

CAPÍTULO I
FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

CAPÍTULO I

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

1.1. LAS CARRETERAS Y SUS CARACTERÍSTICAS

Una carretera es una infraestructura de transporte especialmente acondicionada dentro de toda una faja de terreno denominada derecho de vía, con el propósito de permitir la circulación de vehículos de manera continua en el espacio y en el tiempo, con niveles adecuados de seguridad y comodidad.

Una vía será funcional de acuerdo a su tipo, características geométricas y volúmenes de tránsito, de tal manera que ofrezca una adecuada movilidad a través de una suficiente velocidad de operación.

La vía será cómoda en la medida en que se disminuyan las aceleraciones de los vehículos y sus variaciones. La vía será estética al adaptarla al paisaje permitiendo generar visuales agradables a las perspectivas cambiantes, produciendo en el conductor un recorrido fácil. La vía será económica, cuando cumpliendo con los demás objetivos ofrece el menor costo posible tanto en la construcción como en el mantenimiento. Finalmente la vía será compatible con el medio ambiente adaptándola en lo posible a la topografía natural, a los usos del suelo y al valor de la tierra, procurando y mitigar o minimizar los impactos ambientales.

Los factores o requisitos del diseño a tener en cuenta se agrupan en externos o previamente existentes, e internos o propios de la vía y su diseño.

- Factores externos; están relacionados, entre otros aspectos, con la topografía del terreno natural, la conformación geológica y geotécnica del mismo, el volumen y características del tránsito actual y futuro, los valores ambientales, la climatología e hidrología de la zona, los desarrollos urbanísticos existentes y previstos, los parámetros socioeconómicos del área y la estructura de las propiedades.

- Factores internos; contemplan las velocidades a tener en cuenta para el mismo y los efectos operacionales de la geometría especialmente los vinculados con la seguridad exigida y los relacionados con la estética y armonía de la solución.

1.1.1 CLASIFICACIÓN DE LAS CARRETERAS

1.1.1.1. Según su competencia

- Carreteras Nacionales.
- Carreteras Departamentales.
- Carreteras Veredales o Vecinales.
- Carreteras Distritales y Municipales.

1.1.1.2. Según sus características

- Autopistas.
- Carreteras Multicarril.
- Carreteras de dos carriles.

1.1.1.3. Según el tipo de terreno

- Carreteras en terreno plano.
- Carreteras en terreno ondulado.
- Carreteras en terreno montañoso.
- Carreteras en terreno escarpado.

1.1.1.4. Según su función

- Carreteras principales o primer orden – Troncales
- Carreteras secundarias o de segundo orden – conectan una municipal con una principal –
- Carreteras terciarias o de tercer orden – vecinales

	Escarpado										
Carretera terciaria.	Plano										
	Ondulado										
	Montañoso										
	Escarpado										

1.2. PAVIMENTOS FLEXIBLES Y SU ESTRUCTURA

Los pavimentos flexibles están formados por una serie de capas constituidas por materiales con una resistencia a la deformación que inicialmente es decreciente con la profundidad, de modo análogo a la disminución de las presiones transmitidas desde la superficie.

Los pavimentos flexibles son una estructura formada por varias capas (de rodadura, base, sub base y sub rasante) con el fin de satisfacer los siguientes propósitos:

- a) Resistir y distribuir adecuadamente las cargas producidas por el tránsito
- b) Tener la impermeabilización necesaria
- c) Resistir la acción destructora de los vehículos
- d) Tener resistencia a los agentes atmosféricos
- e) Tener una superficie adecuada de rodadura
- f) Presentar una cierta flexibilidad para adaptarse a algunas fallas de la capa base o sub base

1.2.1. Capa de Rodadura

También llamada carpeta asfáltica, es la parte superior del pavimento y la que soporta directamente las solicitaciones de tráfico, aporta las características funcionales y absorbe los esfuerzos horizontales como parte de los verticales. Es la superficie de rodamiento constituida por materiales endurecidos para pasar minimizados los

esfuerzos hacia las tracerías. Pueden ser materiales granulares con o sin liga, o más comúnmente de concreto asfáltico o hidráulico, en sus diferentes variantes. Constituye el área propiamente dicha por donde circulan los vehículos y peatones.

1.2.2. Capa Base

Constituye la capa intermedia entre la capa de rodamiento y la sub base. Generalmente se la usa en los pavimentos flexibles. Se compone de materiales pétreos con buena distribución granulométrica. Esta capa permite reducir los espesores de carpeta, dada su función estructural importante al reducir los esfuerzos cortantes que se transmiten hacia las capas inferiores. Además cumple una función drenante del agua atrapada dentro del cuerpo del pavimento.

Esta capa puede componerse de grava o agregados triturados, aun cuando los agregados se obtengan de gravas no menos de un 50% en peso de de los agregados gruesos, deberá tener por lo menos una cara fracturada. Así para tráficos medianos y ligeros se emplean las tradicionales bases de macadán, en cambio para tráficos pesados se emplean materiales granulares tratados con un ligante o conglomerante. **Cuadro 2. Especificaciones técnicas capa base**

CARACTERÍSTICAS	CALIDAD	
	DESEABLE	ADECUADA
Tamaño Máximo (mm)	38	51
% de Finos	10 Max.	15 Max
(Mat. 0.074 mm)	-	-
Limite Liquido %	25 Max.	30 Max.
Índice plástico %	6 Max.	6 Max.
Compactación %	100 Min.	100 Min
(AASHTO Est.)	-	-

Equivalente de Arena %	45 Min	30 Min.
CBR %	100 Min.	80 Min.
Desgaste los Angeles	40 Max.	40 Max.

1.2.3. Capa Sub Base

Es una capa de materiales pétreos, de buena graduación, construida sobre la subrasante. Esta capa, al igual que la anterior, deberá cumplir con los requisitos de compactación y de calidad a que se hace referencia para la capa subrasante.

Esta capa es la que subyace a la capa base, cuando ésta es necesaria, como es el caso de los pavimentos flexibles. Normalmente, la sub base se construye para lograr espesores menores de la capa base, en el caso de pavimentos flexibles.

Esta capa puede no ser necesaria con subrasantes granulares de elevada capacidad de soporte. Su función es proporcionar a la base un cimiento uniforme y constituir una adecuada plataforma de trabajo. Es necesario que cumpla también una función drenante, para lo cual es indispensable que los materiales usados carezcan de finos.

Cuadro 3. Especificaciones técnicas capa sub base

CARACTERÍSTICAS	CALIDAD		
	DESEABLE	ADECUADA	TOLERABLE
Tamaño Máximo (mm)	51	51	76
% de Finos	15 Max.	25 Max	10 Min.
(Mat. 0.074 mm)			20 Max.
Límite Líquido %	25 Max.	30 Max.	40 Max.
Índice plástico %	6 Max.	10 Max.	15 Max.

Compactación %	100 Min.	100 Min	95 Min.
(AASHTO Modif.)	-	-	AASHTO estandar
Equivalente de Arena %	45 Min	30 Min.	-
CBR %	40 Min.	30 Min.	30min.
Desgaste los Angeles	30 Max.	-	-

1.2.4. Capa Sub rasante

La sub rasante se refiere al suelo que se encuentra aproximadamente un metro bajo el pavimento. Para terraplén es la parte que se encuentra a una profundidad de un metro bajo la superficie acabada del mismo. En caso de corte la sub rasante implica la parte bajo un metro bajo la superficie excavada. Esto también incluye material de relleno que reemplaza completa o parcialmente al suelo natural inapropiado para la construcción de caminos suelos estabilizados tratado con cal cemento, el material de relleno utilizado en una sección de transición entre el corte y el terraplén y la capa filtrante diseñada para impedir que el suelo de la sub rasante se introduzca a la capa sub base. La superficie de sub rasante terminada se introduzca a la capa sub base. De acuerdo al estudio que se realiza (ensayos de laboratorio) se emplea para el diseño preliminar el valor de capacidad Soporte de California. En esta capa el uso de suelo generalmente es el suelo que se encuentra en la Sub rasante, en caso de que este suelo sea malo se lo cambia por otro.

Entre las especificaciones que debe cumplir el suelo para esta capa están detallados en la siguiente tabla:

Cuadro 4. Especificaciones técnicas sub rasante

CARACTERÍSTICAS	CALIDAD		
	DESEABLE	ADECUADA	TOLERABLE
Tamaño Máximo (mm)	76	76	76
% de Finos	-	-	-
(Mat. 0.074 mm)	25 Max.	35 max.	40 Max.
Limite Líquido %	30 Max.	40 Max.	50 Max.
Índice plástico %	10 Max.	20 Max.	25 Max.
Compactación %	100 Min.	100 + - 2	100 + - 2
(AASHTO Est.) (1)	-	-	-
CBR %	30 Min.	20 Min.	15 min.

(1) con la humedad de compactación hasta 3% mayor a la optima.

1.3. Geología General

1.3.1. Factores condicionantes

1.3.1.1. La Morfología.- Es considerado como el factor más importante de todos, ya que se necesita de cierta pendiente para que se produzcan los movimientos de ladera. Las regiones montañosas, por ejemplo, son las zonas más propensas a los movimientos de ladera. Este factor también se le conoce con el nombre de factor de relieve, topográfico o geométrico.

1.3.1.2. La Geología.- Este factor es determinante al contribuir con los movimientos en los diferentes tipos de suelos y rocas. Aspectos como la composición, resistencia, deformabilidad, grado de alteración y fracturación, porosidad y permeabilidad determinan la posibilidad del terreno de sufrir

roturas y desplazamientos. Este factor también recibe el nombre de factor litológico o estratigráfico.

1.3.1.3. El Agua Subterránea.- El agua subterránea juega un triple papel negativo en la resistencia de los materiales: a) reduce la resistencia por la generación de presiones intersticiales b) incrementa del peso del terreno y c) contribuye a la meteorización de los suelos y rocas. A este factor también se le denomina factor humedad.

