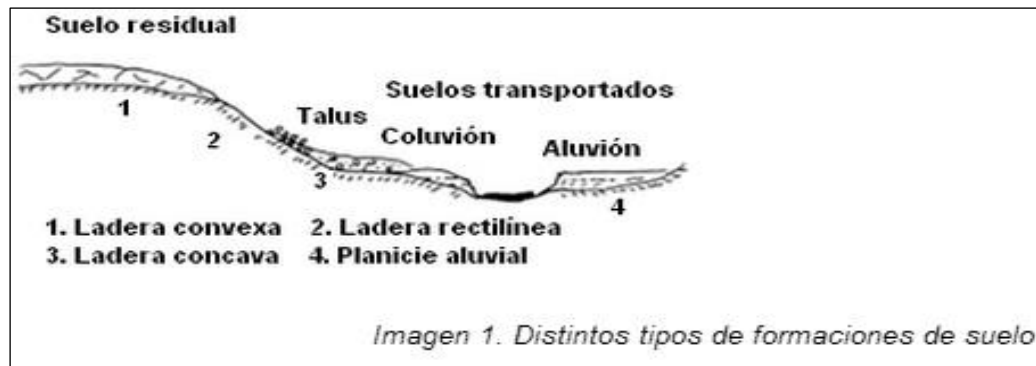


Fig. 3.1

A los suelos residuales se les encuentra predominantemente en las zonas tropicales, donde aparecen en grandes espesores y con frecuencia se les denomina como “suelos

tropicales”. La zona de suelos residuales se concentra en el sector norte de América del sur, Centroamérica, África, Australia, Oceanía y el sur de Asia. En Venezuela el suelo residual más típico es el jabre gallego o su equivalente (aunque con un tipo de meteorización, más caliente) el sauló catalán. Ambos son suelos residuales sobre granito de hasta 45m de profundidad aproximadamente.

Más comúnmente los suelos residuales están cubiertos por sedimentos arenosos o limosos tenuemente estratificados descritos frecuentemente como coluvión. En la base de este procedimiento se presenta frecuentemente una línea de piedras de grava que puede tener hasta 2 m de espesor, y que usualmente está compuesta de fragmentos de roca resistente. El proceso que da origen a las líneas de piedra es complejo e incluye una selección vertical por termitas y la formación de un pavimento de grava residual a medida que las partículas más finas son transportadas pendiente abajo por la escorrentía.

En las regiones semiáridas el pavimento de grava residual puede aparecer en la superficie. En las regiones húmedas la cubierta de la grava residual por un coluvión más fino puede indicar un cambio climático.

La estabilidad de taludes es particularmente complicada en un medio tropical, debido a que la mayoría de los suelos son residuales, además del régimen hidrológico complejo, la humedad ambiental, las temperaturas muy altas, la geología compleja, la topografía escarpada y los demás factores ambientales.

### **3.3 Características de suelos**

Los suelos tienen su origen en los macizos rocosos preexistentes que constituyen la roca madre, sometida a la acción ambiental disgregadora de la erosión (desgaste y fragmentación de material de la superficie terrestre, por agentes dinámicos como el agua y el viento) y la meteorización (desintegración física o descomposición química de las rocas). Cuando el suelo permanece in situ (en el lugar de formación) sin ser transportado, se le conoce como suelo residual.

Las características de los suelos residuales son muy diferentes a las de los suelos transportados. Por ejemplo, el concepto convencional de grano de suelo o tamaño de partícula es inaplicable a muchos suelos residuales, debido a que las partículas de suelo residual con frecuencia consisten en agregados o cristales de mineral meteorizado que se rompen y se vuelven progresivamente finos, si el suelo es manipulado. Lo que parece en el sitio como una grava arenosa puede convertirse en un limo fino durante las actividades de excavación, mezclado y compactación.

1.- El espesor de los suelos residuales es muy variable, dependiendo de la intensidad de la meteorización, pero también de la erosión física, ya que si esta es fuerte, los materiales serán arrastrados casi al mismo tiempo de su formación. Generalmente se observa que conforme las pendientes aumentan de inclinación, el suelo adelgaza.

2.- Para definir su comportamiento y la posibilidad de ocurrencia de deslizamientos, es importante estudiar las características del perfil de meteorización más que las propiedades del material en sí. El perfil de meteorización, es una secuencia de capas de materiales con diferentes propiedades que se encuentran encima o en un lugar próximo a la roca que les dio origen.

PERFIL ESQUEMÁTICO	GEOLOGICAL SOC. ENG. GROUP (1970)	DEERE Y PATTON (1971)
	ROCAS ÍGNEAS	ÍGNEAS Y METAMÓRFICAS
	VI SUELO RESIDUAL	HORIZONTE IA
	V COMPLETAMENTE ALTERADA	HORIZONTE IB
	IV ALTAMENTE ALTERADA	HORIZONTE IC (SAPROLITO)
	III MODERADAMENTE ALTERADA	IA TRANSICIÓN CON ROCA METEORIZADA SAPROLITO
	II DEBILMENTE ALTERADA	
	IB MUY POCO ALTERADA	IB PARCIALMENTE METEORIZADA
IA ROCA SANA	ROCA SANA	

Fig. 3.2 Perfil de meteorización según diferentes autores

3.- Son generalmente muy heterogéneos y difíciles de muestrear y ensayar.

4.- Se encuentran en estado húmedo no saturado, lo cual representa una dificultad para evaluar su resistencia al corte.

5.- Poseen zonas de alta permeabilidad, lo que los hace muy susceptibles a cambios rápidos de humedad y saturación.

### 3.3.1 Metodología para la caracterización integral de los suelos residuales

La caracterización de un suelo residual debido a su heterogeneidad, requiere de un análisis integral que tenga en cuenta todos los factores que afectan su comportamiento, lo cual incluye el grado y proceso de meteorización, su mineralogía, microestructura, discontinuidades, estado de esfuerzos, propiedades mecánicas, clasificación y caracterización del perfil.

En la tabla se muestra un resumen de los elementos, características y procedimientos de análisis para una caracterización integral.

Debe dedicarse esfuerzo especial a la determinación de la microestructura y estructura para de esta manera identificar las superficiales preferenciales de falla.

Metodología para la Caracterización integral de un suelo residual

Elemento	Factores a caracterizar	Procedimiento
<b>Medio Ambiente externo</b>	Topografía, régimen de lluvias, humedad ambiental, temperatura vegetación, sísmica, factores antrópicos.	Mediciones topográficas, hidrológicas, caracterización de cobertura vegetal. Índice climático.
<b>Litología</b>	Tipo de roca, minerales presentes, discontinuidades y microestructura de la roca original.	Caracterización geológica de los afloramientos de roca sana, secciones delgadas, micro petrografía.
<b>Estado de Meteorización</b>	Proceso de desintegración física y descomposición química. Grado de meteorización.	Ensayo de arenosidad, Martillo de Schmidth, índice micro petrográfico, ensayos de penetración.

<b>Mineralogía</b>	Minerales resultantes del proceso de meteorización, tipos y % de arcilla, sesquióxidos.	Análisis termo gravimétrico, escaneado con electro microscopio, Microscopio óptico, Difracción de rayos X.
<b>Microestructura</b>	Textura, Arreglo de partículas, Ensamble, Fábrica, matriz, tamaño de granos, terrones, sistema de soporte. Cementación entre partículas, Alteración o remoldeo, Anisotropía.	Análisis al microscopio y electro microscopio.
<b>Estructura</b>	Discontinuidades heredadas, juntas, diaclasas, foliaciones, estratificación, fallas intrusiones. Separación, continuidad, relleno y propiedades de las discontinuidades.	Análisis visual de apiques, sondeos y afloramientos de suelo residual. Microscopio óptico.
<b>Propiedades Mecánicas</b>	Resistencia al cortante, Cohesión y, ángulo de fricción de la masa de suelo y de las discontinuidades, envolventes de falla, Relación de vacíos, Permeabilidad, dispersividad, Factores que afectan estas propiedades.	Ensayos de campo y de laboratorio. Resistencia al cortante, permeabilidad, Peso unitario, relación de vacíos, porosidad, dispersividad.
<b>Régimen de aguas subterráneas</b>	Humedad, grado de saturación, succión, Posibilidad de aumento rápido de humedad, avance del frente húmedo. Régimen interno de agua permanente y ocasional.	Ensayos de humedad, succión, velocidad de avance del frente húmedo. Redes de movimiento de agua permanente y por acción de lluvias.
<b>Clasificación del suelo residual</b>	Definición de la unidad de suelo, grupo y subgrupo, utilizando todos los elementos anteriores.	Sistema FAO Sistema de Wesley Nombre especial del suelo.
<b>Caracterización del Perfil</b>	Definición de las características del perfil. Profundidad del perfil.	Clasificación por el Método de Hong Kong (grados I a VI).
<b>Superficies preferenciales de falla</b>	Superficie de falla, tipo de falla.	Análisis geotécnico incluyendo agua, sismo, etc.

Tabla 3.1

### 3.4 Proceso de meteorización

La meteorización es la respuesta de los materiales terrestres a un ambiente cambiante, se produce cuando la roca es fragmentada mecánicamente (desintegrada), alterada químicamente (descompuesta), o ambas cosas. La meteorización mecánica se lleva a cabo por fuerzas físicas que rompen la roca en trozos cada vez más pequeños sin modificar la composición mineral de la roca, mientras que la meteorización química implica una transformación química de la roca en uno o más compuestos nuevos

La composición y textura de las rocas madres son importantes en las etapas iniciales de la meteorización, pero se vuelven menos importantes con el tiempo. Las características climáticas tales como la cantidad de precipitación pluviométrica y particularmente, la distribución estacional de ésta, determinan la intensidad del proceso de meteorización. La topografía afecta el movimiento vertical del agua y, por consiguiente, a la velocidad de remoción de los materiales solubles. En taludes escarpados, el escurrimiento puede ser tan activo en la erosión del material meteorizado como lo es la filtración en su formación. El tipo y cantidad de vegetación pueden ser importantes en la formación de ácidos orgánicos y en la asimilación de sílice. Finalmente el tiempo es un factor decisivo, ya que, por ejemplo, en climas húmedos y calientes, típicos de los trópicos, el tiempo que se requiere para alterar un material rocoso es considerablemente menor que en los climas templados. La alteración de la roca a través de los procesos de meteorización se lleva a cabo en forma progresiva por medio de una serie de acontecimientos y etapas, los cuales dan como resultado un perfil de suelo residual meteorizado tropicalmente. Se define como perfil de meteorización de un suelo tropical a la secuencia de materiales con diferentes propiedades físicas formadas en el sitio donde se encuentra y el cual yace sobre la roca meteorizada. Los perfiles de meteorización cambian de un lugar a otro, debido a variaciones locales en el tipo y estructura de la roca madre, la topografía, la velocidad de erosión y las condiciones de agua subterránea además de las variaciones climáticas regionales, particularmente la pluviosidad.

En ambientes tropicales, dominados por temperaturas altas y cambiantes y por lluvias abundantes, la meteorización de los materiales es muy fuerte, caracterizándose por la descomposición rápida de feldespatos (mineral muy abundante de la corteza terrestre) y minerales ferro magnesianos, la concentración de óxidos de hierro y aluminio y la remoción de Sílice y de las bases  $\text{Na}_2\text{O}$  (óxido de sodio),  $\text{K}_2\text{O}$  (óxido de potasio)  $\text{CaO}$  (óxido de calcio) y  $\text{MgO}$  (óxido de magnesio). Los feldespatos se meteorizan inicialmente a Caolinita, Óxidos de Hierro y Óxidos de Aluminio y los compuestos más resistentes como las partículas de Mica y Cuarzo permanecen.

La meteorización de rocas y cenizas volcánicas conducen a la formación de Montmorillonitas (tipo de arcilla), Aloisitas, óxidos de hierro y aluminio en las etapas iniciales de la meteorización y finalmente se pueden formar Caolinitas, Esmeclitas y Gibsitas.

Algunas rocas que contienen sales como cloruro de sodio, ( $\text{NaCl}$ ), Cal ( $\text{CaSO}_4$ ) y Yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) se disuelven fácilmente en agua, especialmente en presencia de  $\text{CO}_2$  (dióxido de carbono), acelerando el proceso de meteorización; y a medida que este proceso continúa los contenidos de Caolinita disminuyen y se alteran los demás compuestos a  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (óxido férrico) y  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (óxido de aluminio).

### **3.4.1 Proceso de meteorización**

El Proceso de meteorización involucra principalmente tres etapas, las cuales son:

#### **3.4.1.1 Desintegración**

En esta etapa se abren las discontinuidades y se desintegra la roca, formándose nuevas discontinuidades por fracturación y las partículas se parten, aumentando la relación de vacíos y la permeabilidad y disminuyendo la cohesión. En la meteorización la sal es generalmente un silicato y es el mineral más soluble, especialmente en agua, y el producto de la reacción es una arcilla.

### 3.4.1.2 Descomposición

Durante esta etapa se incrementa el contenido de arcilla y de suelo en general y se disminuye la fricción. La descomposición puede ser ocasionada por procesos químicos o biológicos. Los procesos químicos incluyen la hidrólisis y el intercambio cationico, mientras que los procesos biológicos pueden incluir efectos de las raíces, oxidación bacteriológica y reducción de hierro y compuestos del azufre.

#### ➤ **Hidrólisis**

El proceso químico más importante en la meteorización química es la hidrólisis. Esta ocurre cuando una sal se combina con agua para formar un ácido o una base.

#### ➤ **Intercambio catiónico**

Es la descomposición de un mineral de arcilla para formar otro a través de la transferencia de iones entre soluciones percolantes y el mineral original. Los cationes tales como el sodio y el calcio son fácilmente intercambiables. El intercambio de cationes no altera la estructura básica del mineral de arcilla pero modifica el espaciamiento entre capas, convirtiendo por ejemplo una illita en una motmorillonita.

### 3.4.1.3 Oxidación y recementación

El proceso de oxidación ocurre cuando en cualquier reacción química un compuesto o radical pierde electrones. El elemento oxígeno no está necesariamente presente.

En la oxidación se aumenta el contenido de óxidos de hierro y aluminio, los cuales pueden cementar grupos de partículas aumentando la cohesión y el suelo tiende a estabilizarse.

En la mayoría de los procesos de meteorización en las rocas ígneas predominan los procesos químicos, mientras en las rocas sedimentarias predominan los procesos físicos, sin embargo estos procesos se interrelacionan.

La meteorización generalmente, avanza hacia abajo de la superficie y a través de las juntas y demás conductos de percolación (poros), produciendo variaciones de intensidad de meteorización y dejando bloques internos de material no descompuesto.

Cuando la meteorización está comenzando los bloques son grandes y controlan en parte el comportamiento del talud, pero a medida que se hace más intensa el factor más importante es la resistencia del suelo meteorizado que actúa como matriz de los bloques independientes.

Minerales resultantes

Durante las etapas de meteorización, se van formando diferentes productos minerales, que se presentan a continuación:

➤ **Caolinita**

Los suelos con caolinita como mineral de arcilla presentan un comportamiento normal en los ensayos, en términos de baja a media plasticidad (capacidad de resistir deformaciones sin romperse o agrietarse) y permeabilidad (capacidad de ser atravesado por un fluido sin alterar su estructura interna). El efecto del aumento de humedad (cantidad de agua por volumen de muestra) sobre las propiedades del suelo generalmente, no es importante.

➤ **Montmorillonita**

Los materiales con contenidos apreciables de Montmorillonita poseen muy alta plasticidad y baja permeabilidad. El efecto del aumento de humedad puede resultar en una disminución importante de la resistencia a los esfuerzos cortantes. La Montmorillonita tiene un alto nivel de reacción con el cemento y la cal.

➤ **Aloisita**

Al aumentar la humedad de una aloisita puede disminuir la resistencia a los esfuerzos cortantes en forma apreciable.

### ➤ Sesquióxidos

Los sesquióxidos generalmente, cementan las partículas y su presencia equivale a una reducción en la plasticidad. Los óxidos de hierro y aluminio se acumulan como consecuencia de una cadena de procesos químicos y de lavado interno.



Fig. 3.3

## 3.4.2 Factores que afectan el proceso de meteorización

### 3.4.2.1 Efecto del clima

El clima ejerce una profunda influencia en la meteorización, especialmente la humedad relativa y la temperatura. Las reacciones químicas prácticamente se duplican con cada aumento de 10°C de temperatura.

En las zonas tropicales y subtropicales donde la superficie de la tierra está cubierta por una vegetación densa que facilita la infiltración del agua, por aumento de los tiempos de retención del agua, y que a su vez son sujetas a lluvias fuertes, pueden aparecer profundidades de meteorización de varios cientos de metros.

En climas secos o áridos la meteorización química es superficial, lenta y predominan los fenómenos de meteorización de tipo mecánico, igualmente esto ocurre en zonas tropicales montañosas, con poca vegetación, donde las pendientes altas del terreno no facilitan la infiltración del agua lluvia.

#### **3.4.2.2 Efecto de otros factores**

La frecuencia o espaciamiento de las discontinuidades (alteraciones súbitas en las propiedades físicas) afecta el proceso de meteorización y en los sitios en los cuales el espaciamiento de las discontinuidades es mayor, pueden aparecer masas de materiales no descompuestos como es el caso de los "Tors" o masas de granito sólido.

Las plantas y organismos vivos, tales como bacterias ayudan en el proceso de meteorización química. Otros elementos ambientales pueden incidir en la meteorización, pero sobre todo las condiciones de humedad y temperatura.

La topografía del terreno es un factor muy importante, ya que la meteorización es mayor en los sitios de menor pendiente y la profundidad de la meteorización aumenta hacia abajo del talud.

### **3.5 Medición del grado de meteorización**

El grado de meteorización puede medirse

#### **3.5.1 Arenosidad**

La forma más sencilla es utilizando un cuchillo o una puntilla y medir la facilidad con que se puede cortar o el índice de arenosidad.

Medición del grado de descomposición de feldespatos mediante el ensayo de arenosidad.

<b>Grado de descomposición</b>	<b>Términos de arenosidad</b>	<b>Modo de reconocimiento</b>
Fresco	Duro	No puede ser cortado por un cuchillo
Moderado	Arenoso	Puede ser cortado con un cuchillo o gravado por una puntilla
Alto	Deleznable	Puede ser desmoronado a fragmentos más pequeños
Completo	Blando	Puede ser moldeado fácilmente con las manos

Tabla 3.2

### 3.6 Microestructura de los suelos residuales

Los términos microestructura, fábrica y textura se refieren al arreglo físico de los granos o partículas. Este arreglo junto con la mineralogía, el grado de meteorización y la estructura de discontinuidades determina el comportamiento ingenieril de la mayoría de los suelos residuales. La microestructura incluye la microfábrica, la composición y las fuerzas entre partículas. Las investigaciones de microestructura se realizan utilizando microscopios ópticos o microscopios electrónicos. La cementación de grupos de partículas es responsable de altas relaciones de vacíos, bajas densidades, altas resistencias, baja compresibilidad y alta permeabilidad. Generalmente la microestructura se analiza en dos niveles: Textura y Fábrica.

#### 3.6.1 Textura

La textura puede revelar la orientación entre las partículas de cementación (proceso mediante el cual los poros de una roca se rellenan por minerales) y el contacto entre ellas. La textura tiene que ver con la facilidad con que se puede trabajar el suelo, la

cantidad de agua y aire que retiene y la velocidad con que el agua penetra en el suelo y lo atraviesa. La textura indica el contenido relativo de partículas de diferente tamaño, como la arena, el limo y la arcilla.

La influencia de la textura en las propiedades ingenieriles de los suelos tropicales fue enunciada por Terzaghi describiendo la arcilla en una presa, sobre la base de que ella ocurría en grupos densos de partículas de arcilla cementados por óxido de hierro.

### 3.6.2 Arreglo elemental de partículas

Corresponde a la localización en el espacio de las partículas entre sí. Las partículas arcillosas pueden encontrarse en arreglos desordenados, paralelos o en racimos y las partículas granulares (Arenas y limos) en agrupaciones de partículas con los contactos limpios o cubiertos de otro material, generalmente de arcilla.

La mayoría de los suelos tropicales son susceptibles a descomposición física por la manipulación de los “terrones o racimos” que se forman. El rompimiento de estos racimos dificulta la determinación exacta de sus propiedades físicas y complica el proceso de compactación en el campo.

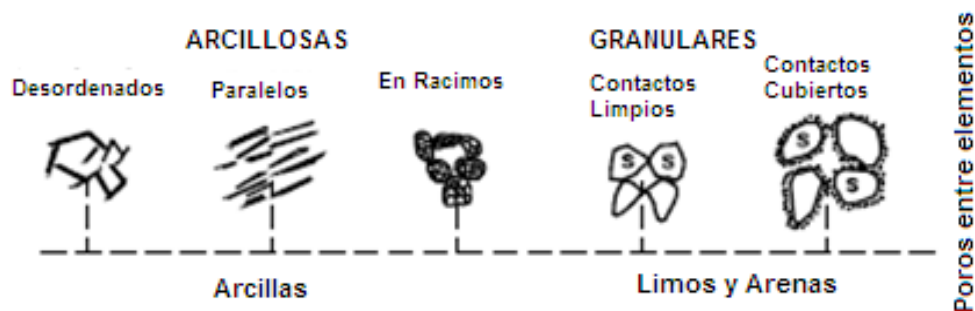


Fig. 3.4 Arreglo elemental de partículas

### 3.6.3 Ensamble

El ensamble de las partículas corresponde a la forma como interactúan las partículas unas con respecto a las otras. El ensamble presupone la existencia de una matriz, la

cual puede ser arcillosa o granular y se forma por la agregación o la unión de las partículas.

La disolución y lavado de la matriz o las uniones y la cementación conducen al desarrollo de una estructura porosa. Este efecto es producto de la frecuente ocurrencia de lluvias y por esto es necesario analizar el efecto de las lluvias sobre los poros y uniones entre las partículas. El ensamble puede ser modificado por el flujo de corrientes de agua.

### **3.6.4 Fábrica**

La fábrica muestra la organización general de los grupos de partículas. El sistema de fábrica puede ser de tres formas:

#### **3.6.4.1 Sistema continuo**

En el cual la matriz y las partículas o elementos forman un todo homogéneo aunque existen uniones entre partículas estas no interrumpen la continuidad de la fábrica.

#### **3.6.4.2 Sistema embebido por una matriz**

El ensamble forma un elemento homogéneo pero es interrumpido por poros, granos grandes, relictos o nódulos de materiales diversos.

#### **3.6.4.3 Sistema soportado por una red de bloques o terrones**

En este caso aparecen varios elementos que se integran entre sí, separados por poros, pero es la microestructura del ensamble de estos elementos los que le dan soporte al material.

### **3.7 Estructura de los suelos residuales**

Según Blight (1977) citando a Lumb, las juntas en la mayoría de las rocas ígneas y la estratificación en rocas sedimentarias permanecen en los suelos residuales. Igual cosa ocurre con la esquistosidad y la foliación de algunas rocas metamórficas.

### **3.7.1 Juntas o diaclasas**

Las juntas juegan un papel importante en las fallas de materiales residuales. Si se encuentran abiertas actúan como conductores de agua y activadores de presiones de poro. Por lo general, se encuentran más abiertas en la superficie que a profundidad. El agua al pasar a través de la junta produce meteorización de sus paredes, formando arena o arcilla que forma superficies de debilidad. Adicionalmente, el agua que viaja a lo largo de las juntas puede llevar arcilla en suspensión que es depositada en ellas y las discontinuidades se hacen muy peligrosas si se encuentran rellenas de arcilla. Blight afirma que la resistencia a lo largo de una estructura heredada puede ser la mitad de la resistencia en el suelo residual intacto y cita casos en que la resistencia es de solamente 1/3 de la resistencia a través del suelo. Las superficies de falla pueden coincidir con una junta o pueden comprender varias familias de juntas diferentes formando bloques deslizantes.

### **3.7.2 Foliaciones**

Las foliaciones son superficies generalmente paralelas de baja cohesión y por las cuales las rocas se pueden partir. Estas son debidas principalmente, a efectos de metamorfismo y son conocidas como pizarrosidad, esquistosidad, foliación, etc. Este fenómeno produce direcciones de debilidad muy similares a diaclasas, pero son menos separadas y pueden inducir el desmoronamiento de los suelos al momento de moverse, produciéndose flujos secos del material desintegrado

### **3.7.3 Estratificación**

La estratificación genera superficies de debilidad por cambio de material. Cuando los materiales a lado y lado de la estratificación son de propiedades mecánicas similares, trabajan en forma similar a una diaclasa pero cuando la diferencia de propiedades es grande, como en el caso de estratificación de areniscas y Lutitas, la situación se hace más compleja, produciéndose concentración de agua en la interface y flujo dentro del

material más permeable. Este fenómeno genera una zona de meteorización a partir del plano de estratificación que debilita esta superficie.