1.3.2. Factores Desencadenantes.

1.3.2.1. La Lluvia.- Los deslizamientos por causa de lluvias están relacionados con el volumen, intensidad y distribución de las precipitaciones. En consecuencia, es importante tomar en consideración la respuesta del terreno a precipitaciones durante horas, días, meses, años o incluso, durante ciclos de lluvia y sequía de varios años. La lluvia contribuye a elevar el nivel de agua subterránea, ocasionando incrementos en las presiones intersticiales, aumento de peso, procesos de erosión interna y cambios mineralógicos, aspectos todos ellos que modifican las propiedades y resistencia de los suelos.

1.3.2.2. La Sismicidad.- Los sismos pueden provocar deslizamientos de todo tipo, dependiendo de las características de los suelos, de la magnitud y de la distancia al epicentro. Derrumbes, deslizamientos y flujos pueden ocurrir durante las sacudidas sísmicas.

La susceptibilidad de una masa de terreno a deslizar entendida esta palabra en su sentido más amplio y no como referencia al fenómeno de inestabilidad conocido como deslizamiento, depende básicamente, de los siguientes factores:

1. Geológicos
2. Meteorización
3. Topográficos

4. Hidrológicos
5. Vegetación
6. Sobrecargas
7. Impacto y vibración

Muchas veces se ve que cuando ocurre un deslizamiento es ocasionado por la combinación de los factores ya mencionados los cuales se analizarán más adelante.

1.3.3. Factores Geológicos

Si las fracturas ligadas a la tectónica tienen una inclinación desfavorable, aun en ausencia de agua, pueden producirse inestabilidades. Lo mismo se podría decir en relación con las fallas, la degradación que pueden sufrir los materiales situados en sus proximidades, es también una causa muy frecuente de producción de inestabilidades.

La geología dentro la inestabilidad de taludes, las estructuras como los plegamientos, los buzamientos las capas tienen influencia sobre el principio de los deslizamientos.

Cada formación geológica posee una susceptibilidad específica a los deslizamientos y los mapas de inventario de deslizamientos presentan densidades de número o tamaño de los movimientos que son característicos de determinadas áreas dentro de cada formación geológica. **Cuadro5. Clasificación general de ingeniería de los diversos materiales geológicos**

Tipo de material	Formación	Características	Detalles prioritarios
Roca	Ígnea	Rocas formadas por	Estructura geológica.
	Metamórfica	cristales de minerales	Fracturas.
	Sedimentaria (debe definirse el tipo de roca en la forma más detallada posible).	Rocas formadas por granocementados, depositados en capas.	Planos de estratificación.

Roca meteorizada (saprolito)	Ígnea Metamórfica Sedimentaria	Permanecen algunos rasgos de la roca pero ésta se encuentra descompuesta, en las discontinuidades.	Estructura geológica Discontinuidades Estado de meteorización.
Suelo	Residual Aluvial Coluvial. Glacial Loess	Roca meteorizada en la cual ya no aparecen las características físicas de la roca. Grupos de partículas o bloques de suelo o roca.	Estructura geológica. Discontinuidades. Propiedades fisicoquímicas. Propiedades físicas.
Materiales Heterogéneos	Roca, roca meteorizada, suelo.	Mezcla de diversos materiales en un mismo perfil.	Estructura geológica. Discontinuidades. Meteorización. Propiedades fisicoquímicas.

1.3.4. La Columna Geológica

En la cronología clásica, las eras, de la más antigua a la más reciente, se suceden así: a la era arcaica, la que se entendió como era azoica, le suceden las eras donde evoluciona la vida, y así viene la primaria; luego la secundaria, la terciaria y la cuaternaria, llegando esta última hasta el tiempo actual. Esa cronología ha sido sustituida por la cronología moderna del cuadro en el que se incluyen los eones, y terciario y cuaternario forman una sola era. A cada unidad de la escala de tiempo geológico corresponde otra en el haz de la serie de materiales de la corteza que la integran; esta correspondencia es la siguiente:

Las características correspondientes a cada era de la columna geológica nos indica un determinado tipo de roca lo cual influye en la formación del talud, la estructura de éste es influenciada ya que depende del tipo de roca que corresponde a éste.

La importancia de conocer la columna geológica para determinar los factores geológicos que influyen en la inestabilidad de los taludes los cuales se indicarán más adelante.

Cuadro 6. Escala de tiempo geológico

ERAS	PERIODOS	ÉPOCAS	LA VIDA
Cenozoica Dura 70 millones de años (inicia hace 70 m.a.)	Cuaternario	Holoceno	Hombre actual
		Pleistoceno	Hielo
	Terciario	Plioceno	Predomino flores
		Mioceno	Desarrollo mono
		Oligoceno	Pastos y praderas
		Eoceno	Caballo primitivo
		Paleoceno	Inician mamíferos
Mesozoica 150 m. a. (hace 220 m.a.)	Cretácico	Extinción dinosaurios	
	Jurásico	Aparecen las aves	
	Triásico	Aparecen dinosaurios	
Paleozoica dura 330 m.a. Inicia hace 550 m. a.	Pérmico	Reptiles	
	Pennsylvánic	Carbonífero superior	
	o	Carbonífero inferior	
	Mississípico	Desarrollo de fauna de peces	
	Devónico		

	Silúrico	Plantas y animales terrestres
	Ordovícico	Primeros vertebrados (peces)
	Cámbrico	Abundancia de fósiles invertebrados
Precámbrico	Algónquico	Plantas e invertebrados marinos
<3.500 m. a.	Arcaico	Gran período azoico

1.3.5. Unidades Morfo Estructurales de Bolivia.- Bolivia es un país donde los planos latitudinales marcan diferencias no sólo de relieve sino de clima, vegetación, suelos, flora y fauna. La diversidad de formas topográficas a lo largo y ancho del país, es resultado de la acción de fenómenos complejos de erosión, transporte y sedimentación, ligados con fenómenos de tectonismo y de vulcanismo.

Teniendo en cuenta los grandes factores morfológicos y geológicos, el país puede dividirse en dos unidades mayores: el bloque andino elevado y frío, y los llanos bajos, húmedos y calientes.

El bloque andino es el relieve montañoso cuyo límite inferior se establece en 500 m.s.n.m. y su máxima altura en 6542 m. Presenta dos vertientes con bastantes diferencias, la occidental fría y seca que termina en el altiplano y la oriental cálida, húmeda y boscosa que sin solución de continuidad va descendiendo a las sierras sub andinas y a la llanura amazónica en su límite norte, y al Chaco en su parte septentrional.

El bloque andino abarca el 38% del territorio nacional con una extensión de 414.574 Km² y comprende las cordilleras Occidental y Oriental con el altiplano, todos los valles y yungas, el sub andino que es la región intermedia entre la Cordillera Oriental y los llanos orientales

Los llanos abarcan el 62% del territorio nacional con una superficie de 684.007 Km².

Estas unidades mayores se van subdividiendo en otras menores caracterizadas por peculiaridades propias que forman las seis provincias fisiográficas.

1.3.6. Provincias Fisiográficas

La Provincia Fisiográfica corresponde a una región natural en la que pueden existir uno o más tipos de climas, dentro un conjunto de unidades geológicas y topográficas.

A continuación se hará una descripción general de las provincias fisiográficas tradicionales del país que son de Oeste a Este:

A-1 Cordillera Occidental o volcánica

A-2 Altiplano

B. Cordillera Oriental

C. Subandino

D. Llanuras

E. Escudo brasileño

Estas provincias pueden subdividirse en otras menores en base a una mayor información.

1.3.7. Tipos de Suelos Geológicos.- Los suelos geológicos se pueden dividir de acuerdo a sus características propias.

a) Areniscas.- Las areniscas son una forma de arena endurecida por procesos geológicos. El tamaño de los granos varía de 60 um. a varios mm. Y están cementados por otros minerales, con frecuencia por el cuarzo precipitado.

Las Areniscas se clasifican de acuerdo al tamaño de sus granos como fina, media o gruesa y de acuerdo a la naturaleza de los materiales cementantes. Las areniscas aunque tienden a ser resistentes, en ocasiones son relativamente débiles cuando su cementación ha sido pobre.

b) Lutitas.- Las Lutitas son uno de los materiales más complejo desde el punto de vista de estabilidad de taludes. De acuerdo con el grado de solidificación las Lutitas varían en su comportamiento. Las lutitas de grado bajo tienden a desintegrarse después de varios ciclos de secado y humedecimiento. Algunas Lutitas son muy resistentes pero la mayoría presentan una resistencia al cortante, de mediana a baja. Las lutitas pueden ser arcillosas, limosas, arenosas o calcáreas de acuerdo a los tamaños y composición de las partículas. En ocasiones tienen una presencia de roca cementada y en otras el de un suelo con capas relativamente sueltas.

c) Calizas.- La caliza es una roca sedimentaria con más del 50% de carbonato de calcio. Esta roca es por lo general dura y compacta, pero se presentan problemas geotécnicos relacionados con la disolución del CaCO_3 .

d) Evaporitas.- Las Evaporitas incluyen el yeso, la anhidrita y halita. Ellas, generalmente están asociadas con las arcillolitas, las limolitas y las calizas, formando capas de evaporitas.

e) Suelos residuales.- Los suelos residuales son el producto de la meteorización de las rocas y su comportamiento depende de las propiedades de la roca original y del grado de descomposición. Los deslizamientos de tierra son muy comunes en suelos residuales, especialmente en los periodos de lluvias intensas.

f) Suelos aluviales.- Los suelos aluviales son depósitos transportados por el agua en movimiento y depositados cuando la velocidad del agua ha disminuido; estos materiales pueden ser de origen fluvial o lacustre y pueden contener partículas finas, gruesas o entremezcladas. Los depósitos aluviales generalmente, son estratificados y la permeabilidad en la dirección horizontal es mayor que en la dirección vertical. Los suelos aluviales, compuestos por arcilla tienden a ser blandos y los de arena tienden a ser sueltos. Debido a su poca cementación, los materiales aluviales son propensos a erosión y deslizamientos.

g) Suelos glaciales.- Los depósitos glaciales son transportados por los glaciales, los cuales al aumentar la temperatura, se deshuelan y se forman estos depósitos de suelo

de origen glacial. Los depósitos glaciales pueden variar en composición de tamaño de granos, desde grandes cantos hasta las arcillas.

h) Suelos eólicos.- Los suelos Eólicos son transportados por el viento y varían desde Dunas de arena hasta Loess, que son depósitos de arena fina y limos. Generalmente, tienen muy poca vegetación y los materiales son muy ricos en cuarzo y poco densos.