#### **3.7.4 Fallas**

Su influencia en los problemas de taludes en materiales residuales pueden definirse así: Producen una zona de debilidad varios metros a lado y lado y en el caso de fallas de gran magnitud, de varios centenares de metros en dirección normal a éstas. En algunos casos las fallas son verdaderas familias de fallas que parecen especies de diaclasamiento. El material fracturado a lado y lado de la falla puede producir zonas inestables dentro de la formación estable. Los planos de falla a su vez pueden estar rellenos de arcilla o completamente meteorizados, formando superficies débiles muy peligrosas. Es común que un deslizamiento esté directamente relacionado con la presencia de una falla geológica.

#### **3.7.5 Intrusiones**

A veces los deslizamientos son generados por la presencia de intrusiones de materiales más permeables que traen su efecto en el régimen de aguas. Las diferencias en el grado de cristalización y el tamaño de los cristales también afectan la estabilidad de los taludes en rocas ígneas y metamórficas.

### **3.8 Propiedades de suelos residuales.**

#### **3.8.1 Propiedades mecánicas de los suelos residuales**

##### **3.8.1.1 Resistencia al cortante**

La estabilidad de los suelos residuales muy meteorizados (grado VI en la clasificación de Hong Kong), se puede analizar utilizando las teorías tradicionales de la mecánica de suelos, con cierto grado de confiabilidad; sin embargo a medida que se profundiza en el perfil las propiedades de los materiales cambian sustancialmente. Las muestras de roca son difíciles de muestrear y las muestras de tamaño para ensayos de laboratorio generalmente, dan estimativos muy pobres de la

resistencia al cortante y de la permeabilidad. El caso más delicado de análisis es el de los saprolitos. Los saprolitos son generalmente, no saturados, muy débilmente cementados y muy heterogéneos, con varios sistemas de juntas heredadas (Mitchell y Sitar ,1982). Vaughan (1988) explicó la relación entre la resistencia al cortante y la relación de vacíos en la siguiente forma:

- La resistencia derivada de la evolución del suelo y encontrada en equilibrio con el estado de esfuerzos, influencia el comportamiento del suelo y su dureza.
- La historia de esfuerzo durante la formación del suelo tiene muy poco efecto sobre las propiedades de los materiales.
- Los suelos tienen una variedad muy amplia de mineralogía y resistencia de los granos.
- Los suelos en el sitio tienen un rango muy amplio variable de relación de vacíos.

### **3.8.1.2 Variación de la resistencia al cortante**

La cohesión y la fricción entre las partículas o bloques varían considerablemente de acuerdo al tipo de suelo, contenido de minerales, tamaño y forma de las partículas, humedad, presión de poros y la historia de la formación del material. Adicionalmente, cuando ha ocurrido anteriormente un movimiento, la cohesión y la fricción han disminuido especialmente, cerca de las superficies de falla o fractura. La resistencia al cortante es generalmente, menor en el suelo que en el saprolito o en la roca, pero las formaciones residuales tienen generalmente, superficies de discontinuidad equivalentes a superficies de debilidad de baja resistencia que facilitan la posibilidad de movimientos. Es común que la resistencia al cortante sea menor a lo largo de las discontinuidades heredadas, que en la matriz del material residual y se reportan casos en los cuales la resistencia a lo largo de la discontinuidad puede ser muy pequeña, comparada con la resistencia a través del suelo en sí, especialmente cuando las discontinuidades se encuentran rellenas. Según Massey

y Pang (1988) el comportamiento y la resistencia al corte de los materiales son una función de:

- a) La naturaleza de la roca original.
- b) La mineralogía y microfábrica derivada de los procesos de meteorización física y química.
- c) El grado de saturación y los cambios inducidos por modificaciones del contenido de humedad.
- d) La presencia, orientación, espaciamiento, persistencia e imperfecciones de las discontinuidades heredadas, junto con la naturaleza de los rellenos o coberturas.
- e) La presencia, forma y distribución de material de roca menos meteorizada en forma de bloques o bandas dentro de la matriz más fuertemente meteorizada.

La resistencia al corte disminuye por acción de dos efectos:

- La disminución de los esfuerzos efectivos de acuerdo al principio de Coulomb.
- La separación de las superficies a lado y lado de la discontinuidad, debidas a movimientos de compresión elastoplástica de los materiales, por acción de la fuerza diferencial generada por la presión de poros "preferencial" a lo largo de la discontinuidad. Al aumentar la presión de poros la discontinuidad tiende a separarse y la resistencia al corte disminuye.

### **3.8.1.3 La cohesión**

La cohesión es una propiedad determinante en el comportamiento de un suelo residual. En suelos no saturados hay una cohesión aparente, la cual es el producto de las presiones negativas en el agua de poros, la cual desaparece por saturación, sin embargo en muchos casos, la cohesión es debida a la cementación de productos precipitados (Sowers - 1985). La cohesión generalmente, no es continua a lo largo de

una superficie y desaparece con frecuencia por la abertura de las discontinuidades debida a fuerzas de tensión o a presión de poros.

### 3.8.1.4 Angulo de fricción

El valor del ángulo de fricción interna de los materiales disminuye con el avance del proceso de meteorización. En ensayos realizados en materiales de granitos y Neisses en Colombia, se encuentran variaciones de 26 a 38°, similares a los indicados por Deerey Patton(1971), para materiales de Lutitas entre 10° y 35° y para materiales de areniscas entre 25° y 45°, en concordancia a los valores propuestos por Sowers - 1981. En materiales derivados de areniscas, el Autor ha encontrado ángulos de fricción a lo largo de discontinuidades rellenas de arcilla con valores de 10° a 15°, cuando los ángulos de fricción de discontinuidades sin relleno dan valores de 35° a 38° en el mismo talud. Esta realidad dificulta la evaluación del comportamiento de los suelos residuales utilizando los modelos de la mecánica de suelos tradicional.

### Resistencia (cont.)

<b>Materiales no cohesivos</b>	<b>Angulo de fricción (<math>\phi</math>)</b>	<b>Cohesión (kPa)</b>
Arenas	28 - 34	0
Gravas	34 - 37	0
<b>Roca triturada</b>		
Basalto	40 - 50	0
Granito	45 - 50	
Caliza	35 - 40	
Arenisca	35 - 45	

<b>Materiales cohesivos</b>	<b>Angulo de fricción (<math>\phi</math>)</b>	<b>Cohesión (kPa)</b>
Arcillas	22 - 27 27 - 32	20 - 50 30 - 70
<b>Rocas</b>		
Ígneas	35 - 45	5.000 - 55.000
Metamórficas	30 - 40	20.000 - 40.000
Sediment. duras	35 - 45	10.000 - 30.000
Sediment. blandas	25 - 35	10.000 - 20.000

### **3.8.1.5 La envolvente de falla**

En los suelos residuales la envolvente de falla puede tener una forma no lineal, especialmente en el rango de presiones bajas. Brand (1985) presenta el caso de los suelos residuales derivados de granitos en Hong Kong, donde la envolvente de falla presenta una curva en los niveles de esfuerzos normales bajos sin que se presente un caso de cohesión

### **3.8.1.6 Factores que afectan el comportamiento esfuerzo-deformación**

#### **➤ Resistencia de los granos o partículas**

Las partículas que conforman un suelo residual muestran generalmente una gran variabilidad en la resistencia al aplastamiento o trituración y esta resistencia influye en forma importante sobre los valores de la resistencia al cortante. Por ejemplo, los suelos residuales con partículas de cuarzo resistentes al aplastamiento muestran ángulos de fricción relativamente altos.

#### **➤ Unión y cementación entre partículas**

Una de las características básicas de los suelos residuales es la existencia de unión es entre las partículas. Estas uniones pueden ser de cementación por la depositación de carbonatos, hidróxidos, materia orgánica, etc., o por la reprecipitación de agentes cementantes como los silicatos o el crecimiento de uniones durante la alteración química de los minerales. Las uniones entre partículas disminuyen a medida que avanza el proceso de descomposición. La roca poco meteorizada posee una resistencia al cortante mucho mayor que la roca descompuesta.

#### **➤ Estado de alteración o remoldeo**

La resistencia al cortante es muy sensitiva a la alteración del material. Esta alteración puede deberse a causas naturales o antrópicas. Por ejemplo, el uso de explosivos para la ejecución de un corte puede disminuir la resistencia al cortante de toda la ladera. La estructura también puede destruirse durante la saturación o la toma de

muestras. La resistencia al corte del suelo varía en forma grande de una muestra natural a otra compactada, debido al efecto de cementación y es difícil poder obtener valores confiables de diseño.

### 3.8.2.- Propiedades Típicas de Suelos Residuales

#### Propiedades Índice de Suelos

Referencia	Tipo de suelo	Peso unitario promedio (kN/m <sup>3</sup> )	Ángulo de fricción interna(°) (rango)	Ángulo de fricción interna (°)promedio	Cohesion en kN/m <sup>2</sup> (rango)	Cohesión en kN/m <sup>2</sup> (promedio)
Vargas (1977)	Laterita		22 - 33	28	0 - 59	24
Tuncer et al. (1977)	Andisol	13.0	27 - 57	42	48 - 345	163
Foss (1973)	Andisol	11.5	36 - 38	37	22 - 28	25

Tabla 3.4

**3.8.3 Coeficiente Permeabilidad** La facilidad con que el suelo fluye a través de un material se le denomina con el nombre de permeabilidad y el parámetro que permite cuantificar este fenómeno se le llama coeficiente de permeabilidad y se le encuentra en la literatura con la simbología de la letra  $K$ . La permeabilidad depende del tamaño de los vacíos o poros, es alta en las gravas y baja en las arcillas.

coeficiente de permeabilidad	
Roca fracturada o suelos compuestos por arenas y gravas	100 cm/seg
Arcillas impermeables o en pizarras y granitos sanos.	10-10 cm/seg

Tabla3.5 Tamaño de poros y permeabilidad (Lee, 1996)

En materiales discontinuos, como los que se encuentran en las formaciones tropicales, el coeficiente de permeabilidad no es isotrópico, sino que varía de acuerdo a la orientación de las discontinuidades. La permeabilidad es mayor en la dirección de los planos de depositación o de las discontinuidades que en los plano normal a ellas.

El valor del coeficiente  $K$  varía de acuerdo al tipo de roca o suelo, fracturación, espaciamiento, abertura y relleno de las juntas

### **3.9 Clasificaciones para suelos residuales**

#### **3.9.1 Clasificación de la FAO para suelos tropicales**

Se han editado mapas de suelos generalmente, para uso agrícola en donde se clasifican los suelos de acuerdo a criterios pedológicos. Se conocen la clasificación pedológica francesa, la clasificación Taxonómica de los Estados Unidos y la clasificación FAO- UNESCO. Estas clasificaciones han sido estudiadas por autores como Morin and Todon y pueden ser útiles a los Ingenieros y geólogos y para ello existen correlaciones cuya interpretación para casos prácticos requiere de mucho criterio y experiencia. La FAO ha definido 25 unidades de suelo de las cuales las más importantes son:

##### **3.9.1.1 Arenosols**

Más gruesas que la arena y contenido de arcilla del 18% o menos. Exclusivos de depósitos aluviales recientes no consolidados.

##### **3.9.1.2 Andosols**

Suelos formados por materiales volcánicos por lo general con superficies oscuras.

Comunes en regiones montañosas. Densidades bajas y humedades naturales altas. Contienen generalmente, minerales de Aloysisita. Se caracterizan por su alto contenido de agua y cambios irreversibles cuando se secan. Estos materiales son muy comunes en las zonas volcánicas del sur-occidente de Colombia.

### **3.9.1.3 Luvisols**

Suelos con acumulación de arcilla en el horizonte intermedio, rojo grisáceo. Propios de zonas áridas.

### **3.9.1.4 Cambisols**

Suelos en los cuales han ocurrido cambios en el color, la estructura y consistencia por la meteorización del perfil en zonas de erosión intensa.

### **3.9.1.5 Acrisols**

Suelos muy ácidos normalmente amarillo - crema, provenientes de rocas ácidas en zonas de lluvia intensa.

### **3.9.1.6 Nitosols**

Suelos de color gris rojizo que han sido parcialmente meteorizados pero no han llegado a la madurez total que han alcanzado los Ferralsols.

### **3.9.1.7 Ferralsols**

Suelos que contienen una cantidad muy importante de óxidos de hierro, generalmente rojos o amarillos, propios de zonas lluviosas. Es un grupo muy grande de suelos con gran variación de características, los minerales predominantes son la Caolinita y la Aloisita. Dentro de los ferralsols es importante definir a los “Latosols”. Un término científico empleado también para la caracterización de lateritas es de Latosol. La identificación sobresaliente es la presencia abundante de sesquióxidos y Cuarzo y la ausencia de los minerales solubles. Por lo general el tipo de arcilla predominante es la Caolinita. Las tierras rojas o latosoles son suelos residuales ferruginosos que se encuentran en el primer ciclo del proceso, habiendo sido recientemente oxidados pero no cementados, comportándose como arcillas y por lo tanto no se considera que sean Lateritas.

### 3.9.1.8 Vertisols

Son suelos problemáticos de altas características de expansión y contracción y baja resistencia. Poseen grandes cantidades de Esmectita y Montmorillonita entre ellos se incluyen las arcillas negras propias de las zonas tropicales.

Características de algunos de los suelos tropicales, clasificados de acuerdo a la FAO (Wesley, 1988).

Clasificación FAO	Nombre comunes	Minerales de arcilla dominantes	Características importantes
Ferralsols	Suelos lateríticos Latosoles Arcillas rojas	Aloisita Caolinita Gibsita Geotita	Un grupo muy grande con una gran variación de características
Andosols	Cenizas volcánicas	Alofanos Aloisita	Contenidos muy altos de agua y cambios irreversibles al secarse
Vertisols	Suelos negros tropicales. Suelos algodón negro.	Esmectita Montmorillonita	Alta expansión y baja resistencia.

Tabla 3.6

### 3.9.2.- Sistema de clasificación de suelos residuales de WESLEY

Los suelos residuales poseen características específicas, las cuales no están representadas adecuadamente en el sistema unificado de clasificación de suelos entre las cuales Wesley (1997) indica las siguientes:

- a. El comportamiento de los suelos residuales depende en forma importante de la mineralogía y la estructura.
- b. El grado de meteorización no se tiene en cuenta en los sistemas normales de clasificación.
- c. Los sistemas de clasificación se basan en las propiedades del suelo en estado remoldeado y el comportamiento de los suelos residuales depende de su estado in situ. Wesley(1988) propuso un sistema de clasificación de suelos residuales (Tabla 3.10) el cual está basado en tres factores básicos:

### 3.9.1 Composición

Se refiere al material de que está constituido e incluye tamaño, forma y especialmente la composición mineralógica de la fracción fina.

### 3.9.2 Macroestructura

Incluye todos los detalles que se pueden observar visualmente como son discontinuidades, capas, fisuras, poros, presencia de materiales no meteorizados o parcialmente meteorizados y estructuras heredadas.

### 3.9.3 Microestructura

Fábrica, cementación entre partículas, forma y tamaño de los poros, etc.

El sistema de clasificación de Wesley no puede tomarse aislado de otros elementos como son el estado o nivel de meteorización, las propiedades mecánicas, las modificaciones o cambios al profundizarse en el perfil, las superficies de cambios bruscos de propiedades, etc.

Sistema de clasificación de suelos residuales ( Wesley –1997)

Grupo	Subgrupo	Ejemplo	Identificación	Comentarios
<b>A</b> <b>Suelos sin influencia mineralógica fuerte</b>	<b>(a)</b> Influencia fuerte de la macroestructura	Suelos de rocas ígneas o ácidas o intermedias y rocas sedimentarias muy meteorizadas.	Inspección visual	Este es un grupo muy grande de suelos, incluyendo los saprolitos, cuyo comportamiento en las laderas es dominado por la influencia de las discontinuidades, fisuras, etc.
	<b>(b)</b> Influencia fuerte de la microestructura	Suelos de rocas ígneas y sedimentarias completamente meteorizaadas.	Inspección visual y evaluación de la sensibilidad e índice de liquidez.	Son suelos esencialmente homogéneos. Es importante la identificación de la naturaleza y papel de las discontinuidades heredadas, tanto primarias como secundarias para poder entender el comportamiento.

	(c) Poca influencia de la estructura	Suelos derivados de rocas muy homogéneas	Poca o ninguna sensibilidad y apariencia uniforme.	Se comportan en forma similar a los suelos moderadamente sobreconsolidados.
<b>B</b> <b>Suelos fuertemente influenciados por minerales comunes</b>	(a) Grupo de la Smectita y montmorillonita.	Suelos negros tropicales y suelos formados en condiciones pobremente drenadas.	Colores gris a negro y alta plasticidad.	Suelos problemáticos encontrados en zonas planas; son de baja resistencia, alta compresibilidad y características fuertes de expansión y contracción.
	(b) Otros minerales comunes			Subgrupo relativamente pequeño.
<b>C</b> <b>Suelos fuertemente influenciados por minerales arcillosos propios solamente de los suelos residuales</b>	(a) Grupo de los Alófanos	Suelos derivados de ceniza volcánica.	Contenidos de agua muy altos y cambios irreversibles al secarse.	Altos límites líquidos y plásticos. Las características de ingeniería son generalmente buenas, aunque en algunos casos la alta sensibilidad hace difícil el manejo y la compactación.
	(b) Grupo de la Aloysita	Suelos derivados de rocas volcánicas antiguas. Especialmente arcillas rojas tropicales.	Color rojo, topografía bien drenada.	Suelos finos de baja a media plasticidad, pero de baja actividad. Las propiedades de ingeniería son generalmente buenas. (Debe tenerse en cuenta que con frecuencia se traslapan los suelos alófanos y los aloysíticos).
	(c) Grupo de los Sesquioxidos	Suelos lateríticos o lateritas	Apariencia granular o nodular.	Es un grupo muy amplio que van desde arcillas limosas hasta gravas y arenas gruesas. Su comportamiento varía desde la baja plasticidad hasta la grava no plástica.

Tabla 3.7

### **3.10 Características para la evaluación de los suelos residuales**

La validez de los ensayos de “Laboratorio” en suelos residuales es cuestionable aunque no puede discutirse que son útiles para la toma de decisiones de diseño. Muestras totalmente inalteradas aunque son difíciles de obtener, son deseables y es recomendable que las muestras sean lo más grande posibles.

#### **3.10.1 Ensayos de evaluación**

Se deben realizar ensayos que permitan obtener las propiedades de los suelos para los análisis, en tal forma que sean lo más representativos de las situaciones reales en el campo.

Los ensayos comúnmente utilizados para análisis de taludes son los siguientes:

##### **3.10.1.1 Ensayo de corte directo**

El ensayo de corte directo tiene como objeto determinar la resistencia al esfuerzo cortante de una muestra, valor que en otras cosas, será muy útil para el cálculo de la estabilidad de taludes o para la capacidad de soporte, ensayo para la determinación de la resistencia al corte de una muestra de suelo, que simula la aplicación de las cargas reales a las que estará sometido el suelo. El ensayo induce sobre el que actúan un esfuerzo normal aplicado externamente debido a la carga vertical. Al aplicar la fuerza con las cuales podremos obtener la cohesión y el ángulo de fricción interna del suelo para luego hacer tabulaciones de datos y representaciones gráficas.

##### **➤ Ventajas del ensayo de corte directo**

El ensayo es relativamente rápido y fácil de llevar a cabo.

La preparación de la muestra no es complicada.

El principio puede aplicarse a suelos granulares y otros materiales que contienen grandes partículas que serían muy caras de ensayar por otros medios.

Puede medirse el ángulo de rotura del suelo y roca, o entresuelo y otros materiales.

Se ha introducido cajas con muestra de forma aproximadamente cuadrada de forma que la reducción de área durante el ensayo pueda fácilmente tenerse en cuenta si se desea. El uso de cajas cuadradas es relativamente reciente, y la mayoría de las máquinas antiguas todavía en servicio, utilizan cajas circulares.

La máquina de corte directo es mucho más adaptable a los equipos electrónicos de medición, de forma que no se requiera la presencia continua de un operario para efectuar ensayos consolidados- drenados, que puedan durar varios días.

Se ha encontrado que los parámetros de suelo  $\tau$  y  $c$  (esfuerzo y cohesión respectivamente), obtenidos por el método de corte directo son casi tan confiable.

➤ **Limitaciones del ensayo de corte directo**

La muestra está obligada a fallar en un plano predeterminado.

La distribución de esfuerzos en ésta superficie no es uniforme.

No es posible controlar el drenaje de la muestra, sólo se puede variar la velocidad de desplazamiento.

No puede medirse la presión de poros.

Las deformaciones aplicadas están limitadas por recorrido máximo de la caja.

El ensayo usa una muestra muy pequeña, con el consiguiente resultado de que los errores de preparación son relativamente importantes.

### **3.10.1.2 Granulometría**

El análisis granulométrico se llama también análisis mecánico y consiste en la determinación de los porcentajes de piedra, grava, arena, limo y arcilla que hay en una cierta masa de suelo. Los ensayos de granulometría tienen por finalidad determinar en forma cuantitativa la distribución de las partículas del suelo de acuerdo a su tamaño. Este método se usa en caso de que los suelos sean granulares lo

que permite fácilmente determinar los porcentajes mediante el uso de un juego de tamices. Estos tamices con aberturas calibradas, varían desde 10.16 cm que equivale a 4' hasta 0.074 mm que equivale al tamiz N° 200 que significa que una pulgada está dividida en 200 partes iguales.

**TABLA N° 1 : Clasificación de Suelos según AASHTO**

CLASIFICACION GENERAL	Materiales Granulares (igual o menor del 35% pasa el tamiz N° 200)							Materiales Limo - Arcillosos (más del 35% que pasa el tamiz N° 200)			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
GRUPOS	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5
SUB - GRUPOS	A-1-a	A-1-b	A-3	A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7	A-4	A-5	A-6	A-7-6
% que pasa el Tamiz:											
N° 10	50 máx.										
N° 40	30 máx.	50 máx.	51 máx.								
N° 200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 mín.	36 mín.	36 mín.	36 mín.
Características del Material que pasa el tamiz N° 40											
Límite Líquido			NO PLÁSTICO	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 máx.
Índice de Plasticidad	6máx	6 máx.	PLÁSTICO	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.
Índice de Grupo	0	0	0	0	0	4 máx.	4 máx.	8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.
Tipos de Material	fragmentos de piedra grava y arena		Arena fina	Grava, arenas limosas y arcillosas				Suelos Limosos		Suelos Arcillosos	
Terreno de Fundación	Excelente a Bueno						Regular a Deficiente				

NOTA: El índice de plasticidad de los suelos A-7-5 es igual o menor que su Límite Líquido 30, el de los A-7-6 mayor que su Límite Líquido (fig. 1) se halla indicada la relación entre lo LL e IP de los materiales finos. Dicho de otro modo, el grupo A-7 es subdividido en A-7-5 ó A-7-6 dependiendo del Límite Plástico (L.P.)  
 Si el LP  $\geq$  30, la clasificación es A-7-6  
 Si el LP < 30, la clasificación es A-7-5

Tabla 3.8

### 3.1.10.3 Límites Atterberg

Los límites Atterberg (ASTM D4318) son empleados para determinar la plasticidad de suelos. El límite líquido define el límite entre los estados líquidos y plásticos, y el límite plástico entre los estados plásticos y sólidos. La diferencia entre estos dos valores de contenido de agua es el rango sobre el cual el suelo permanece plástico y se denomina el índice de plasticidad. Este parámetro se emplea para clasificar los suelos con el fin de estimar otras propiedades físicas.

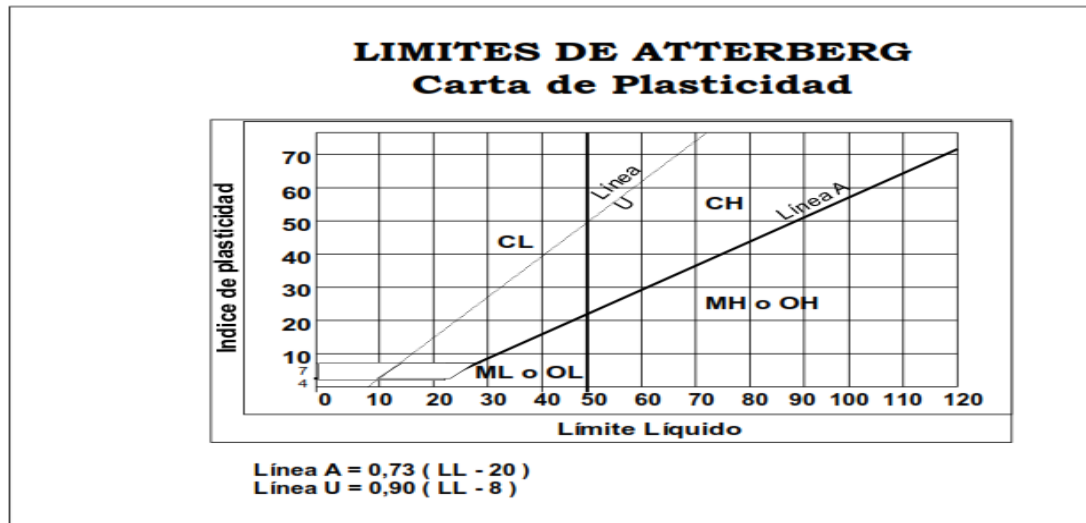


Tabla 3.9

#### 3.1.10.4 Compactación T-180

El propósito de un ensayo de compactación en laboratorio es determinar la curva de compactación para una determinada energía de compactación. Esta curva considera en abscisas el contenido de humedad y en ordenadas la densidad seca. A partir de ella se podrá obtener la humedad necesaria para obtener la densidad natural del terreno del terreno de taludes objeto a estudio.