El principal problema de los depósitos Eólicos es la erosión.

i) Depósitos orgánicos.- Son depósitos de materiales orgánicos, los depósitos de turba o material orgánico que no se ha descompuesto totalmente, debido a su alto contenido de agua. Los depósitos orgánicos en ocasiones se encuentran estratificados con otros elementos tales como limos o arenas o entremezclados con arcilla.

j) Suelos coluviales.- Los suelos coluviales o coluviones son depósitos de ladera, producto de desprendimientos o deslizamiento de roca o suelo y son materiales muy susceptibles a los deslizamientos.

1.3.8. Estructura de la Masa de Roca.- El término estructura se refiere al sistema de discontinuidades en la masa de roca y el término discontinuidad se utiliza para describir las diversas superficies a lo largo de las cuales, la consistencia de la roca intacta se interrumpe. Si en la roca sana o meteorizada aparecen discontinuidades o planos de debilidad, éstos pueden definir el mecanismo de falla del talud. Los principios del análisis dependen de:

- a) La identificación de los sistemas de juntas y otras discontinuidades.
- b) La relación de estos sistemas con las posibles superficies de falla.
- c) Los parámetros de resistencia de las juntas y su relleno.
- d) La presión de agua en las discontinuidades.

1.3.9. Estratificación.- La estratificación corresponde a los contactos de depositación de materiales, que ocurrieron durante el proceso de formación de la roca. Por ejemplo en las rocas sedimentarias es común encontrar mantos de arenisca formados sobre mantos de lutita o viceversa. En rocas volcánicas

también se presentan superficies de estratificación como se puede observar en la, en donde se ve claramente un manto de cenizas volcánicas sobre un Basalto.

1.3.10. Discontinuidades paralelas a la estratificación.- Los cambios que ocurrieron durante el proceso de sedimentación pueden haber producido juntas paralelas a ésta. Por ejemplo, cuando en el proceso de sedimentación se depositaron capas de diferente tamaño de grano. Otro caso de estas juntas se debe al agrietamiento por consolidación de las rocas sedimentarias o a procesos tectónicos.

Esta estratificación estructural puede también ser el resultado de compresiones u otro tipo de esfuerzos.

1.3.11. Discontinuidades paralelas a la esquistocidad.- De manera similar a la estratificación pueden aparecer juntas paralelas a la esquistocidad, las cuales ocurren a espaciamentos diferentes y con persistencia diferida.

1.3.12. Pliegues.- La formación de pliegues tanto en rocas sedimentarias como metamórficas es causada por cargas tectónicas, resultando en la formación de plegamientos de la esquistocidad o estratificación. Los esfuerzos sobre la roca que ocurren durante la formación de los pliegues conducen al desarrollo de juntas. Estas juntas se denominan de acuerdo a su posición con respecto al eje del pliegue, utilizando términos tales como diagonal, transversal o longitudinal, los cuales generalmente se forman a ángulos rectos con estratificación o la esquistocidad plegada. Estas juntas ocasionalmente son interrumpidas por las juntas de estratificación o paralelas a la esquistocidad y es importante definir las características de su continuidad (Figura 2)



Figura 2. Elementos y juntas de un pliegue

1.3.13. Fallas

Las fallas son un elemento muy importante de la masa de roca, debido a que en ellas ha ocurrido desplazamiento de las masas de roca. Las fallas se clasifican de acuerdo a su dirección de desplazamiento (Figura 3.2.4). Debe hacerse una diferenciación entre las fallas hacia abajo del buzamiento y hacia arriba, los movimientos ortogonales al buzamiento y los movimientos de rotación de bloques. Las fallas generalmente, actúan como camino preferido del agua debido a que comúnmente, la roca se encuentra fracturada a lado y lado de la falla. El flujo de agua, produce meteorización química así como lavado y erosión, y éstos a su vez, pueden conducir a una abertura de la superficie de la falla, formando una especie de grietas discontinuas. Estas fallas con frecuencia se encuentran rellenas de materiales.

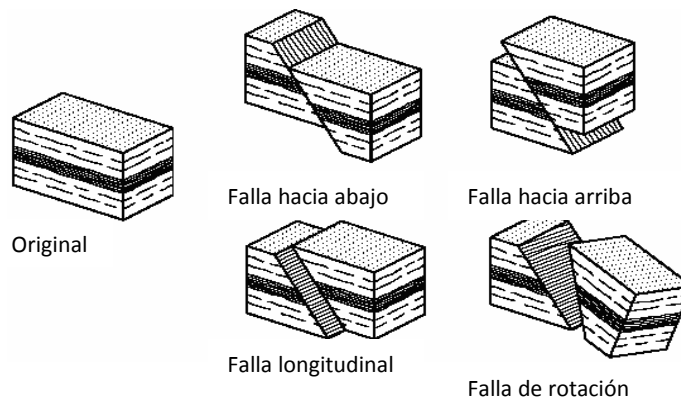


Figura 3. Tipos de falla (Wittke 1990)

Rumbo y buzamiento.- En una discontinuidad geológica se requiere cuantificar su rumbo y buzamiento y compararlo con el del talud (Figura 3). El ángulo de

inclinación que forma el plano de la discontinuidad con la horizontal se le llama buzamiento y puede medirse por medio de un clinómetro en grados y minutos. Normalmente, con el conocimiento de los grados es suficiente ya que el margen de error en la medición es relativamente alto y el buzamiento de la discontinuidad no conserva el mismo valor exacto dentro del talud. La dirección o rumbo de la discontinuidad va a definir junto con el ángulo de pendiente del talud y su rumbo la ocurrencia o no de ciertos tipos de movimiento, especialmente en rocas. Si la orientación de las discontinuidades favorece una falla, la importancia de otros parámetros disminuye (Figura 4).

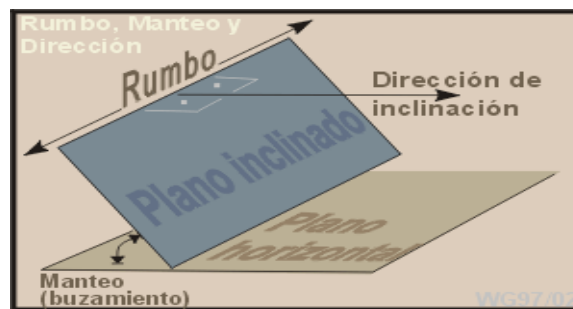


Figura. 4. Rumbo y Buzamiento

Se requiere determinar las discontinuidades cuya orientación es hacia fuera del talud y su peligrosidad aumenta a medida que se acerca su buzamiento a la pendiente del talud.

Continuidad.- La continuidad es una propiedad difícil de evaluar. Este factor puede definir la magnitud de las posibles fallas ocasionadas por la presencia de discontinuidades. La extensión y espaciamiento de las discontinuidades se presenta en la figura, de acuerdo a la clasificación propuesta por Duncan y Goodman (1968). Se propone que se diferencie entre las unidades sencillas no repetidas y aquellas que se repiten en el espacio y que forman un grupo o familia de discontinuidades.

Espaciamiento.- El espaciamiento de las discontinuidades indica la extensión hasta donde las propiedades de la roca intacta y de las propiedades de la discontinuidad separadamente, afectan las propiedades mecánicas del bloque de roca. Una roca es más débil si el espaciamiento es muy cercano y más fuerte si el espaciamiento es

grande. Dentro de una misma formación el espaciamiento cambia de un punto a otro y se requiere caracterizar este fenómeno en los sitios específicos de los problemas a estudiar.

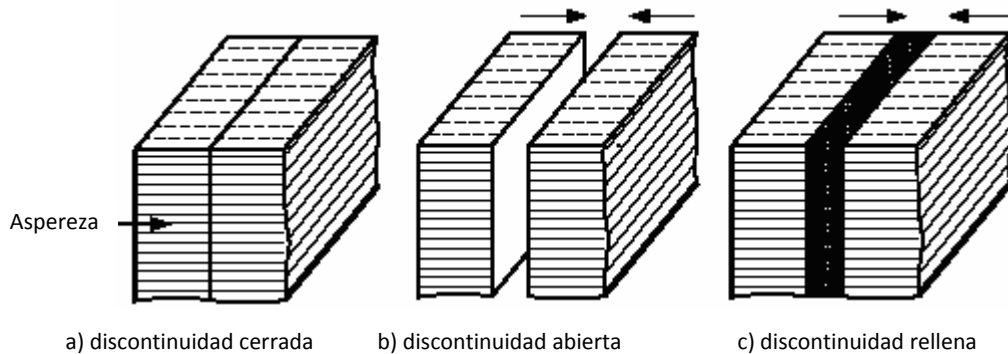


Figura 5. Tipos de discontinuidad

Fallas controladas por la estructura.- Para el análisis de fallas por grupos de discontinuidades se recomienda utilizar el siguiente procedimiento:

1. Determinar los grupos de juntas más “significativos”, evaluando su valor relativo dentro de la familia de las juntas, en cuanto a posibilidad de ocurrencia de un movimiento.
2. Para cada grupo determinar su orientación, buzamiento, espaciamiento, abertura, resistencia al corte, etc.
3. Estudiar por medio de bloques en el espacio las diversas posibilidades de ocurrencia de fallas.
4. Hacer el análisis de estabilidad de cada uno de los bloques identificados.

Debe en todos los casos estudiarse la posibilidad de ocurrencia, no sólo de fallas al corte sino fallas por volteo y fallas de grupos de bloques.

Falla plana.- Es la falla por desplazamiento de la roca sobre una discontinuidad.

Falla en cuña.- Un caso importante y común de falla en roca sucede cuando la intersección de planos de discontinuidad forma un vértice en dirección hacia fuera del

talud. En estos casos se puede producir una falla de una cuña cuando los planos de discontinuidad son independientemente estables.

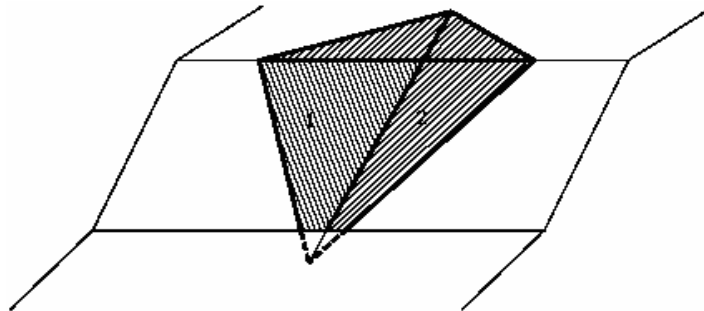


Figura 6. Esquema de la falla de cuña.

1.4. Factores Topográficos

Los cambios en la pendiente del talud puede ser causado por la intervención natural o artificial por ejemplo: por socavación del talud, por erosión o excavaciones.

Excepcionalmente los ángulos de los taludes son empinados como resultado de los efectos tectónicos, tales como asentamientos o levantamientos de la corteza terrestre. El aumento en la pendiente de los taludes produce un cambio en los esfuerzos internos de la masa y las condiciones de equilibrio son alteradas por los incrementos en los esfuerzos cortantes. También es importante saber cuando un talud es producto del corte en montañas es importante saber las características de la montañas

1.4.1 Tipos Básicos de Montañas.- Las montañas se clasifican de acuerdo a sus características geométricas y su origen.

a) Según su altura.- Se distingue entre montañas medias, de formas generalmente redondeadas a consecuencia de diferencias de altura escasas, y montañas altas, de formas agudas y pendientes abruptas, consecuencia de una erosión intensa determinada por el carácter enérgico del relieve (los Alpes).

b) Según su forma y extensión.- Se distinguen montañas en cadena (cordillera, cadenas montañosas), con una serie de cadenas paralelas alargadas, y montañas-macizos, en las que la extensión es, más o menos, igual en todas las direcciones.

c) **Según su origen.**- Se distinguen montañas volcánicas, surgidas por la actividad volcánica, y montañas tectónicas, que, a su vez, pueden ser plegadas (en ellas los pliegues determinan aún las formas y el agrupamiento de las cadenas), falladas o fracturadas (en ellas las fracturas y fallas son las que determinan los rasgos esenciales de la estructura) y plegado-fracturadas (los plegamientos están entremezclados en fallas). Algunos montes se formaron por la **confluencia de placas** tectónicas en desplazamiento y la afluencia de las rocas en sus límites. En este proceso las rocas sedimentarias originarias del fondo oceánico se elevan y forman mesetas intermontañas donde enormes capas horizontales son levantadas, como el Tíbet en el Himalaya a 4200 metros de altitud o la meseta de Colorado en el Gran Cañón a 1600 metros de altura. También forman montañas plegadas, cuando el empuje contra escudos supone el plegamiento de depósitos geosinclinales con espesores de 10 kms, ejemplo Andes, Alpes, Himalaya y Rocallosas. Otras montañas pueden alzarse **por fractura**; tales son las montañas de bloque como las de Ruwenzori entre Uganda y Zaire. Un tercer tipo de montes puede formarse como resultado de la **actividad volcánica** y ello puede ocurrir en regiones de plegamiento orogénico activo como a lo largo de la costa Pacífico donde está el Santa Helena, el Ruiz y el Misti. Hay otro tipo fundamental de montaña, la que nace empujada hacia arriba **por una intrusión** magmática o de un diapiro salino bajo la superficie.

1.4.2 Modificación de la Topografía.- La modificación de la topografía del terreno mediante cortes o rellenos puede producir la activación de un deslizamiento. Un corte en un talud produce varios cambios sustanciales en el estado de la formación residual.

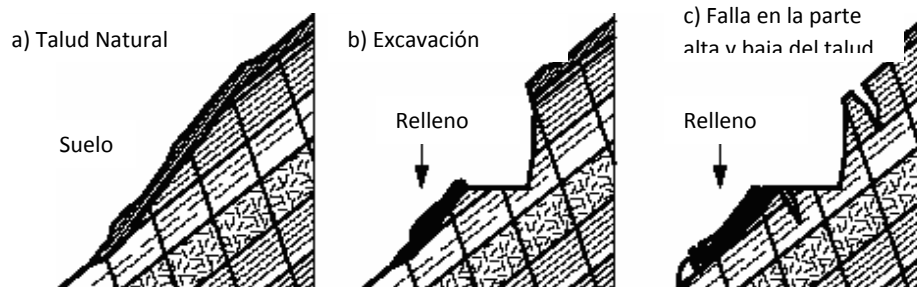


Figura 7. Los cortes y rellenos pueden generar deslizamientos de tierra debidos a los cambios de esfuerzos y a la infiltración de agua

Las excavaciones generan cambios topográficos y concentración de esfuerzos de cortante y en ocasiones descubren superficies críticas para deslizamiento como estratificación, fracturas y planos de cambio de meteorización.

El fenómeno incluye una relajación de los niveles de esfuerzos a compresión y un aumento de los esfuerzos al corte, una exposición del material meteorizado al aire y a los cambios de humedad, alteración de propiedades por cambios físico - químicos causados por la exposición al aire y a la humedad, y modificación de las presiones negativas en el agua de los poros.

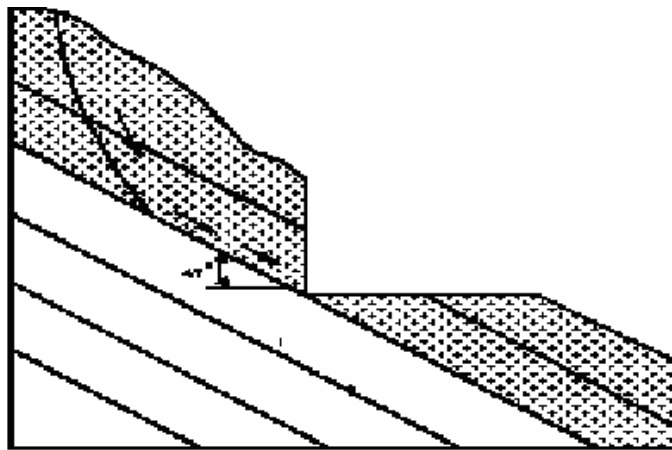


Figura 8. Deslizamiento por cambio en la topografía

Los materiales derivados de la Lutitas son especialmente propensos a los cambios ambientales y algunos materiales, como los derivados de Esquistos, se alteran muy rápidamente siendo cada vez más parecidos a un suelo (Sowers - 1985).

Un fenómeno muy importante es la apertura de discontinuidades heredadas, por acción de la relajación de los esfuerzos de compresión. En ocasiones se forman grietas de tensión, las cuales se convierten en conductos para la transmisión del agua infiltrada y la formación de presiones altas de poros. Generalmente se genera un sector de discontinuidades abiertas semiparalelo a la superficie del corte y de espesor directamente proporcional a la altura del talud cortado el cual es más profundo hacia el pie del corte. La mayor parte de las fallas que ocurren al poco tiempo de ejecutado el corte están relacionados con estas grietas. El resultado puede ser un deslizamiento

de forma lineal o de arco semiplano, el cual rompe el material residual, seguido por un flujo (Sowers - 1985).

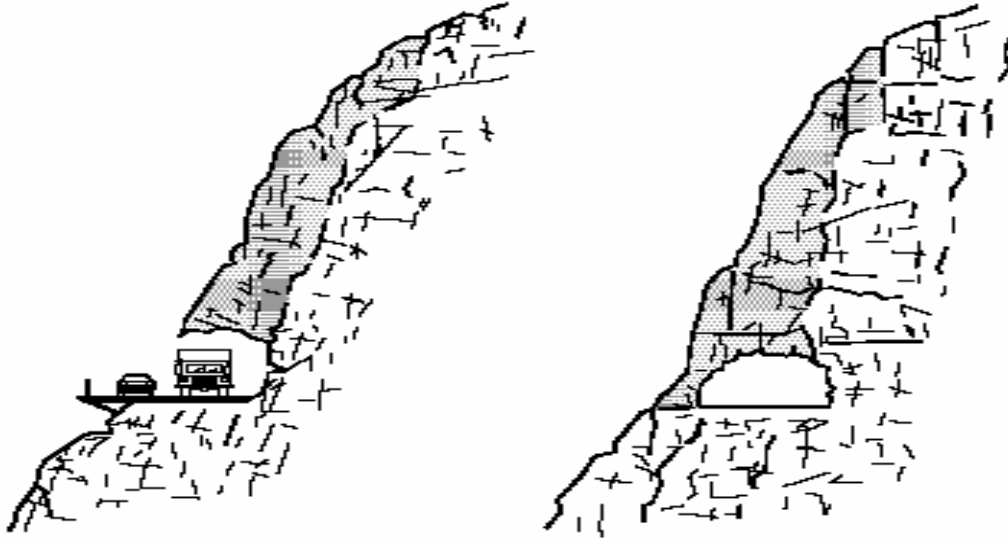


Figura 9. Inducción de esfuerzos de corte y relajación de esfuerzos de compresión al cortar para un semi túnel

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

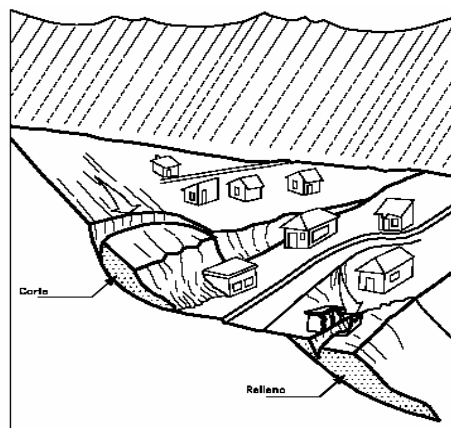


Figura 10. Deslizamientos y erosión producidos por corte y relleno en la construcción de una vía o la explanación para una urbanización

Rellenos

La colocación de rellenos directamente sobre los taludes y generalmente sin compactación o compactados inadecuadamente permiten la sobrecarga de las laderas y la saturación y colapso de los suelos sueltos, facilitando los escurrimientos de suelo, flujo de los suelos sueltos saturados, y formación de cárcavas por erosión.