#### 3.1.10.5 Densidad in situ

El poder conocer la densidad que posee un suelo en terreno o en su estado natural, ha sido un gran reto para los investigadores de mecánica de suelos y científicos del área en general. Se realiza esta determinación para comprobar el grado de compactación en rellenos compactados artificialmente.

Es muy útil en el caso de suelos sin cohesión (gravas y arenas), los cuales, por lo general no permiten obtener muestras inalteradas, y por medio de la densidad in situ se puede reproducir el suelo natural en la densidad natural a partir de una muestra alterada.

El método del cono de arena Básicamente el método consiste en determinar el peso del suelo húmedo de una pequeña excavación de forma irregular (hueco) hecho sobre la superficie del suelo.

### 3.1.10.6 Análisis estadístico

Para el análisis estadístico se procederá hacer analizar con la medida de tendencia central con la media aritmética para el análisis de las muestras Y la formula a utilizar es:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n Xi}{N}$$

$$\bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_n}{N}$$

Dónde:

$\bar{X}$  = Valor de la media aritmética

$X_1, X_2, X_3$  = Valores de muestras obtenidas.

N = Número de muestras.

Para conocer con detalle un conjunto de datos, no basta con conocer las medidas de tendencia central, sino que necesitamos conocer también la desviación que presentan los datos en su distribución respecto de la media aritmética de dicha distribución, con objeto de tener una visión de los mismos más acorde con la realidad al momento de describirlos e interpretarlos para la toma de decisiones.

Es por eso que se utilizara la desviación estándar para desestimar datos que no estén en un rango de correlación aceptable del 95%

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (xi - \bar{x})^2}{n - 1}$$

Donde

$X_i$  = Valor de cada muestra de observación

$\bar{x}$  = Valor de la media aritmética

$n$  = Número de muestras

También se realizará tabulaciones de datos más sus resultados, representaciones graficas del ensayo de corte directo y de la granulometría y de los límites Atterberg y en base a esto poder clasificar el suelo y sacar sus propiedad mecánicas del suelo.

## CAPÍTULO III

### SUELOS RESIDUALES

#### **2.1 Introducción.**

Los taludes (laderas, pendientes, etc.) de una región, debido a los materiales que los constituyen, tienen comportamientos distintos, en razón a la naturaleza de las rocas.

Este diferente comportamiento, se traduce entre otras formas, en deslizamientos y derrumbes, que constituyen un problema de vital importancia en nuestro territorio, de relieve bastante accidentado y de variada morfología.

Estos fenómenos comprometen la seguridad y estabilidad de las obras de Ingeniería, tales como: carreteras, hidroeléctricas, presas, túneles y canales; sus efectos, puede ser a menudo catastrófico, con la pérdida de considerables bienes y muchas vidas y también pueden causar la paralización parcial o total de estos proyectos, pueden interrumpir el tráfico vehicular por varios días y como consecuencia, encarecer los productos de primera necesidad, obligando, el desembolso de grandes sumas de dinero para su rehabilitación.

Tanto por el aspecto de inversión, como por las consecuencias derivadas de su falla, los taludes constituyen hoy una de las estructuras ingenieriles que exigen mayor cuidado por parte del proyectista. Con la expansión de las carreteras, provocaron los primeros intentos para realizar un estudio racional en este campo, pero no fue sino hasta la aparición de la Mecánica de los Suelos cuando fue posible aplicar al diseño de taludes normas y criterios.

Estas normas y criterios apuntan directamente a la durabilidad del talud, esto es a su estabilidad a lo largo del tiempo.

No hay duda de que el talud constituye la estructura más compleja de las vías terrestres por eso es preciso analizar la necesidad de definir criterios de estabilidad de taludes.

## **2.2 Definición de talud.**

Se entiende por talud a cualquier superficie inclinada respecto de la horizontal que hayan de adoptar permanentemente las estructuras de tierra. No hay duda que el talud constituye una estructura compleja de analizar debido a que en su estudio coinciden los problemas de mecánica de suelos y de mecánica de rocas, sin olvidar el papel básico que la geología aplicada desempeña en la formulación de cualquier criterio aceptable.

Cuando el talud se produce en forma natural, sin intervención humana, se denomina *ladera natural* o simplemente *ladera*. Cuando los taludes son hechos por el hombre se denominan cortes o taludes artificiales, según sea la génesis de su formación; en el corte, se realiza una excavación en una formación térrea natural (desmontes), en tanto que los taludes artificiales son los lados inclinados de los terraplenes.

## **2.3 Definición de estabilidad.**

Se entiende por estabilidad a la seguridad de una masa de *tierra* contra la falla o movimiento. Como primera medida es necesario definir criterios de estabilidad de taludes, entendiéndose por tales algo tan simple como el poder decir en un instante dado cuál será la inclinación apropiada en un corte o en un terraplén; casi siempre la más apropiada será la más inclinada que se sostenga el tiempo necesario sin caerse. Este es el centro del problema y la razón de estudio.

A diferentes inclinaciones del talud corresponden diferentes masas de material térreo por mover y por lo tanto diferentes costos. Podría imaginarse un caso en que por alguna razón el talud más conveniente fuese muy tendido y en tal caso no habría motivos para pensar en “problemas de estabilidad de taludes”, pero lo normal es que

cualquier talud funcione satisfactoriamente desde todos los puntos de vista excepto el económico, de manera que las consideraciones de costo presiden la selección del idóneo, que resultará ser aquél al que corresponda la mínima masa de tierra movida, o lo que es lo mismo el talud más empinado.

Es práctica común en ingeniería definir la estabilidad de un talud en términos de un factor de seguridad (FS), obtenido de un análisis matemático de estabilidad. El estudio debe tener en cuenta la mayoría de los factores que afectan la estabilidad. Estos factores incluyen geometría del talud, parámetros geológicos, presencia de grietas de tensión, cargas dinámicas por acción de sismos, flujo de agua, propiedades de los suelos.

### **2.3.1 Parámetros geométricos**

La conformación topográfica del talud: altura, pendiente, curvatura, largo y ancho, actuando en forma conjunta o separada, afectan la estabilidad de un talud, por cuanto determinan los niveles de esfuerzos totales y las fuerzas de gravedad que provocan los movimientos.

La topografía puede controlar la rata de meteorización y la rata de infiltración y movimiento de agua a través del material del talud, afectando la cantidad de agua disponible, lo cual determina la ocurrencia y características de los niveles freáticos.

El nivel de esfuerzos es también determinado por el volumen y ubicación de los bloques o masas de materiales, factores que dependen de las características topográficas.

Entre los parámetros topográficos a estudiar se pueden extraer los siguientes:

#### **2.3.1.1 Pendiente**

Los perfiles más profundos de meteorización se encuentran en los taludes suaves más que en los empinados. Para cada formación, en un estado determinado de

meteorización existe un ángulo de pendiente a partir del cual un talud es inestable. Mientras algunos suelos residuales de origen ígneo permiten ángulos del talud superiores a  $45^\circ$ , en Lutitas meteorizadas saturadas éste no debe exceder los  $20^\circ$  y hasta valores de la mitad del ángulo de fricción.

Según Skempton, teóricamente en suelos granulares limpios y secos el ángulo de inclinación del talud con la horizontal no debe sobrepasar el del ángulo de fricción del material.

### **2.3.1.2 Curvatura**

Se define como concavidad o convexidad ya sea tanto en sentido longitudinal como transversal y afecta el equilibrio de la masa en sí, así como la capacidad de infiltración y de erosión por su efecto en la velocidad del agua de escorrentía.

### **2.3.1.3 Largo - ancho**

Entre más largo sea un talud, mayor recorrido tendrán las aguas de escorrentía sobre éste y por lo tanto el talud estará más expuesto a la erosión superficial.

### **2.3.1.4 Áreas de infiltración arriba del talud**

Es importante identificar áreas de concentración de agua arriba del talud, que coinciden con depresiones topográficas o zonas de regadío intenso. Entre más grande sea la zona que aporte agua al talud, será mayor la cantidad de agua que está afectando la estabilidad del talud.

## **2.3.2 Parámetros Geológicos**

La Geología generalmente, define las características o propiedades del suelo o roca. La formación geológica determina la presencia de materiales duros o de baja resistencia y las discontinuidades pueden facilitar la ocurrencia de movimientos a lo largo de ciertos planos de debilidad.

Los elementos geológicos principales a estudiar son los siguientes:

### **2.3.2.1 Formación Geológica**

Los materiales de origen igneo-metamórfico poseen un comportamiento diferente a los suelos de origen sedimentario, aluviones, coluviones, etc.

### **2.3.2.2 Estructura y discontinuidades**

En los suelos residuales y rocas la estratificación y las discontinuidades actúan como planos de debilidad o como conductores de corrientes de agua subterránea y las características de estas pueden facilitar los movimientos.

### **2.3.2.3 Meteorización**

La descomposición física o química produce alteraciones en la roca o suelo, las cuales modifican substancialmente los parámetros de resistencia y permeabilidad, facilitando la ocurrencia de deslizamientos.

### **2.3.3 Parámetros Hidrológicos e Hidrogeológicos**

Los cambios en el régimen de aguas subterráneas actúan como detonadores de movimientos en las laderas o taludes y estos se encuentran generalmente, relacionados con las lluvias y la hidrología superficial.

En un estudio de deslizamientos se deben tener en cuenta los parámetros relacionados con la hidrogeología y en especial los siguientes factores:

#### **2.3.3.1 Características de las lluvias**

La ocurrencia de períodos lluviosos intensos produce ascensos en los niveles piezométricos y la saturación disminuye las tensiones capilares.

### **2.3.3.2 Régimen de aguas subterráneas**

Los niveles de agua freáticas pueden fluctuar de manera considerable con el tiempo y modificar la resistencia de los materiales y el estado de esfuerzos.

Es importante determinar las áreas de recarga y descarga, partiendo de la base del conocimiento del clima regional y análisis del terreno, incluyendo el tipo y distribución de la roca, fallas, fracturas, manantiales y humedales.

### **2.3.4 Parámetros Geotécnicos**

#### **2.3.4.1 Resistencia al Cortante**

La resistencia al corte representa la modelación física del fenómeno de deslizamiento.

Los parámetros de ángulo de fricción y cohesión determinan el factor de seguridad al deslizamiento de una determinada superficie dentro del terreno.

Los ángulos de fricción varían de cero en materiales muy blandos, a 50 grados en gravas angulosas o mantos de arenisca y las cohesiones de cero en materiales granulares limpios, a más de 10 Kg/cm<sup>2</sup> en suelos muy bien cementados y valores superiores en las rocas masivas.

#### **2.3.4.2 Permeabilidad**

La permeabilidad mide la resistencia interna de los materiales al flujo del agua y puede definir el régimen de agua subterránea, concentración de corrientes, etc.

Los valores del coeficiente de permeabilidad varían de 100 cm/seg., en roca fracturada o suelos compuestos por arenas y gravas, hasta 10<sup>-10</sup> cm/seg., en arcillas impermeables o en pizarras y granitos sanos.

#### **2.3.4.3 Sensitividad**

La sensitividad se define como la relación de la resistencia pico al corte entre una muestra inalterada y otra re moldeada. En algunos suelos arcillosos esta relación puede ser hasta de 4, lo que equivale a que se pierde gran parte de la resistencia al re moldearse; y en la literatura se conoce de casos catastróficos, donde por acción del cambio de esfuerzos, el suelo se remoldea in situ, pierde su resistencia y se produce el deslizamiento.

#### **2.3.4.4 Expansividad**

Los suelos arcillosos al contacto con el agua expanden su volumen produciéndose movimientos de extensión dentro de la masa del suelo. En suelos sensitivos se puede producir pérdida de resistencia al corte por acción del remoldeo generado por el proceso expansivo, factor que se ha detectado en suelos de origen volcánico en el suroccidente de Colombia.

La expansividad de un suelo se puede medir por medio de ensayos de presión de expansión o expansión libre o por su relación con los límites de plasticidad. La expansividad de suelos arcillosos en los rellenos de juntas puede generar deslizamientos de rocas.

#### **2.3.4.5 Erosionabilidad**

La erosionabilidad es la facilidad con la cual el suelo puede ser desprendido y transportado por acción del agua. Este factor puede afectar la estabilidad de un talud, en cuanto produce cambios topográficos desestabilizantes o genera conductos internos de erosión.

#### **2.3.5 Parámetros ambientales y antrópicos**

El clima ejerce una influencia en la rata de meteorización. Según Blight las reacciones químicas se duplican con cada 10oC de aumento de la temperatura.

Factores tales como: evaporación, fuerzas sísmicas, vegetación y modificaciones causadas por el hombre, pueden producir alteración del talud lo cual afecta su inestabilidad.

#### 2.4 Caracterización del perfil de suelos residuales

El perfil de meteorización es muy importante en la estabilidad de los taludes en un suelo residual, porque este generalmente controla la superficie de falla potencial, el mecanismo de falla, el régimen de hidrología subterránea y la distribución de la presión de poros (Brand, 1985). Generalmente, los perfiles de los suelos residuales se componen de zonas de diferente meteorización que van desde el suelo propiamente dicho hasta la roca sana.

Se han tratado de definir zonas homogéneas, pero en la práctica no existe zonificación real dentro de un perfil, sino un cambio gradual de las características de los materiales con la profundidad, incluso es muy difícil definir en forma precisa el límite de la roca sana con el suelo residual o la roca descompuesta (Saprolito).

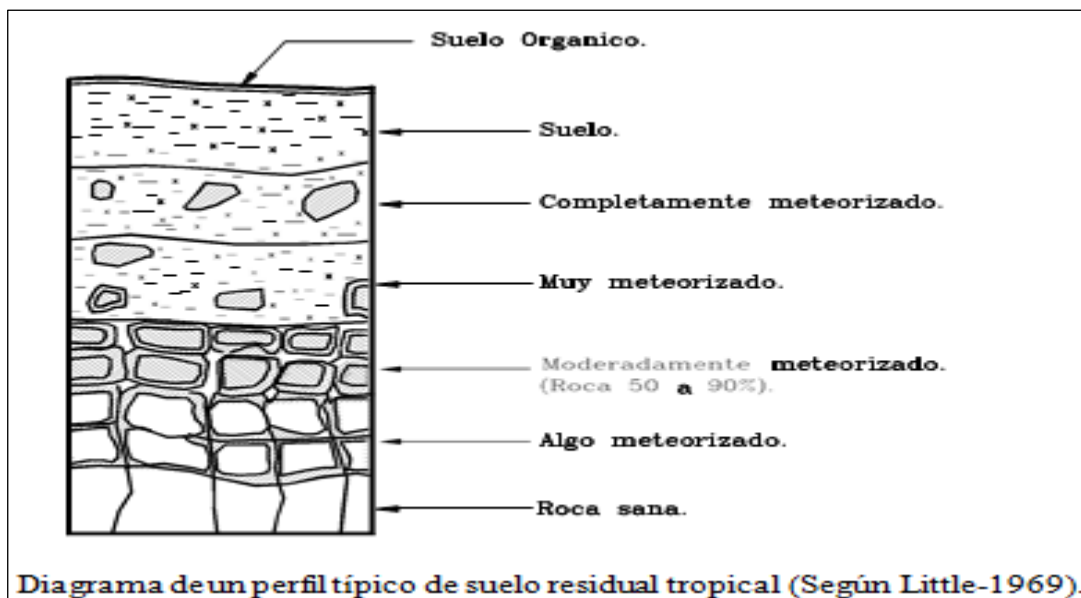


Fig. 2.1

Como los suelos residuales se descomponen de la roca parental, el perfil de suelo representa una historia del proceso de meteorización. Los sistemas de clasificación de perfiles presentan diferentes estados de meteorización y separan los perfiles verticales en diferentes zonas.

La permeabilidad y la resistencia al cortante varían gradualmente con la profundidad, las cuales controlan la respuesta a la infiltración de la lluvia y la localización de las superficies de falla.

Los espesores del perfil de suelo y las propiedades dependen de la roca parental, discontinuidades, topografía y clima. Como estos factores varían horizontalmente, el perfil puede variar en distancias relativamente cortas. Además se forman perfiles muy profundos en regiones tropicales en donde los agentes meteorizadores son especialmente fuertes.

Las discontinuidades afectan en forma significativa la permeabilidad y la resistencia al cortante de la masa de suelo, por esta razón en los ensayos de laboratorio de muestras relativamente pequeñas se obtienen coeficientes de permeabilidad y resistencias al cortante muy diferentes a la realidad.

A medida que se avanza en el perfil las propiedades de los suelos van cambiando en forma rápida y esto dificulta no solamente los ensayos sino los análisis, debido a que la estructura del material se vuelve muy importante a medida que se va profundizando, pasando de un comportamiento de suelo a un comportamiento de roca.

Sistema de clasificación del perfil de meteorización empleado en Hong Kong (Oficina de control geotécnico, 1979)

Grado	Descomposición	Detalles de diagnóstico en las muestras
VI	Suelo	No aparece textura reconocible de roca. Las capas superficiales pueden contener materia orgánica y raíces.
V	Completamente descompuesta	Roca completamente descompuesta pero aún aparece textura de roca ligeramente reconocible.
IV	Muy descompuesta	Pedazos grandes que pueden ser destruidos con las manos.
III	Moderadamente descompuesta	Pedazos grandes que no pueden ser descompuestos por las manos (muestras tomadas con broca a rotación).
II	Algo descompuesta	Aparece como roca sana pero tiene manchas muestras de descomposición.
I	Roca sana	

Tabla 2.1

La variabilidad de las propiedades de resistencia, humedad y permeabilidad, a través del perfil dificulta la utilización de los modelos tradicionales de la mecánica de los suelos "homogéneos e isotrópicos".

Otros elementos disturbantes son las discontinuidades y la presencia de bloques de materiales diferentemente meteorizados. Las características de un perfil de suelo residual dependen del tipo y propiedades de la roca originaria. Los perfiles son marcadamente diferentes para formaciones de origen igneo-metamórfico y para formaciones sedimentarias.

Los perfiles de suelos residuales producto de rocas foliadas o estratificadas son marcadamente isotrópicos y generalmente son más débiles y permeables a lo largo de los planos de orientación (Sowers, 1985).

## 2.5 Equilibrio límite y factor de seguridad

El análisis de los movimientos de los taludes o laderas durante muchos años se ha realizado utilizando las técnicas del equilibrio límite. Este tipo de análisis requiere

información sobre la resistencia del suelo, pero no se requiere sobre la relación esfuerzo-deformación.

El sistema de equilibrio límite supone que en el caso de una falla, las fuerzas actuantes y resistentes son iguales a lo largo de la superficie de falla equivalentes a un factor de seguridad de 1.0.

El análisis se puede realizar estudiando directamente la totalidad de la longitud de la superficie de falla o dividiendo la masa deslizada en tajadas o dovelas. Cada día se han mejorado los sistemas de Dovelas desarrollados a inicios del siglo XX y existe.

Método	Superficies de falla	Equilibrio	Características
Ordinario o de Fellenius (Fellenius 1927)	Circulares	De fuerzas	Este método no tiene en cuenta las fuerzas entre las dovelas y no satisface equilibrio de fuerzas, tanto para la masa deslizada como para dovelas individuales. Sin embargo, este método es muy utilizado por su procedimiento simple. Muy impreciso para taludes planos con alta presión de poros. Factores de seguridad bajos.
Bishop simplificado (Bishop 1955)	Circulares	De momentos	Asume que todas las fuerzas de cortante entre dovelas son cero. Reduciendo el número de incógnitas. La solución es sobre determinada debido a que no se establecen condiciones de equilibrio para una dovela.
Janbú Simplificado (Janbú 1968)	Cualquier forma de superficie de falla.	De fuerzas	Al igual que Bishop asume que no hay fuerza de cortante entre dovelas. La solución es sobre determinada que no satisface completamente las condiciones de equilibrio de momentos. Sin embargo, Janbú utiliza un factor de corrección $F_0$ para tener en cuenta este posible error. Los factores de seguridad son bajos.
Sueco Modificado. U.S. Army Corps of Engineers (1970)	Cualquier forma de la superficie de falla.	De fuerzas	Supone que las fuerzas tienen la misma dirección que la superficie del terreno. Los factores de seguridad son generalmente altos.

Lowe y Karafiath (1960)	Cualquier forma de la superficie de falla.	De fuerzas	Asume que las fuerzas entre partículas están inclinados a un ángulo igual al promedio de la superficie del terreno y las bases de las dovelas. Esta simplificación deja una serie de incógnitas y no satisface el equilibrio de momentos. Se considera el más preciso de los métodos de equilibrio de fuerzas.
Spencer (1967)	Cualquier forma de la superficie de falla.	Momentos y Fuerzas	Asume que la inclinación de las fuerzas laterales son las mismas para cada tajada. Rigurosamente satisface el equilibrio estático asumiendo que la fuerza resultante entre tajadas tiene una inclinación constante pero desconocida.
Morgenstern y Price (1965)	Cualquier forma de la superficie de falla.	Momentos y Fuerzas	Asume que las fuerzas laterales siguen un sistema predeterminado. El método es muy similar al método Spencer con la diferencia que la inclinación de la resultante de las fuerzas entre dovelas se asume que varía de acuerdo a una función arbitraria.
Sarma (1973)	Cualquier forma de la superficie de falla.	Momentos y Fuerzas	Asume que las magnitudes de las fuerzas verticales siguen un sistema predeterminado. Utiliza el método de las dovelas para calcular la magnitud de un coeficiente sísmico requerido para producir la falla. Esto permite desarrollar una relación entre el coeficiente sísmico y el factor de seguridad. El factor de seguridad estático corresponde al caso de cero coeficientes sísmicos. Satisface todas las condiciones de equilibrio; sin embargo, la superficie de falla correspondiente es muy diferente a la determinada utilizando otros procedimientos más convencionales.
Elementos finitos	Cualquier forma de la superficie de falla.	Analiza esfuerzos y deformaciones.	Satisface todas las condiciones de esfuerzo. Se obtienen esfuerzos y deformaciones en los nodos de los elementos, pero no se obtiene un factor de seguridad.
Espiral logarítmica	Espiral logarítmica	Momentos y fuerzas.	Existen diferentes métodos con diversas condiciones de equilibrio.

Tabla 2.2 Métodos de análisis de estabilidad de taludes

El Factor de Seguridad es empleado por los Ingenieros para conocer cual es el factor de amenaza de que el talud falle en las peores condiciones de comportamiento para el cual se diseña. Fellenius (1927) presentó el factor de seguridad como la relación entre la resistencia al corte real, calculada del material en el talud y los esfuerzos de corte críticos que tratan de producir la falla, a lo largo de una superficie supuesta de posible falla:

$$F_s = \frac{\text{resistencia al corte}}{\text{resistencia al cortante}}$$

En superficies circulares donde existe un centro de giro y momentos resistentes y actuantes:

$$F_s = \frac{\text{momento resistente}}{\text{momento actuante}}$$

Existen, además, otros sistemas de plantear el factor de seguridad, tales como la relación de altura crítica y altura real del talud y método probabilístico.

La mayoría de los sistemas de análisis asumen un criterio de “equilibrio límite” donde el criterio de falla de Coulomb es satisfecho a lo largo de una determinada superficie

## 2.6 Métodos de análisis

A continuación se presentan algunos métodos de análisis universalmente conocidos para el cálculo del Factor de Seguridad.

### 2.6.1 Método Ordinario o de Fellenius

Conocido también como método Sueco, método de las Dovelas o método U.S.B.R. Este método asume superficies de falla circulares, divide el área de falla en tajadas verticales, obtiene las fuerzas actuantes y resultantes para cada tajada y con la sumatoria de estas fuerzas obtiene el Factor de Seguridad.

Una vez hecho esto, se calcula el equilibrio de cada una de las dovelas, para finalmente analizar el equilibrio global, obteniéndose así un Factor de Seguridad (FS), al que se le puede definir como la relación entre fuerzas o momentos resistentes y fuerzas o momentos actuantes según sea el método, sobre la masa a deslizarse.

Las fuerzas que actúan sobre una dovela son.