Los rellenos son generalmente más porosos y menos permeables que los suelos naturales, lo cual genera acumulaciones de agua en los poros. Los rellenos son menos cementados y su estructura más susceptible a deterioro o colapso por eventos sísmicos y el contacto entre el suelo natural y el relleno constituye una línea de debilidad en la cual se concentran los flujos de agua, se generan agrietamientos por diferencia en las características de deformación y comportamiento sísmico. La mayoría de los deslizamientos en rellenos ocurre a lo largo del contacto corte-relleno.

En ocasiones se colocan rellenos sobre suelos blandos como coluviones o depósitos aluviales recientes y el suelo sobre el cual se coloca el relleno puede fallar al cortante.

1.5. Factores Hidrológicos

El agua es el factor que más comúnmente se le asocia con las fallas de los taludes en zonas tropicales, debido a que la mayoría de los deslizamientos ocurren después de lluvias fuertes o durante periodos lluviosos y el control del agua subterránea es uno de los sistemas más efectivos para la estabilización de deslizamientos. La relación agua deslizamientos ha sido estudiada por una gran cantidad de investigadores.

En el presente capítulo se describen los diferentes factores de tipo hidrológico que afectan la ocurrencia de deslizamientos de tierra.

1.5.1 Régimen de Lluvias.- La precipitación es el volumen o altura de agua lluvia que cae sobre un área en un período de tiempo, la cual tiene una influencia directa en la infiltración y en el régimen del agua subterránea, y a su vez afecta la estabilidad de taludes o laderas.

Estas lluvias son asociadas principalmente, con agrupaciones de nubes que ocurren en la zona de convergencia de vientos. Generalmente estas agrupaciones de nubes arrastradas por los vientos cubren áreas de varios miles de kilómetros cuadrados.

El estudio de la precipitación para analizar su efecto sobre los taludes puede realizarse desde varios puntos de vista.

a) Lluvias promedio y máximas anuales

Generalmente, las áreas de mayor precipitación anual presentan mayores problemas de estabilidad de laderas, acuíferos colgados con mayores caudales de flujo subterráneo y materiales más meteorizados.

b) Régimen de lluvias

Cada región posee un sistema de lluvias que se repite en forma similar cada año. Es común encontrar áreas donde ocurren dos períodos de lluvia con dos períodos secos, o una sola temporada de lluvias con un período seco. En nuestro país Bolivia el régimen de lluvia suele ser seco de mayo a octubre y de lluvias es de noviembre a febrero. El régimen de lluvias de una región determinada puede ser diferente al de un sitio específico dentro de la misma región, especialmente en zonas de alta montaña y se debe en lo posible, obtener la información precisa de las lluvias en el sitio del talud a estudiar.

c) Aguaceros Torrenciales

Es común en las zonas de montaña, la ocurrencia de aguaceros de gran magnitud en un período de tiempo de una o pocas horas. En el factor precipitación se debe tener en cuenta la intensidad de la máxima lluvia o de las lluvias más fuertes en una hora, en un día, mes o año y en algunas ocasiones la cantidad de lluvia en períodos menores a una hora.

Debe diferenciarse el caso de zonas de precipitación alta permanente, en las cuales el nivel de agua freática es alto y constante y un corte del terreno puede producir la falla casi inmediata del talud; y el caso de lluvias esporádicas o épocas de lluvias intensas.

d) Lluvias Acumuladas

La ocurrencia de lluvias, durante varios días consecutivos o con pocos días de diferencia, puede producir fenómenos de acumulación de agua subterránea, debido a que el talud no ha drenado el agua infiltrada de una lluvia cuando ocurre la siguiente y se produce un fenómeno de acumulación progresiva y ascenso del nivel freático.

e) Ciclo hidrológico en el talud

Parte de la lluvia se infiltra y parte corre por la superficie como escorrentía.

Precipitación = Evapotranspiración + Escorrentía + Flujo subterráneo + cambio de humedad en el suelo + Acumulación de agua subterránea en los acuíferos.

El flujo subterráneo y los cambios en la cantidad de agua acumulada son críticos para la estabilidad de un talud, debido a que ellos controlan el balance hidrológico que puede alterar el grado de saturación y la elevación del nivel freático.

La respuesta del régimen de aguas subterráneas a las lluvias es diferente de acuerdo al talud, la formación geológica y las características ambientales.

f) Intensidad de lluvia que produce deslizamientos

En estudios realizados en Puerto Rico, (Larsen y Simmon, 1992) se encontró que la intensidad de lluvia (I mm/h) que produce deslizamiento depende de la duración de la lluvia (D horas) de acuerdo a la expresión: $I = 91.46 D^{-0.82}$

De acuerdo con estas investigaciones, en tormentas que tienen duraciones de hasta 10 horas, los deslizamientos no ocurren hasta que la intensidad alcanza valores tan altos como hasta tres veces la intensidad reportada para producir deslizamientos.

g) Tiempo de lluvia que produce deslizamientos

El tiempo que se requiere para que una lluvia produzca un deslizamiento es mayor en una arcilla que en un material arenoso (Alonso, 1995), debido a las diferencias de infiltración. Este tiempo es inversamente proporcional a la permeabilidad para valores constantes de los demás parámetros.

h) La Humedad Superficial

La humedad de la superficie del terreno define factores tales como los porcentajes de escorrentía e infiltración y en algunas ocasiones el comportamiento de los taludes.

La humedad superficial está controlada por:

1. Características topográficas de la pendiente de los taludes.
2. Tipo de suelo.
3. Características climáticas.
4. Vegetación.

La humedad del suelo en la superficie del terreno puede determinar la posibilidad de agrietamiento de tensión en ciertos suelos arenos arcillosos y arenos limosos muy susceptibles a efectos de cambios de humedad. Este fenómeno es común en terraplenes de carreteras.

En términos generales, los factores ambientales y físicos que determinan el comportamiento de la infiltración dependen en buena parte de los 40 centímetros de suelo más superficial.

1.5.2 La Infiltración.- La infiltración se define como el movimiento del agua desde la superficie del terreno hacia el suelo o roca por los poros o intersticios y discontinuidades de la masa térrea.

El porcentaje de infiltración corresponde a la proporción de lluvia que se infiltra. La infiltración a su vez puede dividirse entre aquella parte que contribuye a aumentar el contenido de agua de la zona no saturada y aquella que recarga el sistema saturado de agua subterránea.

La lluvia sobre la superficie de la tierra puede conducir a dos condiciones diferentes de frontera:

- Superficie del talud inundada. La intensidad de la lluvia en este caso es mayor que la cantidad de agua que puede infiltrarse dentro de la tierra. Por lo tanto, solamente

parte de la lluvia se infiltra y el resto se convierte en escorrentía. En este caso, la condición de frontera es que la succión en la superficie del terreno es igual a 0 equivalente a saturación del 100%.

- **Infiltración controlada.** La intensidad de la lluvia es menor que el flujo máximo de agua que se puede infiltrar en el talud. En este caso, la infiltración es controlada por la intensidad de la lluvia:

Q_iinfiltración = Intensidad de la lluvia

La cantidad de agua que penetra o se infiltra en la tierra queda determinada por varios factores:

1. Cantidad, intensidad y tipo de precipitación.
2. Ritmo de precipitación. Cuanto más rápidamente cae la lluvia, menos agua penetra, pues se satura la superficie del terreno y no permite la infiltración rápida. Entre más lenta la lluvia, habrá más infiltración y menos escorrentía.
3. Pendiente superficial. La infiltración es mayor en terrenos más planos a los que corresponde velocidades de escurrimiento superficial menores.
4. La permeabilidad de los suelos y las rocas.
5. La estructura de suelos y rocas, especialmente en lo que se refiere a fracturación, estratigrafía y la secuencia de los estratos permeables y los impermeables. El tipo de material o suelo del talud va a determinar la infiltración relacionada con la succión y la permeabilidad.
6. Cantidad y tipo de vegetación. Para determinar la cantidad de agua infiltrada es conveniente realizar un ensayo de infiltración. En esta prueba el agua es suministrada a una superficie expuesta a una rata controlada y el volumen total de agua infiltrada en varios intervalos de tiempo, es infiltrada contra el tiempo. En este ensayo se puede obtener, además, la permeabilidad de los materiales.