- a. El peso o fuerza de gravedad, la cual se puede descomponer en una tangente y una normal a la superficie de falla.

b. Las fuerzas resistentes de cohesión y fricción que actúan en forma tangente a la superficie de falla.

c. Las fuerzas de presión de tierras y cortante en las paredes entre dovelas, las cuales no son consideradas por Fellenius, pero sí son tenidas en cuenta en otros métodos de análisis más detallados.

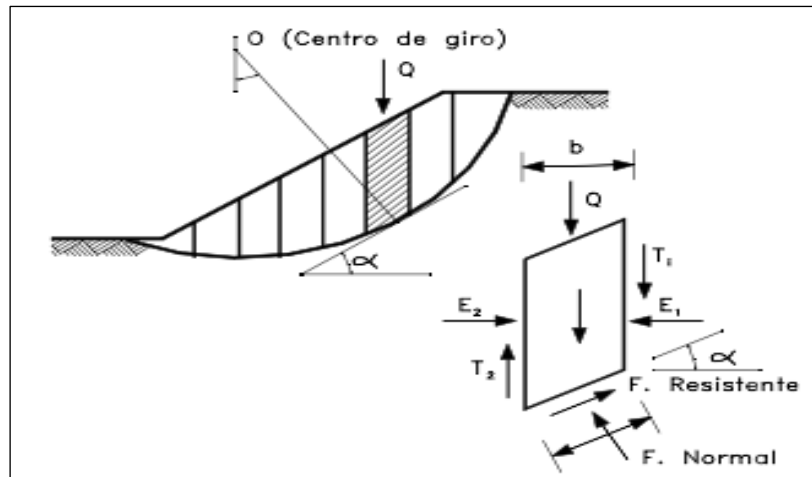


Fig. 2.2

Fuerzas que actúan sobre una dovela en los métodos de dovelas.

El método de Fellenius calcula el Factor de seguridad con la siguiente expresión:

$$F.S = \frac{\sum [Cb \sec \alpha + (W \cos \alpha - ub \sec \alpha) \tan \theta]}{\sum W \sin \alpha}$$

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

$W$  = Peso total de cada tajada.

$u$  = Presión de poros =  $\gamma_w h_w$

$b$  = Ancho de la tajada

$C', \theta$  = Parámetros de resistencia del suelo.

### 2.6.2 Método de Bishop

Bishop (1955) presentó un método utilizando Dovelas y teniendo en cuenta el efecto de las fuerzas entre las Dovelas.

Debido a que el método de las rebanadas o dovelas no es muy preciso para suelos friccionantes, Bishop (1955) propuso otro método originalmente desarrollado para superficies de fallas circulares, el cual considera la condición de equilibrio entre las fuerzas de interacción verticales actuantes entre las rebanadas.

El cálculo de la metodología original se basa en buscar el equilibrio de momentos respecto al centro del arco circular que coincide con la superficie de falla; en la posterior versión modificada, se puede aplicar a superficies no curvas, teniendo que definir centros ficticios. Este es un método iterativo en el cual se parte de un Factor de Seguridad calculado de una superficie falla dada.

$$F.S = \frac{\sum [c \cdot B + (W - u \cdot B) \cdot c/ma]}{\sum W \operatorname{sen} \alpha}$$

$$ma = 1 + \frac{\operatorname{Tan} \alpha \cdot \operatorname{Tan} \theta}{FS}$$

W : Peso de la dovela

u : Presión de poros.

B : Base de la dovela

c : Cohesión del suelo

$\varphi$ : Ángulo de fricción del suelo.

$\alpha$ : Ángulo de la superficie de falla en la dovela.

FS : Factor de seguridad.

### 2.6.3 Método de Janbú

Janbú (1973) presenta un método de Dovelas para superficies de falla curvas, no circulares.

Diseñado para superficies no necesariamente circulares, también supone que la interacción entre rebanadas es nula, pero a diferencia de Bishop, este método busca el equilibrio de fuerzas y no de momentos. Experiencias posteriores hicieron ver que la interacción nula en el caso de equilibrio de fuerzas era demasiado restrictiva, lo que obligó a introducir un factor de corrección  $f$  o empírico aplicable al FS

De acuerdo con Janbú (ecuación modificada):

$$F.S = \frac{f_0 \cdot \sum [c \cdot B + (W - u \cdot B) \cdot \tan \theta] / \cos \alpha \cdot m_a}{\sum W \tan \alpha}$$

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

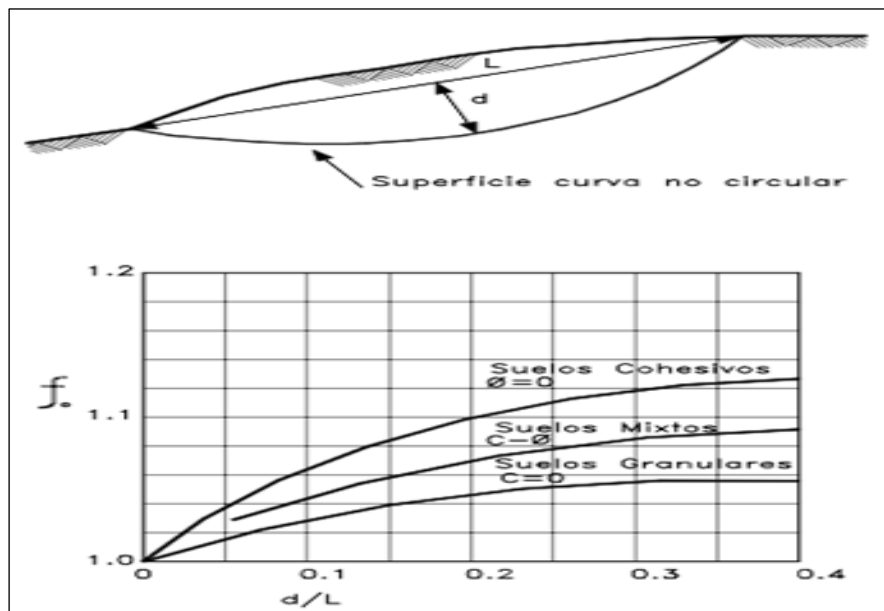


Fig. 2.3 Diagrama para determinar el factor  $f_0$  para el método de Janbú.

$W$  : Peso de la dovela.

$u$  : Presión de poros.

$B$  : Base de la dovela.

$c$  : Cohesión del suelo.

$\varphi$ : Ángulo de fricción del suelo.

$\alpha$ : Ángulo de la superficie de falla en la dovela.

$f_0$  : Factor de corrección.

$FS$  : Factor de seguridad.

## **2.7 Análisis de estabilidad de taludes en roca**

Con excepción de los casos de rocas sanas completamente sin fracturas, los cuales son muy raros, la mayoría de las masas de roca deben ser consideradas como un ensamble de bloques de roca intacta, delimitados en tres dimensiones por un sistema o sistemas de discontinuidades.

Estas discontinuidades pueden ocurrir de una forma errática o en forma repetitiva como grupos de discontinuidades. Este sistema de discontinuidades usualmente, se le conoce como fábrica estructural de la masa de roca y puede consistir de orientación de granos, estratificación, juntas, foliaciones y otras discontinuidades de la roca. La resistencia de la roca a lo largo de la estratificación es diferente a la resistencia normal a la estratificación.

### **2.7.1 Tipos de falla**

#### **2.7.1.1 Análisis de falla planar**

Las fallas planas ocurren a lo largo de una superficie aproximadamente plana y se analizan como un problema en dos dimensiones.

Aunque pueden existir otras discontinuidades que definen los límites laterales de los movimientos, solo se tiene en cuenta el efecto de la discontinuidad principal. El tamaño de las fallas planares puede ir desde unos pequeños metros cúbicos a montañas enteras.

El análisis cinemático tiene en cuenta cuatro condiciones estructurales así:

- a. La dirección de la discontinuidad debe estar a menos de 20 grados de la dirección de la superficie del talud.
- b. El buzamiento de la discontinuidad debe ser menor que el buzamiento de la superficie del talud.
- c. El buzamiento de la discontinuidad debe ser mayor que su ángulo de fricción.
- d. La extensión lateral de la masa potencial de falla debe ser definida por superficies laterales que no contribuyen a la estabilidad. Si las condiciones anteriores se cumplen la estabilidad puede evaluarse por el método del equilibrio límite. El análisis de estabilidad requiere la solución de fuerzas perpendiculares y paralelas a la superficie de falla potencial.

#### **2.7.1.2 Análisis de falla en cuña**

La falla en cuña ocurre cuando la masa de roca se desliza a lo largo de dos discontinuidades que se interceptan en un ángulo oblicuo a la superficie del talud.

La formación de una falla en cuña depende primordialmente, de la litología y de la masa de roca.

El análisis cinemático de una falla en cuña es controlado por la orientación de la línea de intersección de los dos planos. Las condiciones estructurales que se deben cumplir son las siguientes:

- a. La dirección de la línea de intersección debe ser aproximadamente cercana a la del buzamiento de la superficie del talud.
- b. El buzamiento de la línea de intersección debe ser menor que el de la superficie del talud.
- c. El buzamiento de la línea de intersección debe ser mayor que el ángulo de fricción promedio de las dos superficies.

### **2.7.1.3 Análisis de falla al volteo**

Las fallas al volteo ocurren en masas de roca que están subdivididas en una serie de columnas de gran buzamiento y con rumbo aproximadamente paralelo a la superficie del talud. En la falla al volteo la columna de roca rota alrededor de un punto cerca a la base de la misma columna. .

## **2.8 Función de acciones para la estabilidad.**

Los métodos de protección de taludes normalmente empleados tienen dos objetos principales: proteger el talud de la erosión o evitar su aflojamiento y la rotura progresiva subsiguiente.

## **CAPITULO III**

### **SUELOS RESIDUALES.**

#### **3.1 Introducción**

En su trabajo práctico el ingeniero civil ha de enfrentarse con muy diversos e importantes problemas planteados como ser en las carreteras la estabilidad de taludes en suelos residuales.

El suelo es el material de construcción más abundante del mundo y en muchas zonas constituye, de hecho, el único material disponible localmente. Cuando el ingeniero emplea el suelo como material de construcción, debe tomar en cuenta diversos factores como el origen, formación y constitución del suelo, para poder seleccionar el tipo más adecuado para ubicar la obra.

En las zonas tropicales, incluyendo el norte de Sur América y Venezuela, predominan los suelos originados por los productos de la meteorización que se acumulan en el sitio en el que se van formando; estos tipos de suelos se conocen como suelos residuales. Cuando factores climáticos como la lluvia y el viento, transportan o arrastran materia de los suelos residuales, y los depositan en otros lugares, se forman otros tipos de suelos conocidos como suelos transportados, entre los que se encuentran los formados por movimientos a causa de la gravedad, también conocido como coluviones, asociados generalmente a las laderas de los suelos residuales.

El concepto de suelo residual se opone al de suelo transportado, debido a que las características de ambos son muy diferentes. Los suelos transportados, como los coluviones, son por lo general depósitos sueltos y con bloques angulosos, mientras que los suelos residuales consisten en agregados o cristales de mineral meteorizado que se rompe y se vuelve progresivamente fino.

## 3.2 Conceptualización.

### 3.2.1 Principales tipos de suelos

De acuerdo con el origen de sus elementos, los suelos se dividen en dos amplios grupos; suelos cuyo origen se debe a la descomposición física o química de las rocas, o sea de los **suelos inorgánicos**, y los suelos cuyo origen es principalmente **orgánico**.

#### 3.2.1.1 Suelos orgánicos

Ellos se forman casi siempre in situ. Muchas veces la cantidad de materia orgánica, ya sea en forma de humus o de materia no descompuesta o en estado de descomposición, es tan alta con relación a la cantidad de suelo inorgánico que las propiedades que pudiera derivar de la porción mineral quedan eliminadas. Esto es muy común en las zonas pantanosas en las cuales los restos de vegetación acuática llegan a formar verdaderos depósitos de gran espesor, conocidos con el nombre genérico de turbas. Se caracterizan por su color negro o café oscuro por su poco peso cuando están secos y su gran compresibilidad y porosidad. La turba es el primer paso de la conversión de la materia vegetal en carbón.

#### 3.2.1.2 Suelos inorgánicos

El producto del intemperismo de las rocas permanece en el sitio donde se formó, da origen a un **suelo residual**; en caso contrario, forma **un suelo transportado**, cualquiera que haya sido el agente transportador (por gravedad: talud; por agua: aluviales o lacustres; por viento: eólicos; por glaciares: Depósitos glaciares).

Las condiciones climáticas en regiones tropicales con alta humedad y altas temperaturas determinan una intensa meteorización química, originando suelos residuales muy desarrollados. Su composición mineralógica, su fábrica y las condiciones geoquímicas del medio controlan el comportamiento geotécnico de estos suelos. Cuando se precipitan altos contenidos de hierro y aluminio se

forman **lateritas**. Si las condiciones de drenaje son deficientes pueden formarse los denominados **suelos negros**, ricos en esmectitas. Si el drenaje es alto se forman las **arcillas rojas**, ricas en halloysitas.

### 3.2.1.3 Suelos transportados

Los suelos transportados no hacen parte del objeto específico de este Informe, pero dado que son materiales comunes en la naturaleza es necesario hacer algunos comentarios. Los suelos derivados de sedimentos que se encuentran típicamente en las latitudes altas (depósitos glaciales, depósitos de gelifluxión, etc.) son por supuesto raros o desconocidos en los trópicos. Sin embargo son transportados por movimientos en las laderas como caída libre, deslizamientos, erosión laminar, flujos de lodo, o por actividad fluvial o eólica.

Suelos transportados y sedimentados. Puede ser mediante el agua de ríos (suelos aluviales), mar, lagos, glaciares, o del viento (dunas, depósitos eólicos), o por gravedad en laderas (suelos coluviales). El medio de transporte (que actúa a la vez como agente de erosión y medio de sedimentación), tiene una gran influencia en las propiedades del suelo resultante: distribución de tamaños de partículas, y forma y textura de las mismas. Así, los suelos eólicos suelen ser muy uniformes, mientras que los aluviales presentan un mayor grado de mezcla de tamaños, y los glaciares aún más.

Los rasgos útiles para el diagnóstico de los horizontes de suelo transportado incluyen: ausencia de estructura de roca, distribución selectiva por tamaño de partículas, estratificación débil, incremento de materiales finos en la dirección de la pendiente, ausencia o desarrollo débil de la estructura del suelo y presencia de material rocoso extraño procedente de sitios de la parte superior de la pendiente. La unión con el suelo residual infrayacente frecuentemente está marcado por cambios en la distribución del tamaño de partículas, en el color y en la composición química adicionalmente a la capa de grava o línea de piedras.

Los suelos enterrados en el coluvión frecuentemente indican dos o más episodios de depósito con periodos de estabilidad, posiblemente como resultado de cambios climáticos en el Cuaternario. Muchas corazas particularmente las lateritas de la parte inferior de las pendientes se han formado o cerca de la base de la capa transportada, y los óxidos de hierro cementantes fueron precipitados a partir del agua subterránea que fluía lateralmente sobre el saprolito o la roca infrayacentes.

### 3.2.1.4 Los suelos residuales

Los suelos residuales se originan de un suelo derivado por la meteorización y descomposición de la roca in situ, el cual no ha sido transportado de su localización original.

Son el producto de la meteorización en el sitio de las formaciones rocosas; también en algunas formaciones de suelos aluviales (depósitos causados por corrientes de agua), estos han sido meteorizados en tal forma que pueden asimilarse en su comportamiento a los suelos residuales. Los suelos residuales se les encuentra comúnmente acompañados por coluviones y un gran porcentaje de los movimientos de las laderas de suelos residuales están relacionados con la inestabilidad de los coluviones.

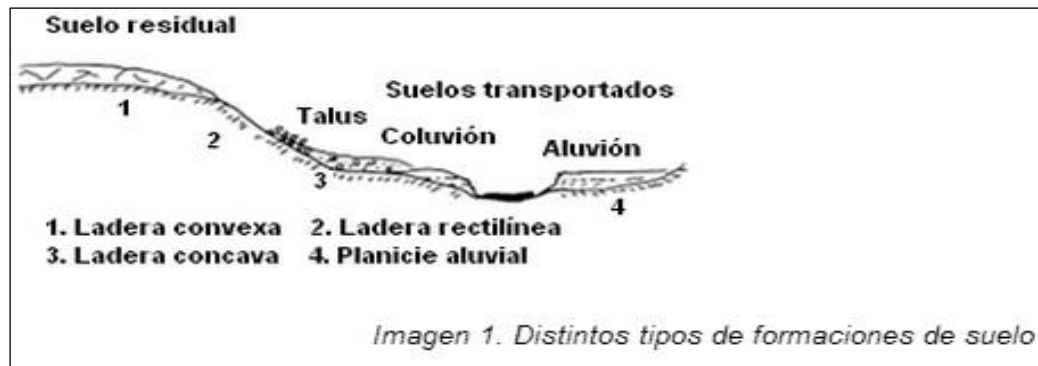


Fig. 3.1

A los suelos residuales se les encuentra predominantemente en las zonas tropicales, donde aparecen en grandes espesores y con frecuencia se les denomina como “suelos

tropicales”. La zona de suelos residuales se concentra en el sector norte de América del sur, Centroamérica, África, Australia, Oceanía y el sur de Asia. En Venezuela el suelo residual más típico es el jabre gallego o su equivalente (aunque con un tipo de meteorización, más caliente) el sauló catalán. Ambos son suelos residuales sobre granito de hasta 45m de profundidad aproximadamente.

Más comúnmente los suelos residuales están cubiertos por sedimentos arenosos o limosos tenuemente estratificados descritos frecuentemente como coluvión. En la base de este procedimiento se presenta frecuentemente una línea de piedras de grava que puede tener hasta 2 m de espesor, y que usualmente está compuesta de fragmentos de roca resistente. El proceso que da origen a las líneas de piedra es complejo e incluye una selección vertical por termitas y la formación de un pavimento de grava residual a medida que las partículas más finas son transportadas pendiente abajo por la escorrentía.

En las regiones semiáridas el pavimento de grava residual puede aparecer en la superficie. En las regiones húmedas la cubierta de la grava residual por un coluvión más fino puede indicar un cambio climático.

La estabilidad de taludes es particularmente complicada en un medio tropical, debido a que la mayoría de los suelos son residuales, además del régimen hidrológico complejo, la humedad ambiental, las temperaturas muy altas, la geología compleja, la topografía escarpada y los demás factores ambientales.

### **3.3 Características de suelos**

Los suelos tienen su origen en los macizos rocosos preexistentes que constituyen la roca madre, sometida a la acción ambiental disgregadora de la erosión (desgaste y fragmentación de material de la superficie terrestre, por agentes dinámicos como el agua y el viento) y la meteorización (desintegración física o descomposición química de las rocas). Cuando el suelo permanece in situ (en el lugar de formación) sin ser transportado, se le conoce como suelo residual.

Las características de los suelos residuales son muy diferentes a las de los suelos transportados. Por ejemplo, el concepto convencional de grano de suelo o tamaño de partícula es inaplicable a muchos suelos residuales, debido a que las partículas de suelo residual con frecuencia consisten en agregados o cristales de mineral meteorizado que se rompen y se vuelven progresivamente finos, si el suelo es manipulado. Lo que parece en el sitio como una grava arenosa puede convertirse en un limo fino durante las actividades de excavación, mezclado y compactación.

1.- El espesor de los suelos residuales es muy variable, dependiendo de la intensidad de la meteorización, pero también de la erosión física, ya que si esta es fuerte, los materiales serán arrastrados casi al mismo tiempo de su formación. Generalmente se observa que conforme las pendientes aumentan de inclinación, el suelo adelgaza.

2.- Para definir su comportamiento y la posibilidad de ocurrencia de deslizamientos, es importante estudiar las características del perfil de meteorización más que las propiedades del material en sí. El perfil de meteorización, es una secuencia de capas de materiales con diferentes propiedades que se encuentran encima o en un lugar próximo a la roca que les dio origen.

PERFIL ESQUEMÁTICO	GEOLOGICAL SOC. ENG. GROUP (1970)	DEERE Y PATTON (1971)
	ROCAS ÍGNEAS	ÍGNEAS Y METAMÓRFICAS
	VI SUELO RESIDUAL	HORIZONTE IA
	V COMPLETAMENTE ALTERADA	HORIZONTE IB
	IV ALTAMENTE ALTERADA	HORIZONTE IC (SAPROLITO)
	III MODERADAMENTE ALTERADA	IA TRANSICIÓN CON ROCA METEORIZADA SAPROLITO
	II DEBILMENTE ALTERADA	
	IB MUY POCO ALTERADA	IB PARCIALMENTE METEORIZADA
IA ROCA SANA	ROCA SANA	

Fig. 3.2 Perfil de meteorización según diferentes autores

3.- Son generalmente muy heterogéneos y difíciles de muestrear y ensayar.

4.- Se encuentran en estado húmedo no saturado, lo cual representa una dificultad para evaluar su resistencia al corte.

5.- Poseen zonas de alta permeabilidad, lo que los hace muy susceptibles a cambios rápidos de humedad y saturación.

### 3.3.1 Metodología para la caracterización integral de los suelos residuales

La caracterización de un suelo residual debido a su heterogeneidad, requiere de un análisis integral que tenga en cuenta todos los factores que afectan su comportamiento, lo cual incluye el grado y proceso de meteorización, su mineralogía, microestructura, discontinuidades, estado de esfuerzos, propiedades mecánicas, clasificación y caracterización del perfil.

En la tabla se muestra un resumen de los elementos, características y procedimientos de análisis para una caracterización integral.

Debe dedicarse esfuerzo especial a la determinación de la microestructura y estructura para de esta manera identificar las superficiales preferenciales de falla.

Metodología para la Caracterización integral de un suelo residual

Elemento	Factores a caracterizar	Procedimiento
<b>Medio Ambiente externo</b>	Topografía, régimen de lluvias, humedad ambiental, temperatura vegetación, sísmica, factores antrópicos.	Mediciones topográficas, hidrológicas, caracterización de cobertura vegetal. Índice climático.
<b>Litología</b>	Tipo de roca, minerales presentes, discontinuidades y microestructura de la roca original.	Caracterización geológica de los afloramientos de roca sana, secciones delgadas, micro petrografía.
<b>Estado de Meteorización</b>	Proceso de desintegración física y descomposición química. Grado de meteorización.	Ensayo de arenosidad, Martillo de Schmidth, índice micro petrográfico, ensayos de penetración.

<b>Mineralogía</b>	Minerales resultantes del proceso de meteorización, tipos y % de arcilla, sesquióxidos.	Análisis termo gravimétrico, escaneado con electro microscopio, Microscopio óptico, Difracción de rayos X.
<b>Microestructura</b>	Textura, Arreglo de partículas, Ensamble, Fábrica, matriz, tamaño de granos, terrones, sistema de soporte. Cementación entre partículas, Alteración o remoldeo, Anisotropía.	Análisis al microscopio y electro microscopio.
<b>Estructura</b>	Discontinuidades heredadas, juntas, diaclasas, foliaciones, estratificación, fallas intrusiones. Separación, continuidad, relleno y propiedades de las discontinuidades.	Análisis visual de apiques, sondeos y afloramientos de suelo residual. Microscopio óptico.
<b>Propiedades Mecánicas</b>	Resistencia al cortante, Cohesión y, ángulo de fricción de la masa de suelo y de las discontinuidades, envolventes de falla, Relación de vacíos, Permeabilidad, dispersividad, Factores que afectan estas propiedades.	Ensayos de campo y de laboratorio. Resistencia al cortante, permeabilidad, Peso unitario, relación de vacíos, porosidad, dispersividad.
<b>Régimen de aguas subterráneas</b>	Humedad, grado de saturación, succión, Posibilidad de aumento rápido de humedad, avance del frente húmedo. Régimen interno de agua permanente y ocasional.	Ensayos de humedad, succión, velocidad de avance del frente húmedo. Redes de movimiento de agua permanente y por acción de lluvias.
<b>Clasificación del suelo residual</b>	Definición de la unidad de suelo, grupo y subgrupo, utilizando todos los elementos anteriores.	Sistema FAO Sistema de Wesley Nombre especial del suelo.
<b>Caracterización del Perfil</b>	Definición de las características del perfil. Profundidad del perfil.	Clasificación por el Método de Hong Kong (grados I a VI).
<b>Superficies preferenciales de falla</b>	Superficie de falla, tipo de falla.	Análisis geotécnico incluyendo agua, sismo, etc.

Tabla 3.1

### 3.4 Proceso de meteorización

La meteorización es la respuesta de los materiales terrestres a un ambiente cambiante, se produce cuando la roca es fragmentada mecánicamente (desintegrada), alterada químicamente (descompuesta), o ambas cosas. La meteorización mecánica se lleva a cabo por fuerzas físicas que rompen la roca en trozos cada vez más pequeños sin modificar la composición mineral de la roca, mientras que la meteorización química implica una transformación química de la roca en uno o más compuestos nuevos

La composición y textura de las rocas madres son importantes en las etapas iniciales de la meteorización, pero se vuelven menos importantes con el tiempo. Las características climáticas tales como la cantidad de precipitación pluviométrica y particularmente, la distribución estacional de ésta, determinan la intensidad del proceso de meteorización. La topografía afecta el movimiento vertical del agua y, por consiguiente, a la velocidad de remoción de los materiales solubles. En taludes escarpados, el escurrimiento puede ser tan activo en la erosión del material meteorizado como lo es la filtración en su formación. El tipo y cantidad de vegetación pueden ser importantes en la formación de ácidos orgánicos y en la asimilación de sílice. Finalmente el tiempo es un factor decisivo, ya que, por ejemplo, en climas húmedos y calientes, típicos de los trópicos, el tiempo que se requiere para alterar un material rocoso es considerablemente menor que en los climas templados. La alteración de la roca a través de los procesos de meteorización se lleva a cabo en forma progresiva por medio de una serie de acontecimientos y etapas, los cuales dan como resultado un perfil de suelo residual meteorizado tropicalmente. Se define como perfil de meteorización de un suelo tropical a la secuencia de materiales con diferentes propiedades físicas formadas en el sitio donde se encuentra y el cual yace sobre la roca meteorizada. Los perfiles de meteorización cambian de un lugar a otro, debido a variaciones locales en el tipo y estructura de la roca madre, la topografía, la velocidad de erosión y las condiciones de agua subterránea además de las variaciones climáticas regionales, particularmente la pluviosidad.

En ambientes tropicales, dominados por temperaturas altas y cambiantes y por lluvias abundantes, la meteorización de los materiales es muy fuerte, caracterizándose por la descomposición rápida de feldespatos (mineral muy abundante de la corteza terrestre) y minerales ferro magnesianos, la concentración de óxidos de hierro y aluminio y la remoción de Sílice y de las bases  $\text{Na}_2\text{O}$  (óxido de sodio),  $\text{K}_2\text{O}$  (óxido de potasio)  $\text{CaO}$  (óxido de calcio) y  $\text{MgO}$  (óxido de magnesio). Los feldespatos se meteorizan inicialmente a Caolinita, Óxidos de Hierro y Óxidos de Aluminio y los compuestos más resistentes como las partículas de Mica y Cuarzo permanecen.

La meteorización de rocas y cenizas volcánicas conducen a la formación de Montmorillonitas (tipo de arcilla), Aloisitas, óxidos de hierro y aluminio en las etapas iniciales de la meteorización y finalmente se pueden formar Caolinitas, Esmeclitas y Gibsitas.

Algunas rocas que contienen sales como cloruro de sodio, ( $\text{NaCl}$ ), Cal ( $\text{CaSO}_4$ ) y Yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) se disuelven fácilmente en agua, especialmente en presencia de  $\text{CO}_2$  (dióxido de carbono), acelerando el proceso de meteorización; y a medida que este proceso continúa los contenidos de Caolinita disminuyen y se alteran los demás compuestos a  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (óxido férrico) y  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (óxido de aluminio).

### **3.4.1 Proceso de meteorización**

El Proceso de meteorización involucra principalmente tres etapas, las cuales son:

#### **3.4.1.1 Desintegración**

En esta etapa se abren las discontinuidades y se desintegra la roca, formándose nuevas discontinuidades por fracturación y las partículas se parten, aumentando la relación de vacíos y la permeabilidad y disminuyendo la cohesión. En la meteorización la sal es generalmente un silicato y es el mineral más soluble, especialmente en agua, y el producto de la reacción es una arcilla.

### 3.4.1.2 Descomposición

Durante esta etapa se incrementa el contenido de arcilla y de suelo en general y se disminuye la fricción. La descomposición puede ser ocasionada por procesos químicos o biológicos. Los procesos químicos incluyen la hidrólisis y el intercambio cationico, mientras que los procesos biológicos pueden incluir efectos de las raíces, oxidación bacteriológica y reducción de hierro y compuestos del azufre.

➤ **Hidrólisis**

El proceso químico más importante en la meteorización química es la hidrólisis. Esta ocurre cuando una sal se combina con agua para formar un ácido o una base.

➤ **Intercambio catiónico**

Es la descomposición de un mineral de arcilla para formar otro a través de la transferencia de iones entre soluciones percolantes y el mineral original. Los cationes tales como el sodio y el calcio son fácilmente intercambiables. El intercambio de cationes no altera la estructura básica del mineral de arcilla pero modifica el espaciamiento entre capas, convirtiendo por ejemplo una illita en una motmorillonita.

### 3.4.1.3 Oxidación y recementación

El proceso de oxidación ocurre cuando en cualquier reacción química un compuesto o radical pierde electrones. El elemento oxígeno no está necesariamente presente.

En la oxidación se aumenta el contenido de óxidos de hierro y aluminio, los cuales pueden cementar grupos de partículas aumentando la cohesión y el suelo tiende a estabilizarse.

En la mayoría de los procesos de meteorización en las rocas ígneas predominan los procesos químicos, mientras en las rocas sedimentarias predominan los procesos físicos, sin embargo estos procesos se interrelacionan.

La meteorización generalmente, avanza hacia abajo de la superficie y a través de las juntas y demás conductos de percolación (poros), produciendo variaciones de intensidad de meteorización y dejando bloques internos de material no descompuesto.

Cuando la meteorización está comenzando los bloques son grandes y controlan en parte el comportamiento del talud, pero a medida que se hace más intensa el factor más importante es la resistencia del suelo meteorizado que actúa como matriz de los bloques independientes.

Minerales resultantes

Durante las etapas de meteorización, se van formando diferentes productos minerales, que se presentan a continuación:

➤ **Caolinita**

Los suelos con caolinita como mineral de arcilla presentan un comportamiento normal en los ensayos, en términos de baja a media plasticidad (capacidad de resistir deformaciones sin romperse o agrietarse) y permeabilidad (capacidad de ser atravesado por un fluido sin alterar su estructura interna). El efecto del aumento de humedad (cantidad de agua por volumen de muestra) sobre las propiedades del suelo generalmente, no es importante.

➤ **Montmorillonita**

Los materiales con contenidos apreciables de Montmorillonita poseen muy alta plasticidad y baja permeabilidad. El efecto del aumento de humedad puede resultar en una disminución importante de la resistencia a los esfuerzos cortantes. La Montmorillonita tiene un alto nivel de reacción con el cemento y la cal.

➤ **Aloisita**

Al aumentar la humedad de una aloisita puede disminuir la resistencia a los esfuerzos cortantes en forma apreciable.

### ➤ Sesquióxidos

Los sesquióxidos generalmente, cementan las partículas y su presencia equivale a una reducción en la plasticidad. Los óxidos de hierro y aluminio se acumulan como consecuencia de una cadena de procesos químicos y de lavado interno.



Fig. 3.3

## 3.4.2 Factores que afectan el proceso de meteorización

### 3.4.2.1 Efecto del clima

El clima ejerce una profunda influencia en la meteorización, especialmente la humedad relativa y la temperatura. Las reacciones químicas prácticamente se duplican con cada aumento de 10°C de temperatura.

En las zonas tropicales y subtropicales donde la superficie de la tierra está cubierta por una vegetación densa que facilita la infiltración del agua, por aumento de los tiempos de retención del agua, y que a su vez son sujetas a lluvias fuertes, pueden aparecer profundidades de meteorización de varios cientos de metros.

En climas secos o áridos la meteorización química es superficial, lenta y predominan los fenómenos de meteorización de tipo mecánico, igualmente esto ocurre en zonas tropicales montañosas, con poca vegetación, donde las pendientes altas del terreno no facilitan la infiltración del agua lluvia.

#### **3.4.2.2 Efecto de otros factores**

La frecuencia o espaciamiento de las discontinuidades (alteraciones súbitas en las propiedades físicas) afecta el proceso de meteorización y en los sitios en los cuales el espaciamiento de las discontinuidades es mayor, pueden aparecer masas de materiales no descompuestos como es el caso de los "Tors" o masas de granito sólido.

Las plantas y organismos vivos, tales como bacterias ayudan en el proceso de meteorización química. Otros elementos ambientales pueden incidir en la meteorización, pero sobre todo las condiciones de humedad y temperatura.

La topografía del terreno es un factor muy importante, ya que la meteorización es mayor en los sitios de menor pendiente y la profundidad de la meteorización aumenta hacia abajo del talud.

### **3.5 Medición del grado de meteorización**

El grado de meteorización puede medirse

#### **3.5.1 Arenosidad**

La forma más sencilla es utilizando un cuchillo o una puntilla y medir la facilidad con que se puede cortar o el índice de arenosidad.

Medición del grado de descomposición de feldespatos mediante el ensayo de arenosidad.

<b>Grado de descomposición</b>	<b>Términos de arenosidad</b>	<b>Modo de reconocimiento</b>
Fresco	Duro	No puede ser cortado por un cuchillo
Moderado	Arenoso	Puede ser cortado con un cuchillo o gravado por una puntilla
Alto	Deleznable	Puede ser desmoronado a fragmentos más pequeños
Completo	Blando	Puede ser moldeado fácilmente con las manos

Tabla 3.2

### 3.6 Microestructura de los suelos residuales

Los términos microestructura, fábrica y textura se refieren al arreglo físico de los granos o partículas. Este arreglo junto con la mineralogía, el grado de meteorización y la estructura de discontinuidades determina el comportamiento ingenieril de la mayoría de los suelos residuales. La microestructura incluye la microfábrica, la composición y las fuerzas entre partículas. Las investigaciones de microestructura se realizan utilizando microscopios ópticos o microscopios electrónicos. La cementación de grupos de partículas es responsable de altas relaciones de vacíos, bajas densidades, altas resistencias, baja compresibilidad y alta permeabilidad. Generalmente la microestructura se analiza en dos niveles: Textura y Fábrica.

#### 3.6.1 Textura

La textura puede revelar la orientación entre las partículas de cementación (proceso mediante el cual los poros de una roca se rellenan por minerales) y el contacto entre ellas. La textura tiene que ver con la facilidad con que se puede trabajar el suelo, la

cantidad de agua y aire que retiene y la velocidad con que el agua penetra en el suelo y lo atraviesa. La textura indica el contenido relativo de partículas de diferente tamaño, como la arena, el limo y la arcilla.

La influencia de la textura en las propiedades ingenieriles de los suelos tropicales fue enunciada por Terzaghi describiendo la arcilla en una presa, sobre la base de que ella ocurría en grupos densos de partículas de arcilla cementados por óxido de hierro.

### 3.6.2 Arreglo elemental de partículas

Corresponde a la localización en el espacio de las partículas entre sí. Las partículas arcillosas pueden encontrarse en arreglos desordenados, paralelos o en racimos y las partículas granulares (Arenas y limos) en agrupaciones de partículas con los contactos limpios o cubiertos de otro material, generalmente de arcilla.

La mayoría de los suelos tropicales son susceptibles a descomposición física por la manipulación de los “terrones o racimos” que se forman. El rompimiento de estos racimos dificulta la determinación exacta de sus propiedades físicas y complica el proceso de compactación en el campo.

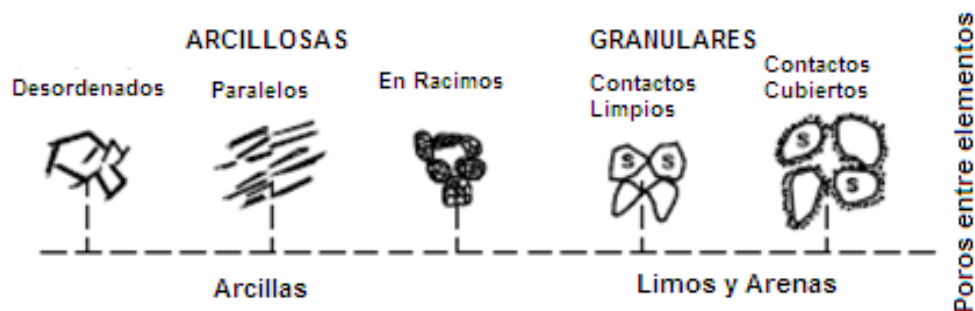


Fig. 3.4 Arreglo elemental de partículas

### 3.6.3 Ensamble

El ensamble de las partículas corresponde a la forma como interactúan las partículas unas con respecto a las otras. El ensamble presupone la existencia de una matriz, la

cual puede ser arcillosa o granular y se forma por la agregación o la unión de las partículas.

La disolución y lavado de la matriz o las uniones y la cementación conducen al desarrollo de una estructura porosa. Este efecto es producto de la frecuente ocurrencia de lluvias y por esto es necesario analizar el efecto de las lluvias sobre los poros y uniones entre las partículas. El ensamble puede ser modificado por el flujo de corrientes de agua.

### **3.6.4 Fábrica**

La fábrica muestra la organización general de los grupos de partículas. El sistema de fábrica puede ser de tres formas:

#### **3.6.4.1 Sistema continuo**

En el cual la matriz y las partículas o elementos forman un todo homogéneo aunque existen uniones entre partículas estas no interrumpen la continuidad de la fábrica.

#### **3.6.4.2 Sistema embebido por una matriz**

El ensamble forma un elemento homogéneo pero es interrumpido por poros, granos grandes, relictos o nódulos de materiales diversos.

#### **3.6.4.3 Sistema soportado por una red de bloques o terrones**

En este caso aparecen varios elementos que se integran entre sí, separados por poros, pero es la microestructura del ensamble de estos elementos los que le dan soporte al material.

### **3.7 Estructura de los suelos residuales**

Según Blight (1977) citando a Lumb, las juntas en la mayoría de las rocas ígneas y la estratificación en rocas sedimentarias permanecen en los suelos residuales. Igual cosa ocurre con la esquistosidad y la foliación de algunas rocas metamórficas.

### **3.7.1 Juntas o diaclasas**

Las juntas juegan un papel importante en las fallas de materiales residuales. Si se encuentran abiertas actúan como conductores de agua y activadores de presiones de poro. Por lo general, se encuentran más abiertas en la superficie que a profundidad. El agua al pasar a través de la junta produce meteorización de sus paredes, formando arena o arcilla que forma superficies de debilidad. Adicionalmente, el agua que viaja a lo largo de las juntas puede llevar arcilla en suspensión que es depositada en ellas y las discontinuidades se hacen muy peligrosas si se encuentran rellenas de arcilla. Blight afirma que la resistencia a lo largo de una estructura heredada puede ser la mitad de la resistencia en el suelo residual intacto y cita casos en que la resistencia es de solamente 1/3 de la resistencia a través del suelo. Las superficies de falla pueden coincidir con una junta o pueden comprender varias familias de juntas diferentes formando bloques deslizantes.

### **3.7.2 Foliaciones**

Las foliaciones son superficies generalmente paralelas de baja cohesión y por las cuales las rocas se pueden partir. Estas son debidas principalmente, a efectos de metamorfismo y son conocidas como pizarrosidad, esquistosidad, foliación, etc. Este fenómeno produce direcciones de debilidad muy similares a diaclasas, pero son menos separadas y pueden inducir el desmoronamiento de los suelos al momento de moverse, produciéndose flujos secos del material desintegrado

### **3.7.3 Estratificación**

La estratificación genera superficies de debilidad por cambio de material. Cuando los materiales a lado y lado de la estratificación son de propiedades mecánicas similares, trabajan en forma similar a una diaclasa pero cuando la diferencia de propiedades es grande, como en el caso de estratificación de areniscas y Lutitas, la situación se hace más compleja, produciéndose concentración de agua en la interface y flujo dentro del

material más permeable. Este fenómeno genera una zona de meteorización a partir del plano de estratificación que debilita esta superficie.

#### **3.7.4 Fallas**

Su influencia en los problemas de taludes en materiales residuales pueden definirse así: Producen una zona de debilidad varios metros a lado y lado y en el caso de fallas de gran magnitud, de varios centenares de metros en dirección normal a éstas. En algunos casos las fallas son verdaderas familias de fallas que parecen especies de diaclasamiento. El material fracturado a lado y lado de la falla puede producir zonas inestables dentro de la formación estable. Los planos de falla a su vez pueden estar rellenos de arcilla o completamente meteorizados, formando superficies débiles muy peligrosas. Es común que un deslizamiento esté directamente relacionado con la presencia de una falla geológica.

#### **3.7.5 Intrusiones**

A veces los deslizamientos son generados por la presencia de intrusiones de materiales más permeables que traen su efecto en el régimen de aguas. Las diferencias en el grado de cristalización y el tamaño de los cristales también afectan la estabilidad de los taludes en rocas ígneas y metamórficas.

### **3.8 Propiedades de suelos residuales.**

#### **3.8.1 Propiedades mecánicas de los suelos residuales**

##### **3.8.1.1 Resistencia al cortante**

La estabilidad de los suelos residuales muy meteorizados (grado VI en la clasificación de Hong Kong), se puede analizar utilizando las teorías tradicionales de la mecánica de suelos, con cierto grado de confiabilidad; sin embargo a medida que se profundiza en el perfil las propiedades de los materiales cambian sustancialmente. Las muestras de roca son difíciles de muestrear y las muestras de tamaño para ensayos de laboratorio generalmente, dan estimativos muy pobres de la

resistencia al cortante y de la permeabilidad. El caso más delicado de análisis es el de los saprolitos. Los saprolitos son generalmente, no saturados, muy débilmente cementados y muy heterogéneos, con varios sistemas de juntas heredadas (Mitchell y Sitar ,1982). Vaughan (1988) explicó la relación entre la resistencia al cortante y la relación de vacíos en la siguiente forma:

- La resistencia derivada de la evolución del suelo y encontrada en equilibrio con el estado de esfuerzos, influencia el comportamiento del suelo y su dureza.
- La historia de esfuerzo durante la formación del suelo tiene muy poco efecto sobre las propiedades de los materiales.
- Los suelos tienen una variedad muy amplia de mineralogía y resistencia de los granos.
- Los suelos en el sitio tienen un rango muy amplio variable de relación de vacíos.

### **3.8.1.2 Variación de la resistencia al cortante**

La cohesión y la fricción entre las partículas o bloques varían considerablemente de acuerdo al tipo de suelo, contenido de minerales, tamaño y forma de las partículas, humedad, presión de poros y la historia de la formación del material. Adicionalmente, cuando ha ocurrido anteriormente un movimiento, la cohesión y la fricción han disminuido especialmente, cerca de las superficies de falla o fractura. La resistencia al cortante es generalmente, menor en el suelo que en el saprolito o en la roca, pero las formaciones residuales tienen generalmente, superficies de discontinuidad equivalentes a superficies de debilidad de baja resistencia que facilitan la posibilidad de movimientos. Es común que la resistencia al cortante sea menor a lo largo de las discontinuidades heredadas, que en la matriz del material residual y se reportan casos en los cuales la resistencia a lo largo de la discontinuidad puede ser muy pequeña, comparada con la resistencia a través del suelo en sí, especialmente cuando las discontinuidades se encuentran rellenas. Según Massey

y Pang (1988) el comportamiento y la resistencia al corte de los materiales son una función de:

- a) La naturaleza de la roca original.
- b) La mineralogía y microfábrica derivada de los procesos de meteorización física y química.
- c) El grado de saturación y los cambios inducidos por modificaciones del contenido de humedad.
- d) La presencia, orientación, espaciamiento, persistencia e imperfecciones de las discontinuidades heredadas, junto con la naturaleza de los rellenos o coberturas.
- e) La presencia, forma y distribución de material de roca menos meteorizada en forma de bloques o bandas dentro de la matriz más fuertemente meteorizada.

La resistencia al corte disminuye por acción de dos efectos:

- La disminución de los esfuerzos efectivos de acuerdo al principio de Coulomb.
- La separación de las superficies a lado y lado de la discontinuidad, debidas a movimientos de compresión elastoplástica de los materiales, por acción de la fuerza diferencial generada por la presión de poros "preferencial" a lo largo de la discontinuidad. Al aumentar la presión de poros la discontinuidad tiende a separarse y la resistencia al corte disminuye.

### **3.8.1.3 La cohesión**

La cohesión es una propiedad determinante en el comportamiento de un suelo residual. En suelos no saturados hay una cohesión aparente, la cual es el producto de las presiones negativas en el agua de poros, la cual desaparece por saturación, sin embargo en muchos casos, la cohesión es debida a la cementación de productos precipitados (Sowers - 1985). La cohesión generalmente, no es continua a lo largo de

una superficie y desaparece con frecuencia por la abertura de las discontinuidades debida a fuerzas de tensión o a presión de poros.

### 3.8.1.4 Angulo de fricción

El valor del ángulo de fricción interna de los materiales disminuye con el avance del proceso de meteorización. En ensayos realizados en materiales de granitos y Neisses en Colombia, se encuentran variaciones de 26 a 38°, similares a los indicados por Deerey Patton(1971), para materiales de Lutitas entre 10° y 35° y para materiales de areniscas entre 25° y 45°, en concordancia a los valores propuestos por Sowers - 1981. En materiales derivados de areniscas, el Autor ha encontrado ángulos de fricción a lo largo de discontinuidades rellenas de arcilla con valores de 10° a 15°, cuando los ángulos de fricción de discontinuidades sin relleno dan valores de 35° a 38° en el mismo talud. Esta realidad dificulta la evaluación del comportamiento de los suelos residuales utilizando los modelos de la mecánica de suelos tradicional.

### Resistencia (cont.)

<b>Materiales no cohesivos</b>	<b>Angulo de fricción (<math>\phi</math>)</b>	<b>Cohesión (kPa)</b>
Arenas	28 - 34	0
Gravas	34 - 37	0
<b>Roca triturada</b>		
Basalto	40 - 50	0
Granito	45 - 50	
Caliza	35 - 40	
Arenisca	35 - 45	

<b>Materiales cohesivos</b>	<b>Angulo de fricción (<math>\phi</math>)</b>	<b>Cohesión (kPa)</b>
Arcillas	22 - 27 27 - 32	20 - 50 30 - 70
<b>Rocas</b>		
Ígneas	35 - 45	5.000 - 55.000
Metamórficas	30 - 40	20.000 - 40.000
Sediment. duras	35 - 45	10.000 - 30.000
Sediment. blandas	25 - 35	10.000 - 20.000

### **3.8.1.5 La envolvente de falla**

En los suelos residuales la envolvente de falla puede tener una forma no lineal, especialmente en el rango de presiones bajas. Brand (1985) presenta el caso de los suelos residuales derivados de granitos en Hong Kong, donde la envolvente de falla presenta una curva en los niveles de esfuerzos normales bajos sin que se presente un caso de cohesión

### **3.8.1.6 Factores que afectan el comportamiento esfuerzo-deformación**

#### **➤ Resistencia de los granos o partículas**

Las partículas que conforman un suelo residual muestran generalmente una gran variabilidad en la resistencia al aplastamiento o trituración y esta resistencia influye en forma importante sobre los valores de la resistencia al cortante. Por ejemplo, los suelos residuales con partículas de cuarzo resistentes al aplastamiento muestran ángulos de fricción relativamente altos.

#### **➤ Unión y cementación entre partículas**

Una de las características básicas de los suelos residuales es la existencia de unión es entre las partículas. Estas uniones pueden ser de cementación por la depositación de carbonatos, hidróxidos, materia orgánica, etc., o por la reprecipitación de agentes cementantes como los silicatos o el crecimiento de uniones durante la alteración química de los minerales. Las uniones entre partículas disminuyen a medida que avanza el proceso de descomposición. La roca poco meteorizada posee una resistencia al cortante mucho mayor que la roca descompuesta.

#### **➤ Estado de alteración o remoldeo**

La resistencia al cortante es muy sensitiva a la alteración del material. Esta alteración puede deberse a causas naturales o antrópicas. Por ejemplo, el uso de explosivos para la ejecución de un corte puede disminuir la resistencia al cortante de toda la ladera. La estructura también puede destruirse durante la saturación o la toma de

muestras. La resistencia al corte del suelo varía en forma grande de una muestra natural a otra compactada, debido al efecto de cementación y es difícil poder obtener valores confiables de diseño.