1.5.3 El Flujo no Saturado.- Al infiltrarse el agua se forma inicialmente, un frente húmedo que avanza aproximadamente paralelo a la superficie del terreno, a una

velocidad que depende de la permeabilidad, del grado de saturación y de la porosidad del material. Este frente húmedo puede alcanzar una superficie crítica en pocas horas, dependiendo de la fracturación y grado de meteorización. Cuando las lluvias son muy intensas puede llegarse incluso, a la saturación completa del talud durante la lluvia. Al infiltrarse el agua de escorrentía se forma inicialmente un frente húmedo que avanza en sentido vertical, el cual satura los suelos a su paso, eliminando la succión o cohesión aparente que producía el estado de no-saturación.

El frente húmedo desciende verticalmente bajo la influencia de la fuerza de gravedad, aún después de terminada la lluvia, hasta que encuentre el nivel freático o un manto impermeable. La llegada de un frente húmedo produce un ascenso en el nivel freático.

1.5.4 El Nivel Freático

La localización del nivel freático corresponde a la línea de presión de poros igual a cero, equivalente a que la presión neta en el sitio es igual a la presión atmosférica. El nivel de agua determina los niveles de presiones hidrostáticas sobre una superficie localizada por debajo de ese nivel o los valores de presión negativa o de succión para el suelo por encima. En taludes naturales de laderas, la línea de nivel freático general sigue una línea aproximadamente paralela a la superficie del terreno y ésta sube por el recargue debido a la infiltración. El agua sub superficial puede dividirse entre zonas de presión de poros positiva y negativa. Las presiones de poro positivas son superiores y las negativas son inferiores a la presión atmosférica. La línea divisoria es el nivel freático donde la presión es igual a la presión atmosférica, la cual se designa como presión cero. Por debajo del nivel freático el suelo se encuentra saturado, lo cual equivale a que el agua llena todos los poros de los suelos y todas las cavidades de los materiales infrayacentes. El agua existente en la zona de saturación se designa por lo general, como agua freática y su superficie superior es el nivel freático. Cuando las circunstancias geológicas y topográficas son más complejas podrá haber más de una zona de saturación y, por consiguiente, más de un nivel freático en una localidad determinada.

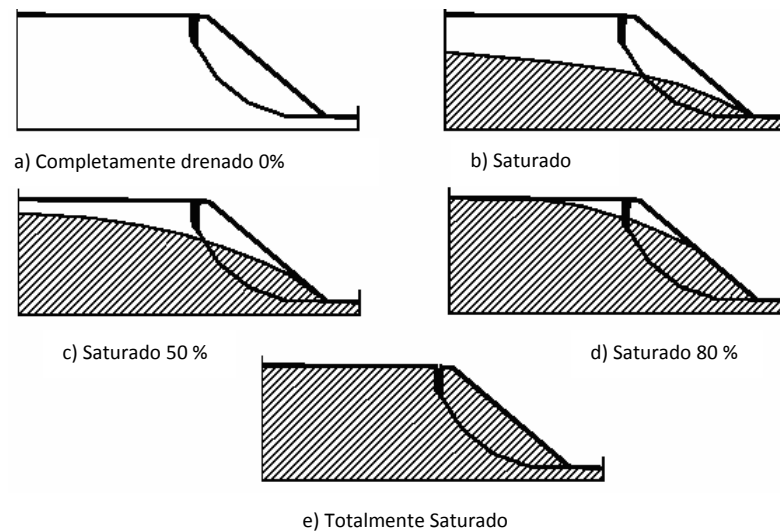


Figura 11. Saturación y Niveles freáticos

La elevación del nivel freático de una localidad determinada depende de varios factores, tales como las fluctuaciones de las precipitaciones y de los caudales y fugas de los cuerpos de agua.

El nivel de agua puede tener como base el pie del talud o puede estar suspendido por un manto impermeable dentro del talud. En el primer caso las fallas a producirse serán preferentemente de pie, mientras en el caso segundo las fallas tienden a ser a mitad del talud.

El nivel freático y en general la presencia de agua en los materiales en la proximidad de la superficie de falla, desempeñan un papel fundamental en la estabilidad y de hecho, hacen algo más complejo el mecanismo para la generación de las fallas.

La configuración del nivel freático depende de la forma del relieve superficial, el cual reproduce generalmente, sí bien con contornos menos abruptos y también depende de la permeabilidad del terreno y del abastecimiento de agua. Comúnmente, se aleja de la superficie del terreno bajo colinas y elevaciones y se acerca a ella en los valles y muy especialmente en los ríos y en los lagos.

Es usual que los periodos de sequía traigan abatimiento importante del nivel freático, en tanto que se eleva, tras periodos de fuertes lluvias. Estas fluctuaciones suelen ser

muy marcadas en terreno granulares permeables. El nivel de agua cambia con las lluvias y periodos secos en forma muy marcada en formaciones permeables y un poco menos fuerte en las impermeables y se tiene un máximo y mínimo cuya diferencia en algunos casos puede ser hasta de más de un metro.

El nivel freático puede ascender bruscamente durante un evento lluvioso intenso y bajar nuevamente después de la lluvia.

En el análisis de estabilidad es muy importante definir el nivel de agua y las consiguientes condiciones de saturación y presiones de poros. Un talud seco puede ser estable, mientras el mismo talud puede no ser estable con un determinado nivel freático o un talud estable puede fallar al ascender el nivel freático.

En un talud la altura piezométrica y los planos de localización de niveles de agua son parámetros determinantes en su estabilidad. La presencia de un nivel de agua a una determinada altura dentro del talud produce fuerzas hidrostáticas desestabilizantes y su determinación es necesaria, previamente a los análisis de estabilidad. Una vez determinados los niveles de agua y calculadas las presiones de poro se puede calcular los esfuerzos efectivos, que son los que se deben tener en cuenta en el análisis teórico de estabilidad.

1.5.5 La Presión de Poros.- La presión de poros es la presión interna del agua de saturación. La presión de poros dentro del suelo depende de la localización de los niveles freáticos, presiones internas de los acuíferos y las características geológicas del sitio.

La presión de poros varía de acuerdo a las variaciones del régimen de aguas subterráneas. Los incrementos de presión pueden ocurrir rápidamente en el momento de una lluvia, dependiendo de la intensidad de la lluvia, de la rata de infiltración del área tributaria, etc. Un incremento en la presión de poros positiva o una disminución de la presión negativa, equivale a una reducción de resistencia al cortante y de la estabilidad. El valor de las presiones de poro se mide utilizando piezómetros abiertos o neumáticos. Si no hay flujo de agua la presión es hidrostática y la medida del

piezómetro coincide con el nivel freático, pero si existe flujo las presiones no son hidrostáticas. En este último caso la presión de poros en cualquier punto dentro de la masa de suelo puede medirse por medio de las redes de flujo, las cuales comprenden las líneas de flujo y las líneas de igual presión de poros.

Debe tenerse en cuenta el efecto que las discontinuidades tienen en los niveles piezométricos, determinados por las líneas equipotenciales. Las discontinuidades generan diferencias de permeabilidad, las cuales controlan el sistema de presiones dentro del talud.

Para el análisis de presiones de poros sobre una superficie de falla se deben tener en cuenta sus condiciones de drenaje. Cuando existe drenaje, la presión de poros disminuye hacia la superficie del talud, pero cuando el drenaje es deficiente se puede presentar un aumento importante de la presión de poros en el pie del talud (Figura 12.).

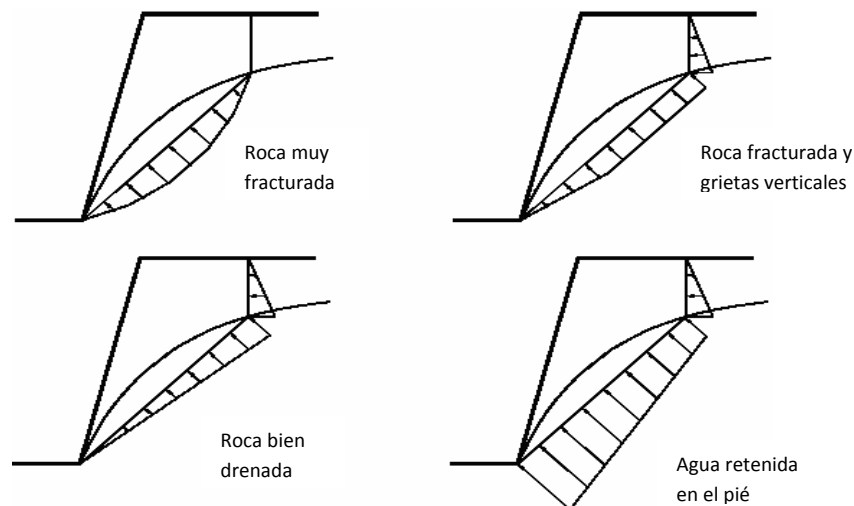


Figura 12. Presiones de poro sobre una superficie de falla potencial para diferentes condiciones de drenaje

1.5.6 El Flujo Saturado.- La infiltración unida a fenómenos de transporte interno de agua produce un régimen de aguas subterráneas. La conducción interna de agua puede ser a través de una formación permeable o a través de juntas o fallas. El flujo de agua subterránea es generalmente, muy lento y laminar, sin embargo, el flujo

turbulento puede ocurrir dentro de conductos internos de gran tamaño o porosidades muy altas como es el caso de cavernas en calizas o en gravas muy porosas. En el flujo laminar el movimiento de agua junto a las partículas o paredes de los intersticios es posiblemente quieto por la atracción molecular. El agua a cierta distancia de las paredes tiene un patrón trenzado de acuerdo a las características de los vacíos.

En primer lugar, han de considerarse los tipos de las unidades de suelos y rocas presentes, la presencia de sedimentos no consolidados, tales como gravas, arena o mezcla de éstos, pues por su permeabilidad, estas unidades son susceptibles de transportar agua a los taludes o las formaciones de rocas permeables como las areniscas o materiales fracturados que poseen alta permeabilidad secundaria.