### 3.8.2.- Propiedades Típicas de Suelos Residuales

#### Propiedades Índice de Suelos

Referencia	Tipo de suelo	Peso unitario promedio (kN/m <sup>3</sup> )	Ángulo de fricción interna(°) (rango)	Ángulo de fricción interna (°)promedio	Cohesion en kN/m <sup>2</sup> (rango)	Cohesión en kN/m <sup>2</sup> (promedio)
Vargas (1977)	Laterita		22 - 33	28	0 - 59	24
Tuncer et al. (1977)	Andisol	13.0	27 - 57	42	48 - 345	163
Foss (1973)	Andisol	11.5	36 - 38	37	22 - 28	25

Tabla 3.4

**3.8.3 Coeficiente Permeabilidad** La facilidad con que el suelo fluye a través de un material se le denomina con el nombre de permeabilidad y el parámetro que permite cuantificar este fenómeno se le llama coeficiente de permeabilidad y se le encuentra en la literatura con la simbología de la letra  $K$ . La permeabilidad depende del tamaño de los vacíos o poros, es alta en las gravas y baja en las arcillas.

coeficiente de permeabilidad	
Roca fracturada o suelos compuestos por arenas y gravas	100 cm/seg
Arcillas impermeables o en pizarras y granitos sanos.	10-10 cm/seg

Tabla3.5 Tamaño de poros y permeabilidad (Lee, 1996)

En materiales discontinuos, como los que se encuentran en las formaciones tropicales, el coeficiente de permeabilidad no es isotrópico, sino que varía de acuerdo a la orientación de las discontinuidades. La permeabilidad es mayor en la dirección de los planos de depositación o de las discontinuidades que en los plano normal a ellas.

El valor del coeficiente  $K$  varía de acuerdo al tipo de roca o suelo, fracturación, espaciamiento, abertura y relleno de las juntas

### **3.9 Clasificaciones para suelos residuales**

#### **3.9.1 Clasificación de la FAO para suelos tropicales**

Se han editado mapas de suelos generalmente, para uso agrícola en donde se clasifican los suelos de acuerdo a criterios pedológicos. Se conocen la clasificación pedológica francesa, la clasificación Taxonómica de los Estados Unidos y la clasificación FAO- UNESCO. Estas clasificaciones han sido estudiadas por autores como Morin and Todon y pueden ser útiles a los Ingenieros y geólogos y para ello existen correlaciones cuya interpretación para casos prácticos requiere de mucho criterio y experiencia. La FAO ha definido 25 unidades de suelo de las cuales las más importantes son:

##### **3.9.1.1 Arenosols**

Más gruesas que la arena y contenido de arcilla del 18% o menos. Exclusivos de depósitos aluviales recientes no consolidados.

##### **3.9.1.2 Andosols**

Suelos formados por materiales volcánicos por lo general con superficies oscuras.

Comunes en regiones montañosas. Densidades bajas y humedades naturales altas. Contienen generalmente, minerales de Aloysita. Se caracterizan por su alto contenido de agua y cambios irreversibles cuando se secan. Estos materiales son muy comunes en las zonas volcánicas del sur-occidente de Colombia.

### **3.9.1.3 Luvisols**

Suelos con acumulación de arcilla en el horizonte intermedio, rojo grisáceo. Propios de zonas áridas.

### **3.9.1.4 Cambisols**

Suelos en los cuales han ocurrido cambios en el color, la estructura y consistencia por la meteorización del perfil en zonas de erosión intensa.

### **3.9.1.5 Acrisols**

Suelos muy ácidos normalmente amarillo - crema, provenientes de rocas ácidas en zonas de lluvia intensa.

### **3.9.1.6 Nitosols**

Suelos de color gris rojizo que han sido parcialmente meteorizados pero no han llegado a la madurez total que han alcanzado los Ferralsols.

### **3.9.1.7 Ferralsols**

Suelos que contienen una cantidad muy importante de óxidos de hierro, generalmente rojos o amarillos, propios de zonas lluviosas. Es un grupo muy grande de suelos con gran variación de características, los minerales predominantes son la Caolinita y la Aloisita. Dentro de los ferralsols es importante definir a los “Latosols”. Un término científico empleado también para la caracterización de lateritas es de Latosol. La identificación sobresaliente es la presencia abundante de sesquióxidos y Cuarzo y la ausencia de los minerales solubles. Por lo general el tipo de arcilla predominante es la Caolinita. Las tierras rojas o latosoles son suelos residuales ferruginosos que se encuentran en el primer ciclo del proceso, habiendo sido recientemente oxidados pero no cementados, comportándose como arcillas y por lo tanto no se considera que sean Lateritas.

### 3.9.1.8 Vertisols

Son suelos problemáticos de altas características de expansión y contracción y baja resistencia. Poseen grandes cantidades de Esmectita y Montmorillonita entre ellos se incluyen las arcillas negras propias de las zonas tropicales.

Características de algunos de los suelos tropicales, clasificados de acuerdo a la FAO (Wesley, 1988).

Clasificación FAO	Nombre comunes	Minerales de arcilla dominantes	Características importantes
Ferralsols	Suelos lateríticos Latosoles Arcillas rojas	Aloisita Caolinita Gibsita Geotita	Un grupo muy grande con una gran variación de características
Andosols	Cenizas volcánicas	Alofanos Aloisita	Contenidos muy altos de agua y cambios irreversibles al secarse
Vertisols	Suelos negros tropicales. Suelos algodón negro.	Esmectita Montmorillonita	Alta expansión y baja resistencia.

Tabla 3.6

### 3.9.2.- Sistema de clasificación de suelos residuales de WESLEY

Los suelos residuales poseen características específicas, las cuales no están representadas adecuadamente en el sistema unificado de clasificación de suelos entre las cuales Wesley (1997) indica las siguientes:

- a. El comportamiento de los suelos residuales depende en forma importante de la mineralogía y la estructura.
- b. El grado de meteorización no se tiene en cuenta en los sistemas normales de clasificación.
- c. Los sistemas de clasificación se basan en las propiedades del suelo en estado remoldeado y el comportamiento de los suelos residuales depende de su estado in situ. Wesley(1988) propuso un sistema de clasificación de suelos residuales (Tabla 3.10) el cual está basado en tres factores básicos:

### 3.9.1 Composición

Se refiere al material de que está constituido e incluye tamaño, forma y especialmente la composición mineralógica de la fracción fina.

### 3.9.2 Macroestructura

Incluye todos los detalles que se pueden observar visualmente como son discontinuidades, capas, fisuras, poros, presencia de materiales no meteorizados o parcialmente meteorizados y estructuras heredadas.

### 3.9.3 Microestructura

Fábrica, cementación entre partículas, forma y tamaño de los poros, etc.

El sistema de clasificación de Wesley no puede tomarse aislado de otros elementos como son el estado o nivel de meteorización, las propiedades mecánicas, las modificaciones o cambios al profundizarse en el perfil, las superficies de cambios bruscos de propiedades, etc.

Sistema de clasificación de suelos residuales ( Wesley –1997)

Grupo	Subgrupo	Ejemplo	Identificación	Comentarios
<b>A</b> <b>Suelos sin influencia mineralógica fuerte</b>	<b>(a)</b> Influencia fuerte de la macroestructura	Suelos de rocas ígneas o ácidas o intermedias y rocas sedimentarias muy meteorizadas.	Inspección visual	Este es un grupo muy grande de suelos, incluyendo los saprolitos, cuyo comportamiento en las laderas es dominado por la influencia de las discontinuidades, fisuras, etc.
	<b>(b)</b> Influencia fuerte de la microestructura	Suelos de rocas ígneas y sedimentarias completamente meteorizaadas.	Inspección visual y evaluación de la sensibilidad e índice de liquidez.	Son suelos esencialmente homogéneos. Es importante la identificación de la naturaleza y papel de las discontinuidades heredadas, tanto primarias como secundarias para poder entender el comportamiento.

	(c) Poca influencia de la estructura	Suelos derivados de rocas muy homogéneas	Poca o ninguna sensibilidad y apariencia uniforme.	Se comportan en forma similar a los suelos moderadamente sobreconsolidados.
<b>B</b> <b>Suelos fuertemente influenciados por minerales comunes</b>	(a) Grupo de la Smectita y montmorillonita.	Suelos negros tropicales y suelos formados en condiciones pobremente drenadas.	Colores gris a negro y alta plasticidad.	Suelos problemáticos encontrados en zonas planas; son de baja resistencia, alta compresibilidad y características fuertes de expansión y contracción.
	(b) Otros minerales comunes			Subgrupo relativamente pequeño.
<b>C</b> <b>Suelos fuertemente influenciados por minerales arcillosos propios solamente de los suelos residuales</b>	(a) Grupo de los Alófanos	Suelos derivados de ceniza volcánica.	Contenidos de agua muy altos y cambios irreversibles al secarse.	Altos límites líquidos y plásticos. Las características de ingeniería son generalmente buenas, aunque en algunos casos la alta sensibilidad hace difícil el manejo y la compactación.
	(b) Grupo de la Aloysita	Suelos derivados de rocas volcánicas antiguas. Especialmente arcillas rojas tropicales.	Color rojo, topografía bien drenada.	Suelos finos de baja a media plasticidad, pero de baja actividad. Las propiedades de ingeniería son generalmente buenas. (Debe tenerse en cuenta que con frecuencia se traslapan los suelos alófanos y los aloysíticos).
	(c) Grupo de los Sesquioxidos	Suelos lateríticos o lateritas	Apariencia granular o nodular.	Es un grupo muy amplio que van desde arcillas limosas hasta gravas y arenas gruesas. Su comportamiento varía desde la baja plasticidad hasta la grava no plástica.

Tabla 3.7

### **3.10 Características para la evaluación de los suelos residuales**

La validez de los ensayos de “Laboratorio” en suelos residuales es cuestionable aunque no puede discutirse que son útiles para la toma de decisiones de diseño. Muestras totalmente inalteradas aunque son difíciles de obtener, son deseables y es recomendable que las muestras sean lo más grande posibles.

#### **3.10.1 Ensayos de evaluación**

Se deben realizar ensayos que permitan obtener las propiedades de los suelos para los análisis, en tal forma que sean lo más representativos de las situaciones reales en el campo.

Los ensayos comúnmente utilizados para análisis de taludes son los siguientes:

##### **3.10.1.1 Ensayo de corte directo**

El ensayo de corte directo tiene como objeto determinar la resistencia al esfuerzo cortante de una muestra, valor que en otras cosas, será muy útil para el cálculo de la estabilidad de taludes o para la capacidad de soporte, ensayo para la determinación de la resistencia al corte de una muestra de suelo, que simula la aplicación de las cargas reales a las que estará sometido el suelo. El ensayo induce sobre el que actúan un esfuerzo normal aplicado externamente debido a la carga vertical. Al aplicar la fuerza con las cuales podremos obtener la cohesión y el ángulo de fricción interna del suelo para luego hacer tabulaciones de datos y representaciones gráficas.

##### **➤ Ventajas del ensayo de corte directo**

El ensayo es relativamente rápido y fácil de llevar a cabo.

La preparación de la muestra no es complicada.

El principio puede aplicarse a suelos granulares y otros materiales que contienen grandes partículas que serían muy caras de ensayar por otros medios.

Puede medirse el ángulo de rotura del suelo y roca, o entresuelo y otros materiales.

Se ha introducido cajas con muestra de forma aproximadamente cuadrada de forma que la reducción de área durante el ensayo pueda fácilmente tenerse en cuenta si se desea. El uso de cajas cuadradas es relativamente reciente, y la mayoría de las máquinas antiguas todavía en servicio, utilizan cajas circulares.

La máquina de corte directo es mucho más adaptable a los equipos electrónicos de medición, de forma que no se requiera la presencia continua de un operario para efectuar ensayos consolidados- drenados, que puedan durar varios días.

Se ha encontrado que los parámetros de suelo  $\tau$  y  $c$  (esfuerzo y cohesión respectivamente), obtenidos por el método de corte directo son casi tan confiable.

➤ **Limitaciones del ensayo de corte directo**

La muestra está obligada a fallar en un plano predeterminado.

La distribución de esfuerzos en ésta superficie no es uniforme.

No es posible controlar el drenaje de la muestra, sólo se puede variar la velocidad de desplazamiento.

No puede medirse la presión de poros.

Las deformaciones aplicadas están limitadas por recorrido máximo de la caja.

El ensayo usa una muestra muy pequeña, con el consiguiente resultado de que los errores de preparación son relativamente importantes.

### **3.10.1.2 Granulometría**

El análisis granulométrico se llama también análisis mecánico y consiste en la determinación de los porcentajes de piedra, grava, arena, limo y arcilla que hay en una cierta masa de suelo. Los ensayos de granulometría tienen por finalidad determinar en forma cuantitativa la distribución de las partículas del suelo de acuerdo a su tamaño. Este método se usa en caso de que los suelos sean granulares lo

que permite fácilmente determinar los porcentajes mediante el uso de un juego de tamices. Estos tamices con aberturas calibradas, varían desde 10.16 cm que equivale a 4' hasta 0.074 mm que equivale al tamiz N° 200 que significa que una pulgada está dividida en 200 partes iguales.

**TABLA N° 1 : Clasificación de Suelos según AASHTO**

CLASIFICACION GENERAL	Materiales Granulares (igual o menor del 35% pasa el tamiz N° 200)							Materiales Limo - Arcillosos (más del 35% que pasa el tamiz N° 200)			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
GRUPOS	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
SUB - GRUPOS	A-1-a	A-1-b	A-3	A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7	A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5 A-7-6
% que pasa el Tamiz:											
N° 10	50 máx.										
N° 40	30 máx.	50 máx.	51 máx.								
N° 200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 mín.	36 mín.	36 mín.	36 mín.
Características del Material que pasa el tamiz N° 40											
Límite Líquido			NO PLÁSTICO	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 máx.
Índice de Plasticidad	6máx	6 máx.	NO PLÁSTICO	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.
Índice de Grupo	0	0	0	0	0	4 máx.	4 máx.	8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.
Tipos de Material	fragmentos de piedra grava y arena		Arena fina	Grava, arenas limosas y arcillosas				Suelos Limosos		Suelos Arcillosos	
Terreno de Fundación	Excelente a Bueno						Regular a Deficiente				

NOTA: El índice de plasticidad de los suelos A-7-5 es igual o menor que su Límite Líquido 30, el de los A-7-6 mayor que su Límite Líquido (fig. 1) se halla indicada la relación entre lo LL e IP de los materiales finos. Dicho de otro modo, el grupo A-7 es subdividido en A-7-5 ó A-7-6 dependiendo del Límite Plástico (L.P.)  
 Si el LP  $\geq$  30, la clasificación es A-7-6  
 Si el LP < 30, la clasificación es A-7-5

Tabla 3.8

### 3.1.10.3 Límites Atterberg

Los límites Atterberg (ASTM D4318) son empleados para determinar la plasticidad de suelos. El límite líquido define el límite entre los estados líquidos y plásticos, y el límite plástico entre los estados plásticos y sólidos. La diferencia entre estos dos valores de contenido de agua es el rango sobre el cual el suelo permanece plástico y se denomina el índice de plasticidad. Este parámetro se emplea para clasificar los suelos con el fin de estimar otras propiedades físicas.

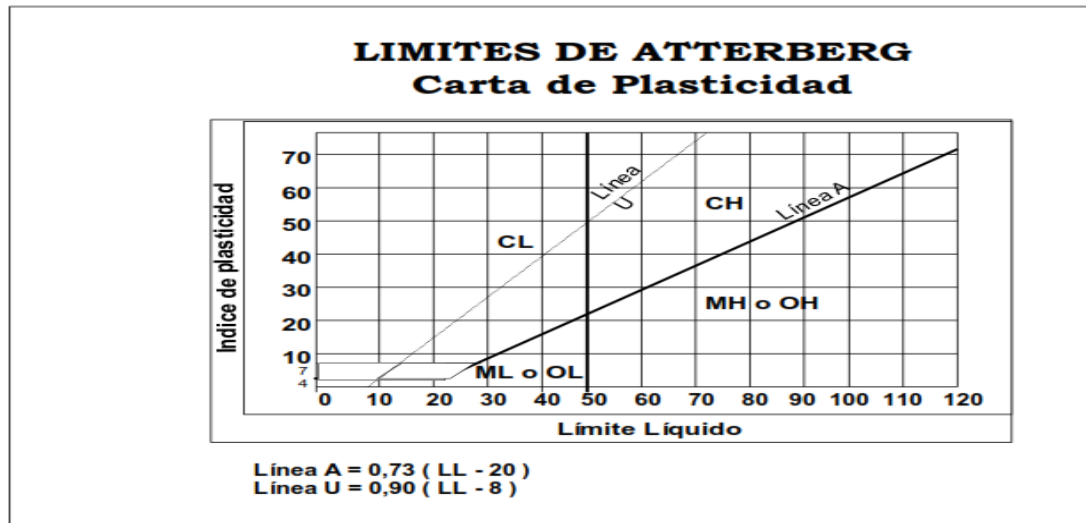


Tabla 3.9

#### 3.1.10.4 Compactación T-180

El propósito de un ensayo de compactación en laboratorio es determinar la curva de compactación para una determinada energía de compactación. Esta curva considera en abscisas el contenido de humedad y en ordenadas la densidad seca. A partir de ella se podrá obtener la humedad necesaria para obtener la densidad natural del terreno del terreno de taludes objeto a estudio.

#### 3.1.10.5 Densidad in situ

El poder conocer la densidad que posee un suelo en terreno o en su estado natural, ha sido un gran reto para los investigadores de mecánica de suelos y científicos del área en general. Se realiza esta determinación para comprobar el grado de compactación en rellenos compactados artificialmente.

Es muy útil en el caso de suelos sin cohesión (gravas y arenas), los cuales, por lo general no permiten obtener muestras inalteradas, y por medio de la densidad in situ se puede reproducir el suelo natural en la densidad natural a partir de una muestra alterada.

El método del cono de arena Básicamente el método consiste en determinar el peso del suelo húmedo de una pequeña excavación de forma irregular (hueco) hecho sobre la superficie del suelo.

### 3.1.10.6 Análisis estadístico

Para el análisis estadístico se procederá hacer analizar con la medida de tendencia central con la media aritmética para el análisis de las muestras Y la formula a utilizar es:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n Xi}{N}$$

$$\bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_n}{N}$$

Dónde:

$\bar{X}$  = Valor de la media aritmética

$X_1, X_2, X_3$  = Valores de muestras obtenidas.

N = Número de muestras.

Para conocer con detalle un conjunto de datos, no basta con conocer las medidas de tendencia central, sino que necesitamos conocer también la desviación que presentan los datos en su distribución respecto de la media aritmética de dicha distribución, con objeto de tener una visión de los mismos más acorde con la realidad al momento de describirlos e interpretarlos para la toma de decisiones.

Es por eso que se utilizara la desviación estándar para desestimar datos que no estén en un rango de correlación aceptable del 95%

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (xi - \bar{x})^2}{n - 1}$$

Donde

$X_i$  = Valor de cada muestra de observación

$\bar{x}$  = Valor de la media aritmética

$n$  = Número de muestras

También se realizará tabulaciones de datos más sus resultados, representaciones graficas del ensayo de corte directo y de la granulometría y de los límites Atterberg y en base a esto poder clasificar el suelo y sacar sus propiedad mecánicas del suelo.

## CAPITULO IV

### APLICACIÓN PRACTICA DE ESTABILIDAD DE TALUDES.

#### 4.1 UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.

El área de estudio se ubica en las comunidades de “**LA MAMORA – EMBOROZÚ**” pertenece a la provincia **Arce** del Departamento de Tarija, el cual se sitúa al sur del territorio Boliviano; dichas poblaciones son parte del denominado tramo carretero Tarija-Bermejo, como parte de la red fundamental para el desarrollo del departamento, dicho tramo es transitable durante las épocas cuando no existen precipitaciones pluviales, pero se presentan una serie de derrumbes en las épocas de lluvia, las cuales llegan a ocasionar grandes invasiones de masas rocosas y suelo hacia la calzada, ocasionando daños en la misma y retrasos en la circulación vehicular exponiendo la vida de las personas que se transitan por la misma.



Fig. 4.1 Mapa de Tarija

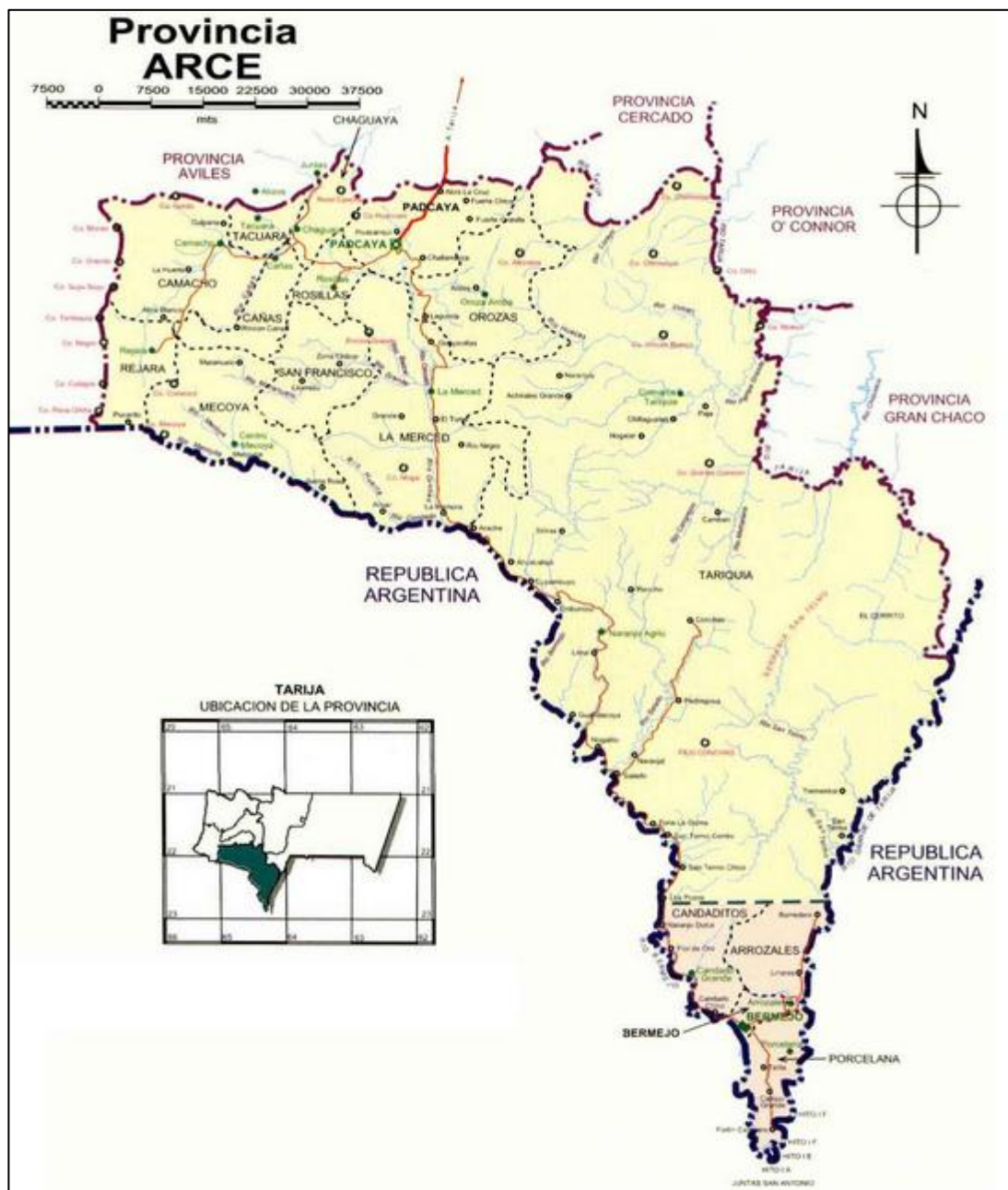


Fig. 4.2 Mapa de la ubicación de la provincia Arce

El tramo de “LA MAMORA – EMBOROZÚ” es de vital importancia para mantener comunicados a la ciudad de Tarija y el poblado de Bermejo; para mantener esta continuidad de la circulación vehicular, se realizó un estudio de taludes de suelos residuales, del cual, luego de realizado un análisis de la estabilidad del mismo.

## 4.2 IMPORTANCIA DE LA ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio es un tramo importante dentro del corredor Oeste-Sur del país vinculando Chile (Pto. Arica – Pto. Iquique); Perú (Pto. Ilo) con Argentina (Jujuy - Oran – Salta – Pto. Rosario) cubriendo el tramo Boliviano Desaguadero – La Paz – Orro – Potosi – Bermejo, tal como se muestra en la siguiente figura:



Fig. 4.3 Red vial fundamental

## 4.3 CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO.

Atraviesa una región de topografía entre montañosa a ondulada, con vegetación de bosque tropical. La característica del clima regional es predominantemente cálida, con temperaturas promedio entre los 20 a 27 grados centígrados, con régimen de lluvias intenso entre los meses de octubre y marzo, con 1350 mm. Por año. Atravesando una zona de enclave con laderas de roca abruptas de gran altura labradas

por el río Bermejo (Zona de Alarache), para luego entrar en un valle amplio (Zona Cayotal), el cual continúa sin ningún punto notable que afecte la carretera hasta el puente sobre el río Emborozú.

#### **4.4 DETERMINACIÓN DE ZONAS DE TALUDES EN EL TRAMO**

Se describirá los tramos en los cuales se hizo los estudios de taludes de suelos residuales.

Los taludes están ubicados en las siguientes progresivas 45+900, 48+00, 52+600 y 55+500.

##### **4.4.1 DESCRIPCIÓN DE LA PROGRESIVA 45+900.**

Esta progresiva tiene problema con su talud que la misma presenta riesgo de erosión, la masa componente del talud son materiales arenosos sedimentarios regularmente consolidados por lo que son porosos y permeables.

Este tramo de camino está ubicado al pie de una montaña escarpada cubierta en un 67% aproximadamente de vegetación como arboles pequeños y grandes, arbustos y pastos, arriba del talud a unos 60m. desde la corona del talud presenta algún indicio de grieta superficial que la misma es desfavorable para el talud ya que las aguas superficiales escurrirán por estas grietas hacia la masa del talud provocando algunos problemas probables como superficies de falla, , presiones de poro o simplemente debilitando el talud.

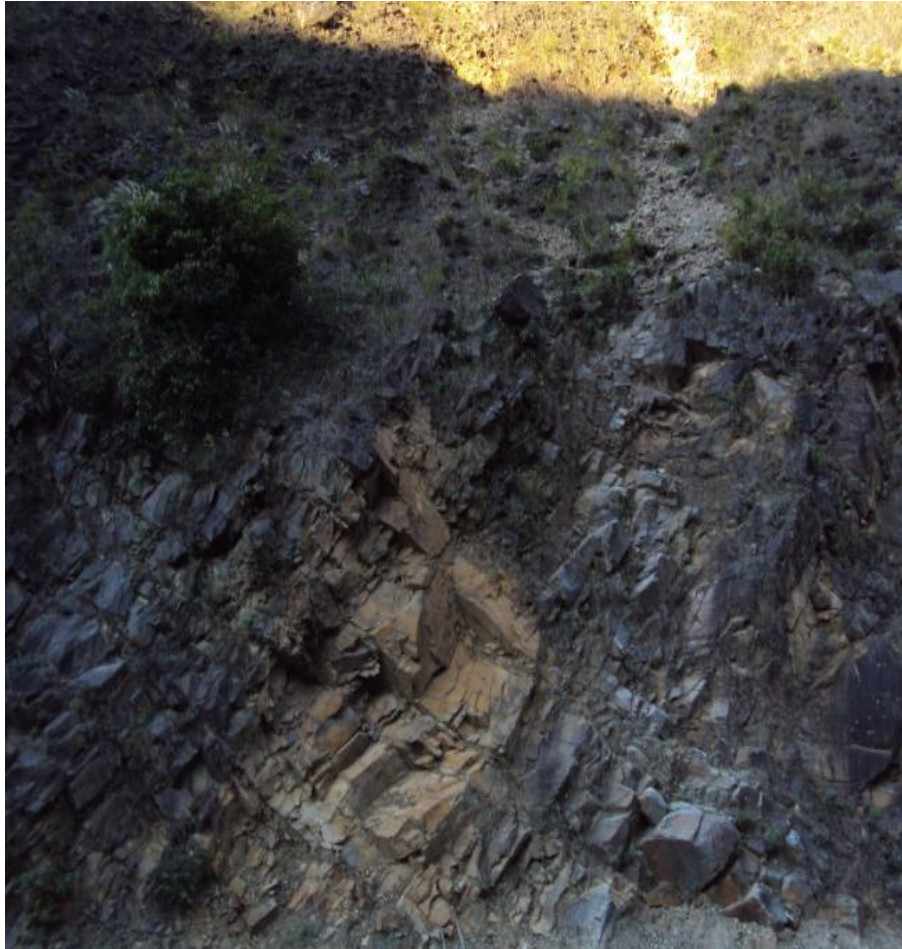


Fot. 4.1

#### **4.4.2 DESCRIPCIÓN DE LA PROGRESIVA 48+000**

Esta progresiva presenta un talud que presenta riesgo de erosión superficial, que debilitaría el talud ocasionando inestabilidad en la masa del talud, la masa que compone el talud de esta progresiva son materiales granulares sedimentarios y residuales regularmente consolidados por lo que son porosos, permeables y susceptibles a erosionarse.

Este talud está ubicado en un tramo ascendente, emplazado en una montaña escarpada cubierta de vegetación aproximadamente en un 40% como arboles pequeños, arbustos y pastos, este tramo de talud tiene un área de aporte no considerable.



Fot. 4.2

#### **4.4.3 DESCRIPCIÓN DE LA PROGRESIVA 52+600**

El talud de esta progresiva, presenta mayores riesgos de deterioro e inestabilidad que las descritas anteriormente, la masa que compone el talud de esta progresiva son materiales coluviales también presenta rocas en proceso de meteorización y la pie del talud con suelos residuales conglomerados sedimentarios regularmente consolidados.

Este talud está ubicado en un tramo al lado del túnel falso alachi, está emplazada en una montaña escarpada cubierta con un buen porcentaje de vegetación como árboles pequeños, arbustos y pastos, este tramo de talud tiene un área de aporte considerable, las características que tiene ocasionaran muchos problemas en su estabilidad, el agua

superficial de lluvias infiltrara ocasionando algunos problemas probables como superficies de falla, escurrimiento sub-superficial, erosión superficial.



Fot. 4.3

#### **4.4.4 DESCRIPCIÓN DE LA PROGRESIVA 55+500**

Esta progresiva tiene un talud, que presenta riesgos de deterioro en su estructura del pie, la masa que compone el talud de esta progresiva son materiales que están compuestos de un macizo rocoso y en su parte del pie presenta suelo residual y rocas en procesos de meteorización.

Este talud está ubicado en un tramo ascendente, que está emplazado en una montaña escarpada cubierta en un 70% aproximadamente de vegetación como arboles grandes, arbustos y pastos, este tramo de talud tiene un área de aporte no considerable.



Fot. 4.4

#### **4.5 TOMA DE MUESTRAS DE LOS TRAMOS CRÍTICOS**

La obtención de muestras es una de las operaciones más importantes para conseguir resultados precisos sobre las características físicas del suelo y su correspondiente clasificación, pues requiere no solo conocimientos sobre suelos, sino experiencia para

seleccionar el o los sitios donde deberá tomarse y poder determinar, además la profundidad a la cual deberán de extraerse. Las muestras que se obtengan, deben ser representativas, es decir deben ser fiel representación del material existente en el sitio de estudio.

Para ello se procedió a la toma de muestras alteradas en bolsas de los cuatro taludes de estudio de suelos residuales, ya que este tipo de muestras son necesarias para realizar ensayos de análisis granulométrico, ensayos de límites de Atterberg y también para el análisis de ensayo de corte directo.

Además se realiza el ensayo de densidad in situ con el objeto de determinar la densidad del material del talud en los distintos sitios del tramo de estudio.

Las muestras obtenidas de los cuatro sitios del tramo de estudio se llevaron al laboratorio para realizar los ensayos necesarios para la clasificación del material de los taludes.

#### **TALUD 1 PROG. 45+900**



Fot. 4.5

**TALUD 2 PROG. 48+000****Fot. 4.6****TALUD 3 PROG. 52+600****Fot. 4.7**

## TALUD 4 PROG. 55+500



Fot. 4.8

### 4.6 ENSAYOS

#### 4.6.1 DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD NATURAL

Mediante este ensayo se determinara la cantidad de agua presente en una determinada cantidad de suelo.

##### 4.6.1.1 Procedimiento

- Se pesaron las cápsulas o recipientes, registrando dichos datos en la planilla de contenido de humedad, cabe hacer notar que deben ser bien identificadas las cápsulas.
- Se agregó a las cápsulas una pequeña porción del suelo natural, registrando el peso de suelo húmedo más cápsula ( $P_{sh} + P_{cap}$ ).

- Se introducen al horno durante 24 horas, a una temperatura de 105 - 110°C.
- Al extraer del horno las cápsulas, se enfrió para registrar el peso de suelo seco más cápsula ( $P_{ss} + P_{cap}$ ).



Fot. 4.9

#### **4.6.2 DENSIDAD IN SITU**

Se determinará la cantidad de masa que contiene un determinado volumen en su estado natural en su sitio es decir en el talud.

##### **4.6.2.1 Calibración del frasco.**

- Se enrosca el cono al frasco, para obtener el peso del equipo y registrar su peso.
- Se debe tener cuidado de que por la rosca no filtre agua, para ello se selló con silicona, luego se llenó de agua hasta el nivel de la llave de paso del cono, inmediatamente se pesó el equipo más agua.
- Si al último peso registrado se le resta el peso del equipo se obtiene el peso del agua.

- Se lectura la temperatura del agua, para su respectiva corrección en la estimación de la densidad del agua.
- Con los datos anteriores se calcula el volumen del equipo hasta la llave de paso.

#### **4.6.2.2 Calibración de la arena**

- Secar el equipo y llenar con arena calibrada desde una altura de 2" por arriba del cono, en forma constante.
- Se toma intervalos de tiempo, durante el llenado de arena y hacer girar sobre su propio eje el equipo, de tal manera que el acomodamiento de la arena sea uniforme en toda la sección del frasco.
- Cuando se encuentre la arena al nivel de la llave de paso del cono, se cerró este y se procede a pesar, para luego restar el peso del equipo y obtener el peso de la arena pura.
- Seguidamente se calcula la densidad de la arena, dividiendo el peso de arena entre el volumen del frasco.
- Luego sobre una superficie plana, se volcó el equipo para abrir la llave de paso del cono, hasta que el embudo se llene y cerrar la llave, luego se procede a pesar el equipo con el saldo de arena disponible.
- La diferencia entre el peso del equipo lleno de arena y después de llenar el cono, nos proporciona el peso de arena disponible en el cono.

#### **4.6.2.3 Procedimiento en el campo**

- Se limpia y se hace adecuado para instalar en el sitio escogido del talud, se instala la placa, lo más seguro posible con clavos.
- Se procede a excavar un hoyo de profundidad de acuerdo a recomendaciones, que puede variar entre 15 a 20 cm.
- El material extraído se lo guarda en un recipiente donde no pueda perder humedad, este sirvió para obtener el peso del suelo húmedo retirado del hoyo.

- Luego se ajusta la llave de paso, se vuelca el equipo y se instala sobre la placa, seguidamente se abrió la llave y se deja caer la arena hasta que el hueco y el cono se llenen.
- Se procede a cerrar el cono para después pesar el equipo con el saldo de arena que queda después del ensayo.



Fot. 4.10

### 4.6.3 GRANULOMÉTRICO DE SUELOS

Se obtendrá la distribución porcentual de los tamaños de partículas que conforma la masa de suelo en su estado natural en el talud.

#### 4.6.3.1 Procedimiento

Primero la muestra debe ser representativa, por lo que se tiene que usar el cuarteador mecánico, este proceso se repite hasta obtener la cantidad necesaria para la realización del ensayo.

Las cantidades ensayadas, dependerán del tipo de suelo que tienen, para suelos granulares se estima aproximadamente 5000 gramos.

- Se hace secar el material, hasta que los granos no se encuentren pegados o formando grumos.
- Los tamices usados para el tamizado del material son: 1", ¾", ½", 3/8", N°4, N°10, N°40, N°200.
- El tamizado se efectúa utilizando el Rop-Tap, luego se realiza una revisión para verificar que el material ha pasado las mallas correspondientes.
- Luego se realiza el pesaje del material retenido en cada malla y lo que pasa en el tamiz N°200.
- La sumatoria de todos los retenidos a veces no cumple el peso inicial por lo que se consideran pérdidas pero si este fuera más del 2% en peso este ensayo no es válido se debe repetir si es menos del 2% estará dentro lo normal.



Fot. 4.11

#### **4.5.4 LÍMITES DE ATTERBERG**

No se realiza este ensayo debido a que son suelos granulares y arenas en el proceso del tamizado se evidencio que se retiene más del 50% en el tamiz No 200 que en realidad pasa menos del 12% por lo que no es necesario hacer límites.

#### **4.6.5 ENSAYO DE COMPACTACION T-180**

##### **4.6.5.1 Procedimiento**

- Se realizó con el T – 180, se realizarán los moldes de compactación, estructurados por cinco capas y 56 golpes por cada capa.
- Antes de iniciar el ensayo, se debe pesar los moldes con base y sin el collarín, además de obtener su volumen respectivo.
- Después de preparar el material se debe calcular el contenido de humedad, antes de proceder a su compactación. Y luego se debe dividir el material en 5 partes iguales y depositar a fuentes
- Luego ya calculados los porcentajes requeridos de humedad, se procede a incrementar tales cantidades de agua al suelo, mezclado y homogenizado hasta obtener la humedad uniforme en toda la muestra.
- El material con humedad se hecha por capas en el molde respectivo y se compacta cada capa, con el número de golpes del ensayo que está practicando.
- Seguidamente se procede a retirar el collarín para luego enrasar el material con la regla metálica, si es que en este proceso se salen piedras que dejan huecos por debajo del nivel del collarín, Luego de enrasado, se pesa el molde más la muestra húmeda y más la base registrándose en la planilla de cálculos.
- Seguidamente con el extractor de muestras se saca la muestra compactada del molde y del corazón de la misma extraer el material para realizar el contenido de humedad real del suelo compactado

## 4.6.6 ENSAYO DE CORTE DIRECTO

### 4.6.6.1 Procedimiento

- Para la obtención de los especímenes se utilizó el molde T-180 para elaborar muestras compactadas a las condiciones de densidad en sitio de lo cual se procedió a su extracción y talla miento a una altura de 2.5 cm. de altura y 6 cm de ancho.
- Se procedió a su pesaje y se ensambla en la caja de corte, se saturan las piedras porosas se mide la caja para calcular su área de la muestra, se coloca la muestra en la caja de corte, las piedras porosas el piston de carga sobre el suelo, la carga  $P_v$  se ajusta el deformimetro vertical. por lo cual se lo aplico cargas de 4 kg, 8kg y 12 kg y se lo dejo saturando hasta el otro día, luego se lee al día siguiente la lectura en los extensómetros, para luego proceder al funcionamiento del equipo y se anota las lecturas se toman a emplazamiento horizontales lecturas verticales y lecturas en el anillo de carga.
- Al finalizar el ensayo, se lo pesa en un plato para luego poner al horno determinar su contenido de humedad.



Fot. 4.12

## 4.7 RESUMEN Y ANALISIS DE RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

### 4.7.1 HUMEDAD NATURAL

HUMEDAD NATURAL	
DESCRIPCIÓN	HUMEDAD NATURAL (%)
TALUD 1 (Pie)	5.55
TALUD 1 (Cuerpo)	6.90
TALUD 2 (Pie)	3.78
TALUD 2 (Cabecera)	3.27
TALUD 3 (Pie)	5.23
TALUD 3 (Cuerpo)	5.33
TALUD 3 (Cabecera)	5.34
TALUD 4 (Pie)	4.68
TALUD 4 (Cuerpo)	3.03

**Tabla 4.1**

### 4.7.2 DENSIDAD IN SITU

DENSIDAD IN SITU	
DESCRIPCIÓN	DENSIDAD (gr/cm <sup>3</sup> )
TALUD 1 (Pie)	1.64

TALUD 1 (Cuerpo)	1.65
TALUD 2 (Pie)	1.77
TALUD 2 (Cabecera)	1.78
TALUD 3 (Pie)	1.48
TALUD 3 (Cuerpo)	1.49
TALUD 3 (Cabecera)	1.49
TALUD 4 (Pie)	1.79
TALUD 4 (Cuerpo)	1.81

**Tabla 4.2**

#### 4.7.3 ANGULO DE FRICCION Y COHESION DEL SUELO

<b>ANGULO DE FRICCION Y COHESION DEL SUELO</b>		
<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>COHESION (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>ANGULO DE FRICCION (°)</b>
TALUD 1 (Pie)	0.08	42
TALUD 1 (Cuerpo)	0.10	32
TALUD 2 (Pie)	0.08	34
TALUD 2 (Cabecera)	0.06	36
TALUD 3 (Pie)	0.15	37
TALUD 3 (Cuerpo)	0.13	34

TALUD 3 (Cabecera)	0.15	23
TALUD 4 (Pie)	0.10	35
TALUD 4 (Cuerpo)	0.09	34

**Tabla 4.3**

#### 4.7.4 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO	
<i>DESCRIPCIÓN</i>	<i>CLASIFICACIÓN AASHTO Y UNIFICADA (S.U.C.S.)</i>
TALUD 1 (Pie)	A-2-4 SM El material ensayado de este tramo suelo con arena mal graduado de arena de donde deriva suelo residual
TALUD 1 (Cuerpo)	A-2-4 SW El material ensayado de este tramo arena bien graduada; arenas gruesas, que contienen limo arcilla en cantidades reducidas o nada, cuya plasticidad es baja. Que derivan de pizarras y areniscas, tienen un poco porcentaje de material fino.
TALUD 2 (Pie)	A-3 SP- SM El material ensayado de este tramo suelo con arena con poco o nada de material fino además mezclas de arena fina mal graduada.
TALUD 2 (Cabecera)	A-2-4 SW El material ensayado es suelo con arena bien graduada; arenas gravosas con poco o nada de material

	fino.
TALUD 3 (Pie)	A-3 SP-SM suelo con arena con poco o nada de material fino además mezclas de arena fina mal graduada
TALUD 3 (Cuerpo)	A-1-b GP Son suelos de arena gruesa con o sin material ligante
TALUD 3 (Cabecera)	A-2-6 SP – SC Son gravas y arenas gruesas, que contienen limo y arcilla en cantidades reducidas cuya plasticidad es baja.
TALUD 4 (Pie)	A-2-6 SP suelo que se encuentra mal graduado, contienen arena en cantidades limo y arcilla reducidas cuya plasticidad es baja.
TALUD 4 (Cuerpo)	A-2-6 SP-SC suelo que se encuentra mal graduado, contienen arena en cantidades limo y arcilla reducidas cuya plasticidad es baja.

**Tabla 4.4**

ANALISIS	
<i>DESCRIPCIÓN</i>	Clasificación de la FAO para suelos tropicales
TALUD 1 (Pie)	<b>Cambisols</b> Suelos en los cuales han ocurrido cambios en el color, la estructura y consistencia por la meteorización del perfil en zonas de erosión intensa.

TALUD 1 (Cuerpo)	<b>Arenosols</b> Más gruesas que la arena y contenido de arcilla del 18% o menos. Exclusivos de depósitos aluviales recientes no consolidados.
TALUD 2 (Pie)	<b>Acrisols</b> Suelos muy ácidos normalmente amarillo - crema, provenientes de rocas ácidas en zonas de lluvia intensa.
TALUD 2 (Cabecera)	<b>Arenosols</b> Más gruesas que la arena y contenido de arcilla del 18% o menos. Exclusivos de depósitos aluviales recientes no consolidados.
TALUD 3 (Pie)	<b>Arenosols</b> Más gruesas que la arena y contenido de arcilla del 18% o menos. Exclusivos de depósitos aluviales recientes no consolidados
TALUD 3 (Cuerpo)	<b>Arenosols</b> Más gruesas que la arena y contenido de arcilla del 18% o menos. Exclusivos de depósitos aluviales recientes no consolidados
TALUD 3 (Cabecera)	<b>Arenosols</b> Más gruesas que la arena y contenido de arcilla del 18% o menos. Exclusivos de depósitos aluviales recientes no consolidados
TALUD 4 (Pie)	<b>Vertisols</b> Son suelos problemáticos de altas características de expansión y contracción y baja resistencia. Poseen grandes cantidades de Esmectita y Montmorillonita entre ellos se incluyen las arcillas negras propias de las zonas tropicales.
TALUD 4 (Cuerpo)	<b>Vertisols</b> Son suelos problemáticos de altas características de expansión y contracción y baja resistencia. Poseen

	grandes cantidades de Esmeclita y Montmorillonita entre ellos se incluyen las arcillas negras propias de las zonas tropicales.
--	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

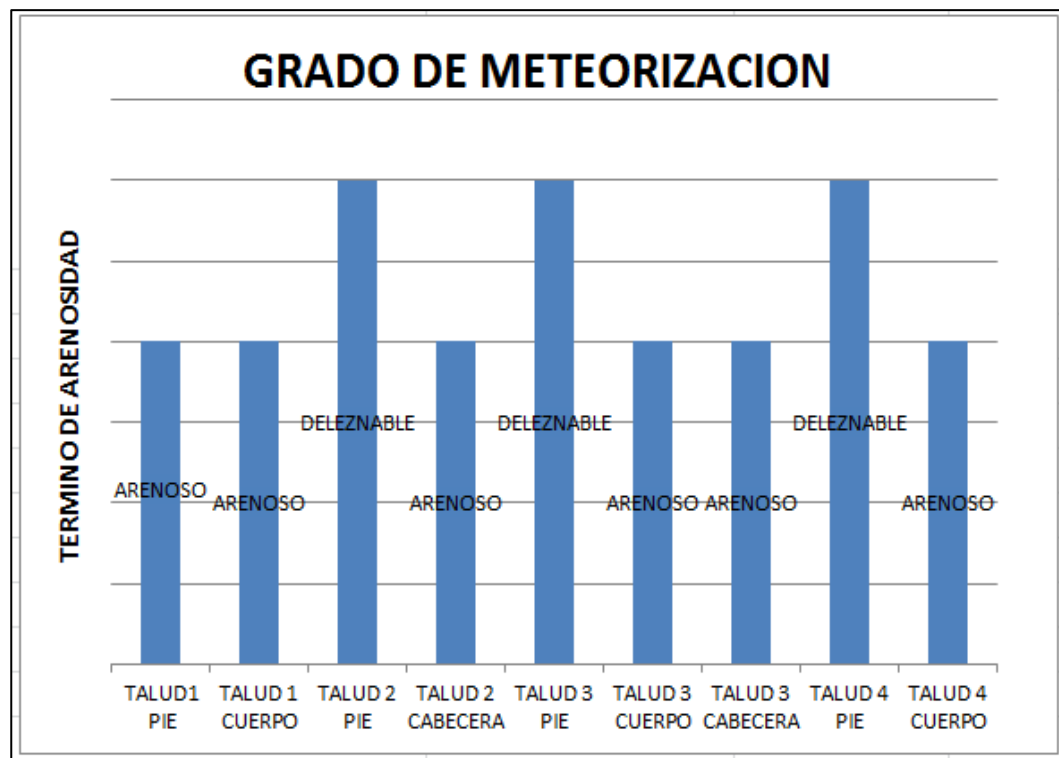
**Tabla 4.5**

#### 4.7.5 ANALISIS DEL GRADO DE METEORIZACION

<b>GRADO DE METEORIZACION</b>	
<i>DESCRIPCIÓN</i>	CLASIFICACIÓN
TALUD 1 (Pie)	Moderado arenoso Puede ser cortado con un cuchillo o gravado por una puntilla
TALUD 1 (Cuerpo)	Moderado arenoso Puede ser cortado con un cuchillo o gravado por una puntilla
TALUD 2 (Pie)	Alto Deleznable Puede ser desmoronado a fragmentos mas pequeños
TALUD 2 (Cabecera)	Moderado arenoso Puede ser cortado con un cuchillo o gravado por una puntilla.
TALUD 3 (Pie)	Alto Deleznable Puede ser desmoronado a fragmentos más pequeños
TALUD 3 (Cuerpo)	Moderado arenoso Puede ser cortado con un cuchillo o gravado por una puntilla.

TALUD 3 (Cabecera)	Moderado arenoso Puede ser cortado con un cuchillo o gravado por una puntilla.
TALUD 4 (Pie)	Alto Deleznable Puede ser desmoronado a fragmentos más pequeños
TALUD 4 (Cuerpo)	Moderado arenoso Puede ser cortado con un cuchillo o gravado por una puntilla.

**Tabla 4.6**



**Tabla 4.7**

Según el grafico se puede observar que en los taludes 1 y 3 están en el grado de meteorización en el estado de arenoso ya que se pudo cortar con un cuchillo mientras que en el talud 2 y 4 en su talud pie están en el grado de meteorización en el estado deleznable ya que puede ser desmoronado en fragmentos más pequeños.