Se pueden analizar diferentes tipos de flujo de agua: Flujo inter granular y flujo a través de las fisuras. El flujo inter granular de agua ocurre por los poros entre los granos o partículas que componen el suelo o roca. Este tipo de flujo se asemeja el concepto de

El flujo de agua tiende a ser más rápido a lo largo de fisuras, conductos o juntas especialmente en los suelos residuales. El flujo puede ser confinado o inconfinado. Los flujos poco profundos en suelos residuales tienden a ser no confinados.

1.5.7 Coeficiente de 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.

Cuadro13. Tamaño de poros y permeabilidad (Lee, 1996)

Material	Tamaño de poros	Permeabilidad (cm/seg.)
Arcilla	<10 ⁻⁴ – 10 ⁻³	<10 ⁻⁶
Limo	10 ⁻³ – 10 ⁻²	10 ⁻⁶ - 10 ⁻⁴
Arena	10 ⁻² – 10 ⁻¹	10 ⁻⁴ - 10
Grava	10 ⁻¹ +	10 - 10 ⁻²

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

1.5.8 La Erosión.- La erosión hídrica es un fenómeno ocasionado por acción de fuerzas hidráulicas, las cuales actúan sobre las partículas de suelo produciendo su desprendimiento y posterior transporte. La erosión comprende el desprendimiento, transporte y posterior depósito de materiales de suelo o roca por acción de la fuerza del agua en movimiento. El proceso puede ser analizado iniciando por el despegue de las partículas de suelo, debido al impacto de las gotas de lluvia. Adicionalmente, ocurre el proceso de flujo superficial en el cual las partículas removidas son incorporadas a la corriente y transportadas talud abajo.

Si la “velocidad” de escorrentía es superior a la velocidad máxima erosionante, se produce erosión superficial. La velocidad de escorrentía depende de la pendiente, la intensidad de la lluvia, la cantidad de agua presente y la rugosidad de la superficie del terreno.

Si el gradiente hidráulico interno es alto se puede producir transporte intenso de partículas, produciéndose pequeños conductos que al ampliarse desestabilizan el talud.

1.5.9 Factores de Sobre Carga

Las cargas que se presentan en la inestabilidad de los taludes pueden presentarse de diferentes formas como lo indicaremos a continuación.

Las sobre cargas tienden a disminuir la resistencia al esfuerzo cortante de los taludes lo cual ocasiona la inestabilidad del cuerpo del talud y así provocando el deslizamiento del mismo.

1.5.9.1.Cargas Debido al Tráfico Vehicular.- Las cargas debido al tráfico vehicular se presentan siempre en taludes como indica la figura 3.16. Esto depende de las características de la carretera ya que existe diferencias entre una de tipo fundamental por donde circulan vehículos de alto tonelaje y una secundaria para ello se debe diseñar la estructura de la carretera de tal manera que esta no sea rebasada. Pero en muchos casos esta falla debido a las grandes cargas que se presentan dando lugar a que el talud también falle y se produzca el deslizamiento del mismo.

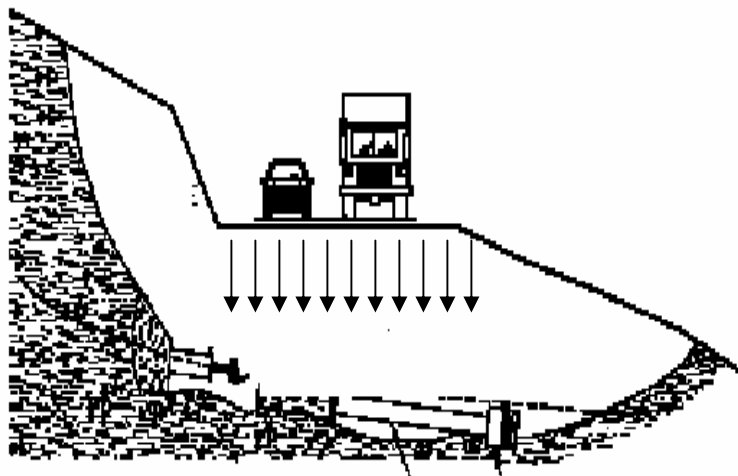


Figura 14. Carga vehicular en los taludes

Por esta razón es importante tomar en cuenta estas cargas tanto en taludes de corte en donde uno no elige el material del cuerpo del talud pero sí en taludes de relleno en donde si se puede elegir el material más óptimo para un mejor talud.

1.5.9.2.Cargas Hidráulicas.- Este tipo de cargas se lo desglosa más adelante de una manera más detallada pero cabe notar que dichas cargas hidráulicas nos referimos a las

presiones hidrostáticas que ocasiona el agua en el cuerpo del talud presentándose como presión de poros. Esta presión depende de las características mecánicas del suelo del talud y el ciclo hidrológico de la cuenca que forma parte el talud.

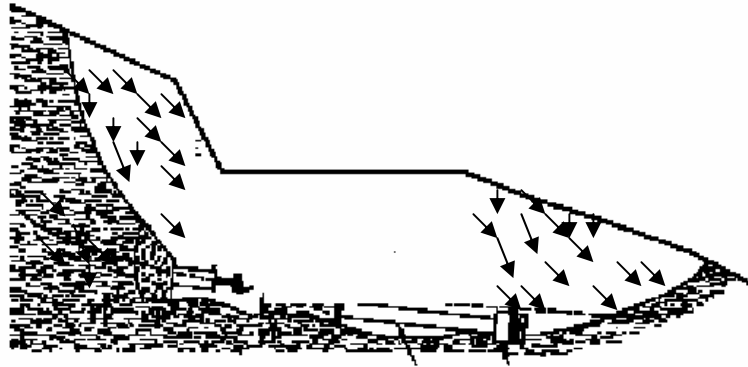


Figura 15. Carga hidráulica en los taludes

1.5.9.3. Factores de Impacto y Vibraciones.- Las vibraciones producidas por movimientos sísmicos, explosiones de gran magnitud vibraciones de máquinas, también afectan el equilibrio de los taludes, provocan cambio de esfuerzos temporales debido a oscilaciones de diferente frecuencia. Las ligaduras ínter granulares y así disminuir la cohesión. **Sacudidas sísmicas, voladuras y vibraciones.** Los movimientos de tierra producidos por cualquiera de las causas anteriores, originan un cambio temporal del estado de esfuerzos existente en una masa de terreno que puede afectar a la estabilidad de la misma. En el caso de arenas finas saturadas es frecuente que se produzca el fenómeno de la licuefacción. Hay que recalcar la gran importancia que tiene el agua en la estabilidad de un talud. Es quizá el principal agente desencadenante de gran número de movimientos de inestabilidad, debido a la disminución de resistencia a que da lugar y al aumento de presiones intersticiales. La asociación entre movimientos y períodos lluviosos es ampliamente conocida en el mundo entero.

1.5.9.4. Teoría del Rebote Elástico.- En la corteza de la Tierra se acumula energía, gracias a procesos de deformación elástica, que ilustra el proceso de liberación de esa energía, muestra como se produce la ruptura de una capa de rocas, después de superar el

límite elástico. Allí resulta un conjunto de bloques desplazados a lo largo de las líneas de ruptura.

La corteza terrestre está prácticamente, siempre y en todas partes, sometida a algún tipo de tensión. Las mayores **concentraciones de tensiones** se producen a lo largo de los límites entre las placas corticales, e incluso en su interior donde pueden producirse acumulaciones de tensiones que superen la competencia elástica de las rocas. La ruptura de las rocas debajo de los volcanes se produce debida a los movimientos de ascenso de magma y a la liberación explosiva de gases volcánicos. Siendo esto así, en todo momento existen en el mundo diversos sectores, grandes o pequeños, en que los esfuerzos elásticos acumulados en la corteza terrestre hacen que las rocas que allí se encuentran estén muy próximas a su punto de rotura probable

En estas circunstancias, **basta un pequeño esfuerzo** adicional para desencadenar un terremoto, comprendiéndose, por tanto, que los cambios causados por la tensión consecuente de un gran terremoto pueden provocar una reacción en cadena que se traducirá en una serie de sacudidas grandes o pequeñas. También es factible que las pequeñas alteraciones en el campo de esfuerzos de la corteza, generadas por el paso de depresiones ciclónicas profundas o por los ciclos de mareas terrestres, puedan desencadenar auténticas sacudidas.

1.6. Taludes; conceptos principales

1.6.1. Definición de Talud.- Es toda aquella superficie inclinada con respecto a la horizontal que haya de adoptar permanentemente las masas de suelo de rocas, bien sea en forma natural o como consecuencia de la intervención humana.

La investigación de una ladera, talud o deslizamiento consiste en obtener toda la información posible sobre las características topográficas, geológicas, geotécnicas y ambientales que permitan realizar un diagnóstico de los problemas, lo más preciso posible y un diseño efectivo de solución.

Para el propósito de la investigación es necesario conocer cuáles son los parámetros básicos que afectan la estabilidad.