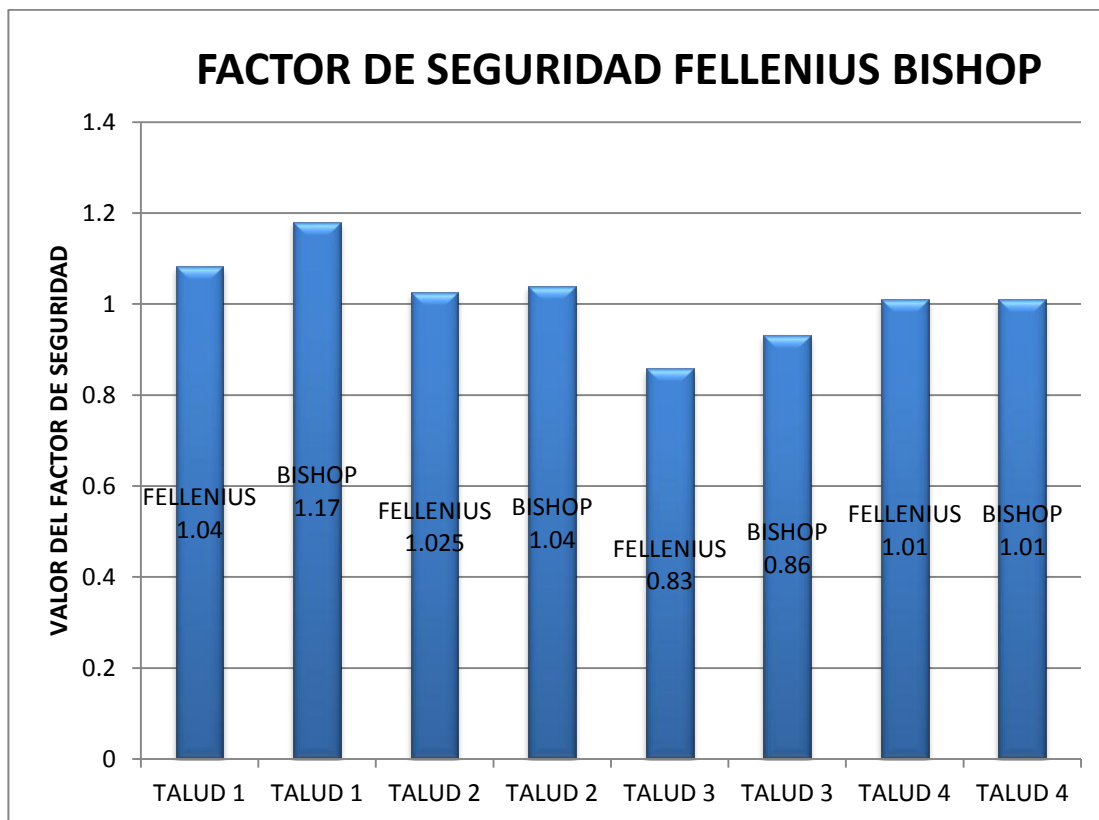
#### 4.7.6 ANALISIS DE ESTABILIDAD

<b>GRADO DE ESTABILIDAD (Fs.)</b>	
<i>DESCRIPCIÓN DEL TRAMO</i>	Método Bishop
TALUD 1	Fs. 1.17 Según la literatura expuesta, cuando el valor del factor de seguridad es mayor a 1, por tanto el talud es estable, mientras mayor sea este valor será más estable el talud
TALUD 2	Fs. 1.04 De igual manera según la literatura expuesta, cuando el valor del factor de seguridad es mayor a 1, por tanto el talud es estable, mientras mayor sea este valor será más estable el talud
TALUD 3	Fs. 0.86 El valor del factor de seguridad según la literatura expuesta es menor a 1, cuando el valor del factor de seguridad es menor a 1, por tanto el talud es inestable
TALUD 4	Fs. 1.01 Como ya se mencionó con anterioridad, cuando el valor del factor de seguridad es mayor a 1, por tanto el talud es estable, mientras mayor sea este valor será más estable el talud

**Tabla 4.8**

<b>GRADO DE ESTABILIDAD (Fs.)</b>	
<i>DESCRIPCIÓN DEL TRAMO</i>	Método Ordinario de fellenius
TALUD 1	Fs. 1.04 El valor expuesto, cuando el valor del factor de seguridad es mayor a 1, por tanto el talud es estable, mientras mayor sea este valor será más estable el talud
TALUD 2	Fs. 1.025 De igual manera según la literatura expuesta, cuando el valor del factor de seguridad es mayor a 1, por tanto el talud es estable, mientras mayor sea este valor será más estable el talud
TALUD 3	Fs. 0.83 El valor del factor de seguridad según la literatura expuesta es menor a 1, cuando el valor del factor de seguridad es menor a 1, por tanto el talud es inestable
TALUD 4	Fs. 1.01 Como ya se mencionó con anterioridad, cuando el valor del factor de seguridad es mayor a 1, por tanto el talud es estable, mientras mayor sea este valor será más estable el talud

Tabla 4.9



**Tabla 4.10**

Haciendo una comparación de los 2 métodos analizados de Bishop y Fellenius para los taludes del tramo analizados se puede observar que el método de bishop es más mayor que el de Fellenius y que el talud 3 es inestable.

El talud 1, 2, 4 son estables ya que su factor de seguridad nos da un valor mayor a 1 y mientras que el talud 3 su valor del factor de seguridad es menor a 1 por lo que es inestable.

## **4.8 PLANTEAMIENTO DE ALTERNATIVAS DE SOLUCION**

En el análisis de alternativas de protección de taludes el objetivo principal es el de establecer medidas de prevención y control para reducir los niveles de riesgo.

El objetivo de la protección de la superficie del talud es prevenir la infiltración debido a la lluvia y mantener el suelo parcialmente seco. Aunque, el factor de seguridad no se modifica teóricamente, en la práctica sí se produce un efecto estabilizante al mantener las fuerzas de succión o presiones negativas, las cuales actúan como fuerzas resistentes que tratan de impedir las fallas al cortante o el colapso. El recubrimiento de la superficie de un talud con productos artificiales puede implicar un aumento en los valores de escorrentía, lo cual requiere de la construcción de estructuras de control de aguas superficiales capaces de manejar los volúmenes producidos de acuerdo a la intensidad de las lluvias.

Esta serie de principios generales y metodologías para la reducción de riesgos de deslizamiento y deterioro de los taludes utilizando sistemas de prevención, los cuales requieren de políticas del Estado y de colaboración y conciencia de las comunidades. Sin embargo, la eliminación total de los problemas no es posible mediante métodos preventivos en todos los casos y se requiere establecer medidas de control para la estabilización de taludes susceptibles a sufrir deslizamientos o deslizamientos activos.

La estabilización de deslizamientos activos o potencialmente inestables es un trabajo relativamente complejo, el cual requiere de metodologías de diseño y construcción. En la presente tesis se presentara algunos de los sistemas de prevención, manejo, y estabilización de deslizamientos para los cuatro taludes analizados de suelos residuales.

### **4.8.1 TÉCNICAS PARA LA PROTECCIÓN DE TALUDES EN GENERAL**

#### **4.8.1.1 Cobertura vegetal árboles, arbustos y pastos**

El tipo de vegetación, tanto en el talud como en el área arriba del talud es un parámetro importante para su estabilidad. La vegetación cumple dos funciones principales. En primer lugar tiende a determinar el contenido de agua en la superficie y además, da consistencia a la superficie del talud por el entramado mecánico de sus raíces. Como controlador de infiltraciones tiene un efecto directo sobre el régimen de aguas subterráneas y actúa posteriormente como secador del suelo, al tomar el agua que requiere para vivir.

En regiones tropicales húmedas, es suficiente colocar semillas en los taludes para revegetalizar. En regiones más secas se debe elegir con más cuidado las especies y generalmente plantarlas uno por uno.

Generalmente el proceso de revegetalización de taludes se ha concentrado en el uso de pastos olvidándose de los arbustos, hierbas y árboles. Como regla general nunca debe plantarse una sola especie sino una sucesión de variedades en tal forma que se recupere el sistema vegetativo original.

#### **4.8.1.2 Concreto lanzado con refuerzo de malla electro soldada.**

El concreto lanzado ayuda a recubrir el talud en ciertos subtramos, cuenta con un espesor del orden de 6 a 10 centímetros, su uso requiere de una previa colocación de malla electro soldada con alambres de 3.43 milímetros de diámetro y con una abertura de 10 x 10 centímetros; la malla debe colocarse de arriba hacia abajo conforme el avance del corte.

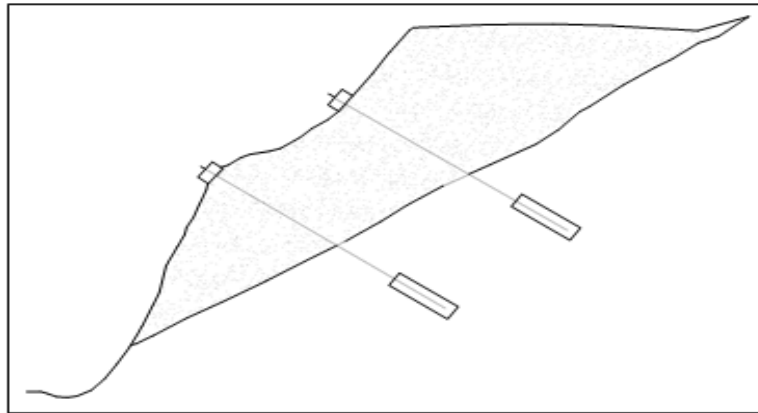
La malla se fija al talud mediante anclas cortas de 50 centímetros de longitud y con un diámetro de 13 milímetros, formando una cuadrícula con separación de 2 metros. Para las superficies irregulares, la cuadrícula se puede cerrar para garantizar que la malla quede pegada a la superficie del talud, la malla debe cubrir una superficie de aproximadamente 2 metros hacia adentro, a partir de la línea de ceros del corte.

Para evitar infiltraciones y cambios volumétricos en el interior del corte, se debe recubrir mediante zampeado (previa colocación de la malla metálica).

### 4.8.1.3 Anclajes.

Los anclajes son armaduras metálicas, alojadas en taladros perforados desde el talud y cementadas.

Son elementos que trabajan a tracción y que colaboran a la estabilidad del talud de dos formas:



Fuente: Manual de Ingeniería de Taludes, Pág. 310.

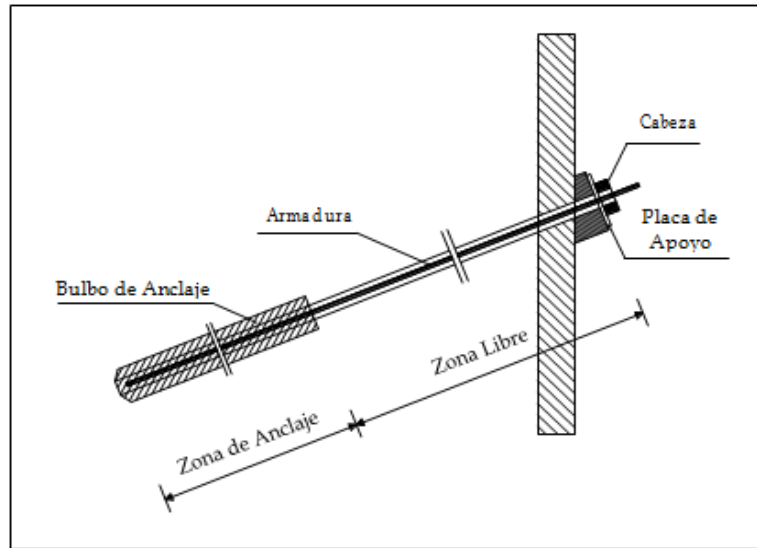
Fig. 4.4

- Proporcionan una fuerza contraria al movimiento de la masa.
- Producen un incremento de las tensiones normales en la existente y potencial superficie de rotura, la que provoca un aumento de la resistencia al deslizamiento en dicha superficie.

En un anclaje se distinguen tres partes fundamentales:

- a) Zona de anclaje, es la parte adherida al terreno en profundidad encargada de transferir los esfuerzos mismos.
- b) Zona libre, es la parte en que la armadura se encuentra independizada del terreno que la rodea, de forma que puede deformarse con total libertad al ponerse en tensión.
- c) Cabeza, es la zona de unión de armadura con la placa de apoyo.

d) Placa de apoyo.



Fuente: Manual de Ingeniería de Taludes, Pág. 310.

Fig 4.5

#### 4.8.1.4 MUROS.

Se emplean frecuentemente como elementos resistentes en taludes, para estabilizar deslizamientos existentes o potenciales, al introducir un elemento de contención en el pie.

Pueden representar sin embargo un inconveniente, y es que su construcción exige una cierta excavación en el pie del talud, situación que favorece la inestabilidad hasta que el muro esté completamente instalado. En adición probablemente pueden no ser capaces de evitar posibles deslizamientos, por encima o por debajo del mismo.

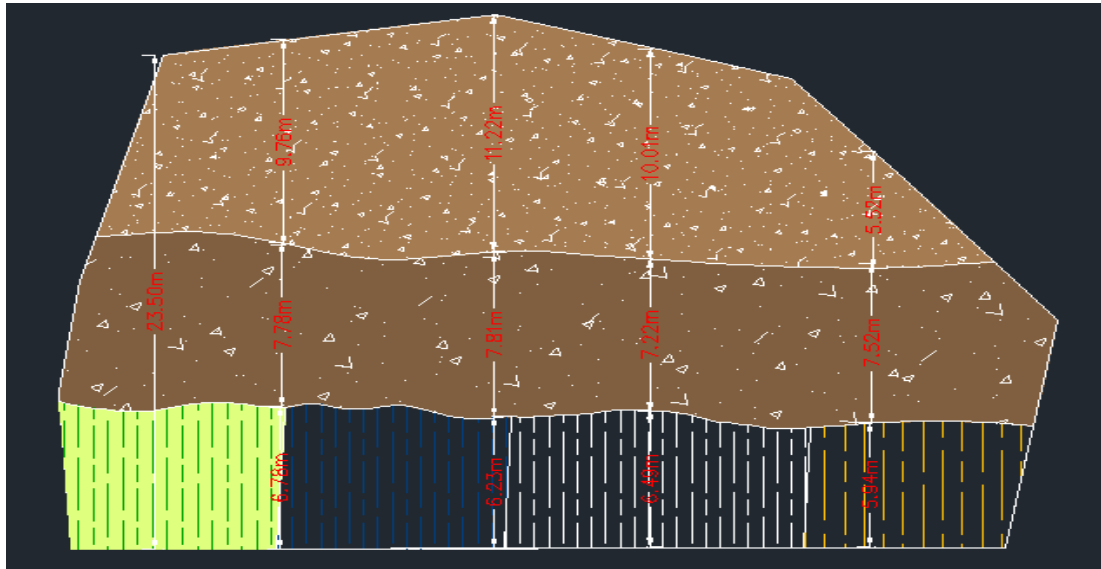
En desmontes y terraplenes en los que la falta de espacio impone taludes casi verticales, el empleo de muros puede ser casi obligado. Esta situación es frecuente en la construcción de vías de transporte.

En general, su construcción es una operación costosa. Sin embargo, son empleados con frecuencia ya que en muchos casos constituyen la única alternativa viable.

### 4.9 ANÁLISIS GEOLÓGICO.

### 4.9.1 TALUD 1

El análisis geológico, muestra una estructura bastante desigual en la parte interior con cambios de estratificación a lo vertical del talud y en la parte del cuerpo ya presenta una estratificación horizontal, donde se identifica dos el angulos de buzamientos uno en la parte inferior de 50° y 60° con rumbos de 10 a 35° S E



Fot. 4.13

### 4.9.2 TALUD 2

El análisis geológico del talud 2, muestra una estructura bastante desigual en el macizo rocoso con cambios de estratificación a lo vertical del talud y en la parte del cuerpo donde se identifica ángulos de buzamientos de  $44^{\circ}$  a  $65^{\circ}$  con rumbos de  $22^{\circ}$  a  $25^{\circ}$  S E



Fot. 4.14

### 4.9.3 TALUD 3

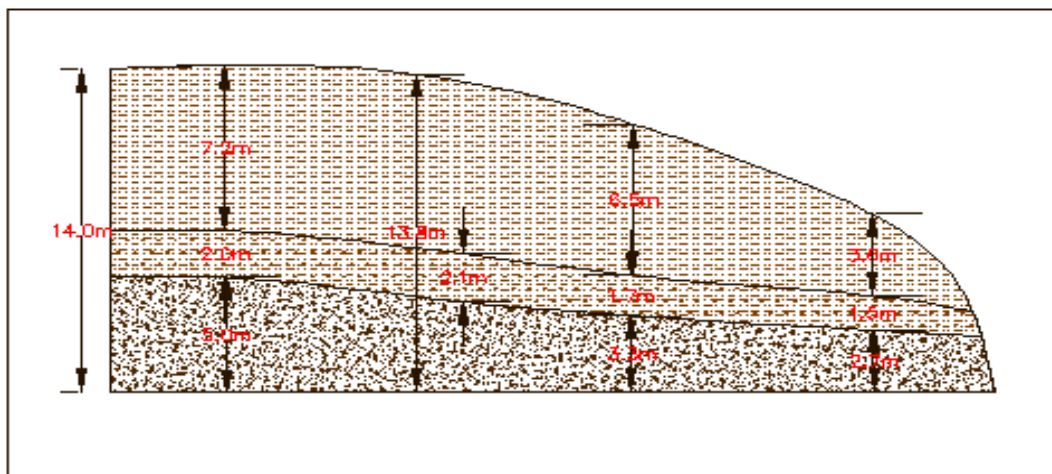
El análisis geológico del talud 3, muestra una estructura bastante uniforme con cambios de estratificación a lo largo del talud y en la parte del cuerpo donde se identifica una estratificación variable con ángulos de buzamientos de  $34^{\circ}$  a  $42^{\circ}$  con rumbos de  $88^{\circ}$  a  $85^{\circ}$  S W



Fot. 4.15

#### 4.9.4 TALUD 4

El análisis geológico, muestra una estructura bastante uniforme en todo el macizo rocoso en las que se identifican, además de la estratificación, juntas o diaclasas de relevancia menor, donde se identifica dos buzamientos uno en la parte inferior de  $57^\circ$  y en la parte del extracto superior se identifica un buzamiento de  $40^\circ$  con rumbos de  $20^\circ$  N E





Fot. 4.16

## CAPITULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 CONCLUSIONES.

En el presente trabajo, por tratarse de realizar el análisis de los suelos residuales en el tramo la Mamora – Emborozu y ver sus características se ha llegado a las siguientes conclusiones.

- Los Estudios mencionados en este trabajo proporcionan una visión global de las características geotécnicas de los suelos típicos de los suelos residuales del tramo de estudio, así como también algunas de sus condiciones y parámetros geotécnicos. Todo esto permitirá en el futuro el desarrollo de nuevos patrones de comportamiento considerando su evaluación experimental y tratamiento estadístico para llegar a una determinación más aproximada de las propiedades ingenieriles que permitan en el futuro la discretización de estas características geotécnicas de suelos residuales, y por lo tanto, comportamiento en las obras de ingeniería civil.
- como se ha indicado estos materiales geotécnicos no encuadran satisfactoriamente con muchos de los criterios y métodos tradicionales utilizados en la mecánica de suelos, desarrollando en muchos casos mayores o menores resistencias que lo previsto, debido a que, en estos suelos parcialmente saturados se altera en forma significativa su comportamiento mecánico con las variaciones de humedad prevalecientes en el campo.
- En el tramo escogido para el estudio la Mamora – Emborozu se estudió 4 taludes identificados con suelo residual Talud 1 en la prog. 45+900, Talud 2 en la prog. 48+000, Talud 3 en la prog. 52+600 y talud 4 en la prog. 55+500.
- De acuerdo a los estudios de ensayo de corte directo se concluye que los taludes presentan los siguientes valores de cohesión y ángulo de fricción

Talud 1 pie cohesión ( $0.08 \text{ kg/cm}^2$ ) y ángulo de fricción de ( $42^\circ$ ), Talud 1 cuerpo cohesión ( $0.10 \text{ kg/cm}^2$ ) y ángulo de fricción de ( $32^\circ$ ), Talud 2 pie cohesión ( $0.08 \text{ kg/cm}^2$ ) y ángulo de fricción ( $34^\circ$ ), Talud 2 cabecera cohesión ( $0.06 \text{ kg/cm}^2$ ) y ángulo de fricción ( $36^\circ$ ), Talud 3 pie cohesión ( $0.15 \text{ kg/cm}^2$ ) y ángulo de fricción ( $37^\circ$ ), Talud 3 cuerpo cohesión ( $0.13 \text{ kg/cm}^2$ ) y ángulo de fricción ( $34^\circ$ ), Talud 3 cabecera cohesión ( $0.15 \text{ kg/cm}^2$ ) y ángulo de fricción ( $23^\circ$ ), Talud 4 cohesión ( $0.10 \text{ kg/cm}^2$ ) y ángulo de fricción ( $35^\circ$ ). Talud 4 cohesión ( $0.09 \text{ kg/cm}^2$ ) y ángulo de fricción ( $34^\circ$ ). Ya que se establece que estos valores están en el rango para arenas.

- El talud 1, 2 y 4 de acuerdo al valor obtenido del factor de seguridad nos dio mayor a 1 se considera estable debido a que el proceso de meteorización esta parcial y no se nota una degradación total mientras que en el talud 3 nos dio un factor de seguridad menor a 1 por lo cual se considera inestable ya que su material se encuentra en proceso degradación total lo cual hace que el talud sea inestable.

- viendo los diversos y la cantidad de métodos que se utilizan para la estabilidad de taludes, los cuales dan resultados diferentes y en ocasiones contradictorios son una muestra de la incertidumbre que caracteriza los análisis de estabilidad.

Los métodos más utilizados por los ingenieros geotécnicos en todo el mundo son los simplificados de Bishop y de fellenius por los cuales métodos se analizó, ya que estos son más acertados y se adecuan a las condiciones.

- Los valores obtenidos por las pruebas de laboratorio para las muestras de suelo de los taludes de cada tramo tomadas como densidad in situ, clasificación del suelo y los valores de Cohesión “C” y el ángulo de fricción interno “ $\phi$ ”, estos parámetros sirvieron para determinar el grado de estabilidad de los taludes, estos reflejan los siguientes resultados prog. 45+900 F.S.= 1.18 prog. 48+000 F.S.= 1.04, prog. 52+600 F.S.= 0.93 prog. 55+500

F.S.= 1.01 los mismos nos indica la situación de estabilidad del talud, podemos ver que las tres progresivas son estables pero no garantizan seguridad porque superan con poco el límite de la inestabilidad un talud su factor de seguridad es bajo y requiere alguna protección para que no se deslice.

- Analizando y al verse demostrado que el talud 3 es inestable ya que tiene un factor de seguridad menor a 1 por tanto su condición es inestable proponemos como alternativas de solución aumentar la altura del muro ciclópeo, también anclajes para el talud ya que colabora a la estabilidad del talud proporcionando una fuerza contraria al movimiento de la masa y también provoca un aumento de la resistencia al deslizamiento en dicha superficie, también como alternativa también podría darse como solución la cobertura vegetal árboles, arbustos y pastos ya que es más económico.
- Se pudo evidenciar también que las progresivas 1, 2 4 de los taludes analizados a pesar de existir vegetación en los taludes de igual manera se podría ver algunas alternativas para protección para el futuro aunque no presentan riesgos de inestabilidad.
- Se puede decir que cuando se hace la conformación de una carretera modificamos todo un sistema de suelos que se encuentra en equilibrio, afectamos su estructura, geología y modificamos el curso de las aguas superficiales y subterráneas, teniendo a que en cualquier momento estos materiales vuelvan a acomodarse o reacomodarse y en este proceso es donde se dan la conformación de deslizamientos en diferente forma y magnitud.

## 5.2 RECOMENDACIONES.

- La identificación de los taludes de suelos residuales son un tanto dificultosas; pero, importantes para tomar previsiones sobre este problema, para la misma será preciso realizar una visita al lugar. La inspección se deberá realizar partiendo del panorama general hacia los detalles particulares. Tales como: la inclinación de las laderas y sus cambios de pendiente, relacionándolos con las variaciones de materiales que indique la Geología superficial. De todo el diagnóstico realizado por la inspección técnico visual determinar e identificar la estabilidad del talud de suelo residual.
- En la gran mayoría de los casos será muy difícil proveer la existencia de futuros deslizamientos, y el Ingeniero deberá limitarse a extremar sus precauciones en aquellos lugares en que exista una secuencia de materiales digna de desconfianza.
- Es recomendable que las muestras de masa que sean tomadas del talud en análisis estas no sufran alteraciones, para que así se obtengan resultados más reales y verídicos del lugar que se esté estudiando y para que así no se tenga valores errados.
- Una recomendación que no puede pasar desapercibido para las personas que trabajan dentro del tema de la estabilización de taludes, que se deben realizar los ensayos de resistencia al cortante efectuados en los suelos de nuestro país agrupan del lado conservador a los ensayos de laboratorio convencionales efectuados en estado saturado, esto es ensayos triaxiales consolidado no-drenados o no-consolidados no- drenados; y del lado más real a los ensayos de campo que arrojan siempre valores mucho más confiables que los ensayos de laboratorio.
- Si se quiere aplicar la protección con vegetales se debe tener muy en cuenta la experiencia local a la zona del proyecto, se debe acudir a los expertos forestales y además recurrir a los comunarios de la zona en donde el estudio se realiza ya que

ellos son los que conocen mejor que nadie quizás la vegetación de su región, en base a esas características escoger la especie de vegetación para su aplicación.

- Finalmente se presenta como recomendación la utilización de un sistema computarizado para el cálculo de estabilidad de taludes mediante el método de círculo de falla crítico para suelos de distintas características y fenómenos naturales que se pueden presentar.