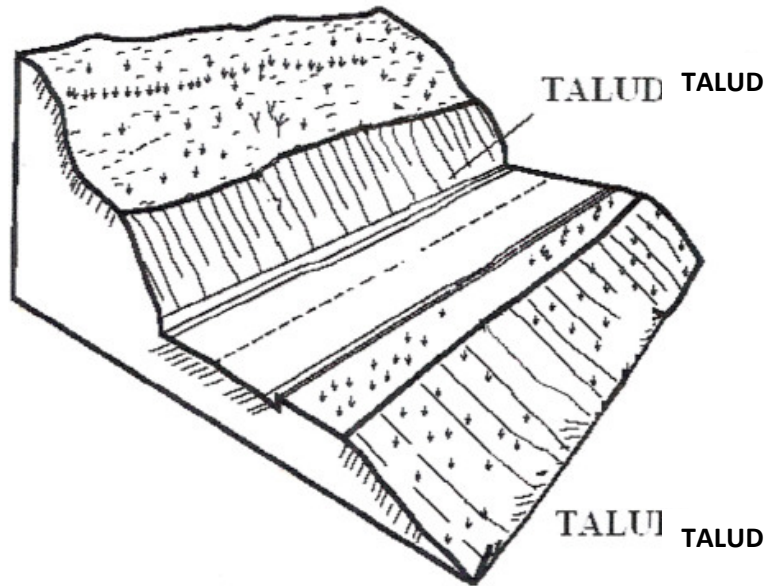


Figura 16. Talud en corte de una carretera

1.6.2. Nomenclatura de un Talud.- Un talud o ladera es una masa de tierra que no es plana sino que posee pendiente o cambios de altura significativos. En la literatura técnica se define como ladera cuando su conformación actual tuvo como origen un proceso natural y talud cuando se conformó artificialmente (Figura 2.2). Las laderas que han permanecido estables por muchos años pueden fallar en forma imprevista debido a cambios topográficos, sismicidad, flujos de agua subterránea, cambios en la resistencia del suelo, meteorización o factores de tipo antrópico o natural que modifiquen su estado natural de estabilidad. Los taludes se pueden agrupar en tres categorías generales: Los terraplenes, los cortes de laderas naturales y los muros de contención. Además, se pueden presentar combinaciones de los diversos tipos de taludes y laderas.

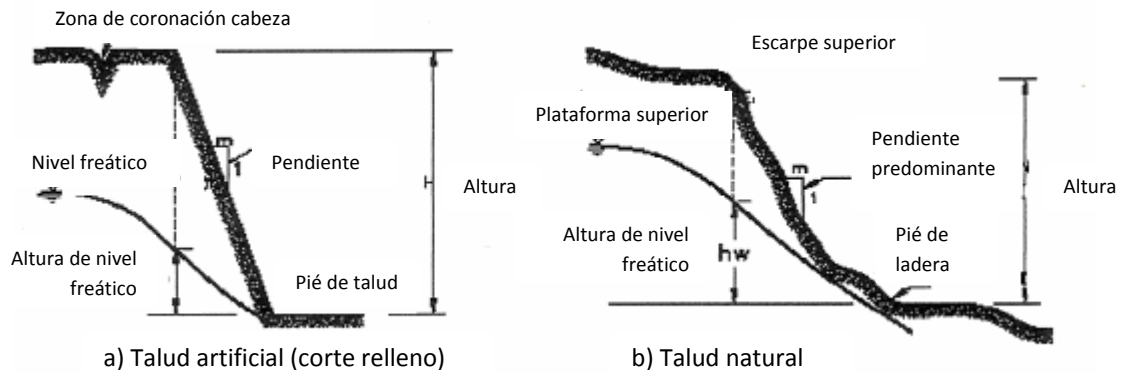


Figura 17. Nomenclatura de taludes y laderas

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

- **Altura.-** Es la distancia vertical entre el pie y la cabeza, la cual se presenta claramente definida en taludes artificiales pero es complicada de cuantificar en las laderas debido a que el pie y la cabeza no son accidentes topográficos bien marcados.
- **Pie.-**Corresponde al sitio de cambio brusco de pendiente en la parte inferior.
- **Cabeza o escarpe.-** Se refiere al sitio de cambio brusco de pendiente en la parte superior.
- **Altura de nivel freático.-** Distancia vertical desde el pie del talud o ladera hasta el nivel de agua medida debajo de la cabeza.
- **Pendiente.-**Es la medida de la inclinación del talud o ladera. Puede medirse en grados, en porcentaje o en relación mil, en la cual m es la distancia horizontal que corresponde a una unidad de distancia vertical. Ejemplo: Pendiente: 450, 100%, o IR: **IV**. Existen además, otros factores topográficos que se requiere definir como son longitud, convexidad (vertical), curvatura (horizontal) y área de cuenca de drenaje, los cuales pueden tener influencia sobre el comportamiento geotécnico del talud.

- **Base firme.**- La base firme es el estrato con mayor resistencia que el suelo del cuerpo del talud y que no es penetrado por la superficie del deslizamiento.

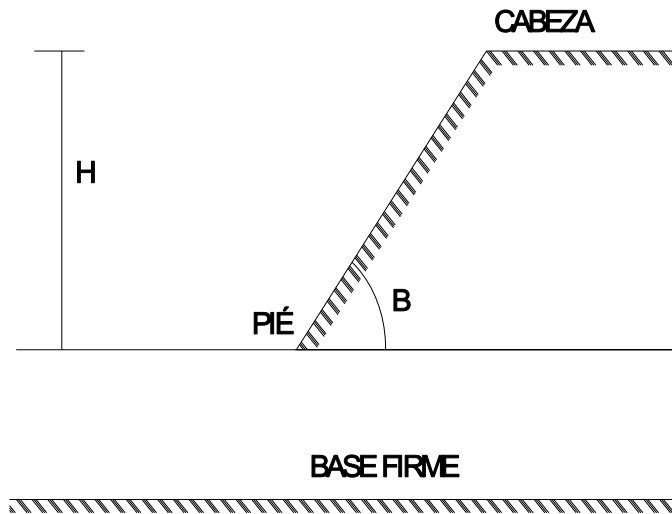


Figura 18. Esquema de partes de un talud

La inclinación (B) de un talud depende de:

- Altura del talud.
- Condiciones topográficas.
- Estructuras geológicas.
- Tipo de suelo o roca.
- Resistencia al esfuerzo cortante del suelo.

1.6.3. Tipos de los Taludes.- Los taludes se dividen en:

a) Taludes naturales o laderas, son los conformados por las laderas que se han formado sin ninguna participación del hombre. Las laderas que han permanecido estables por muchos años pueden fallar en forma imprevista, debido a cambios topográficos, sismicidad, flujos de agua subterránea, cambios en la resistencia del

suelo, meteorización o factores de tipo antrópico o natural que modifiquen su estado natural de estabilidad.

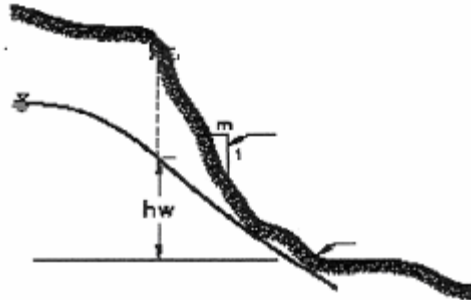


Figura 19. Talud natural

b) Taludes artificiales, son estructuras diseñadas y construidas por el hombre y lo conforman los cortes y los terraplenes.

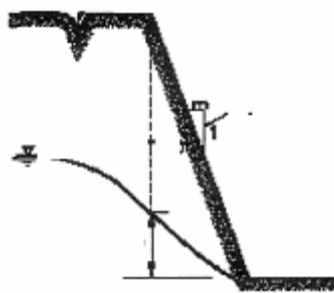


Figura 20. Talud artificial

Taludes y su Estabilización

El talud como parte de la carretera van de la mano en el diseño de carreteras para nuestras condiciones topográficas, ya que es inevitable que no existan talud en nuestras carreteras siempre tendremos que encontrarnos con la presencia de éstos.

El presente proyecto de tesis de grado intenta presentar un estado del arte en el análisis de los fenómenos que ocasionan los deslizamientos.

Cuando el ingeniero va a construir vías terrestres se ve enfrentado a problemas de inestabilidad tanto en corte como en terraplenes. Ambos casos son esencialmente diferentes.

No es muy frecuente la falla de terraplenes, esto debido, posiblemente a que estas estructuras se construyen con materiales seleccionados en principio, la construcción se realiza bajo una norma las cuales han tenido un avance significativo en los últimos años y por lo tanto estas estructuras se consideran homogéneas y presentan un comportamiento predecible.

En cambio en los cortes el ingeniero está atenido al uso riguroso de los materiales existentes "In Situ" con toda le heterogeneidad que la naturaleza lo haya dispuesto, por lo tanto la influencia del constructor es limitada.

De tal manera que la influencia del ingeniero debe ser diferente de un caso a otro.

En general la construcción de los terraplenes es una tarea rutinaria y no ofrece dificultad, sin embargo existen algunos casos que hacen muy crítica su construcción tales como:

- a) Terraplenes en suelo blando.
- b) Terraplenes en cañadas de terreno montañoso.
- c) Terraplenes en laderas inclinadas.
- d) Accesos a puentes y pasos a desnivel
- e) Terraplenes sobre suelos licuables.
- f) Terraplenes con riego de tubificación.

Los cortes en cambio por su heterogeneidad, presentan frecuentes problemas de estabilidad que con ciertos cuidados pueden ser superados, sin embargo algunos casos que exigen tratamientos especiales en su construcción, tales como:

1. Cortes de gran altura.
2. Cortes de laderas inestables.

3. Cortes sujetos a flujos de agua.
4. Cortes en suelos erosionables.

El análisis de la estabilidad de un talud es un problema de predicción de la estabilidad, con el objeto de tomar medidas preventivas y/o correctivas.

Para hacer el análisis de estabilidad de un talud es necesario tener en cuenta los siguientes puntos:

1. Reconocer y clasificar el tipo de falla, definir sus características más sobresalientes Ej: Causas del movimiento, velocidad del movimiento.
2. Identificar y clasificar los materiales involucrados en el movimiento, definir sus propiedades físicas y mecánicas.
3. Seleccionar el método para el cálculo de la estabilidad del talud.
4. Correlacionar las observaciones del campo con los resultados del cálculo.

1.7. FACTOR DE SEGURIDAD

La tarea del ingeniero encargado de analizar la estabilidad de un talud es determinar el factor de seguridad. En general el factor de seguridad se define como.

$$FS_s = \frac{\tau_f}{\tau_d}$$

Donde:

FS_s = Factor de seguridad con respecto a la resistencia.

τ_f = Resistencia cortante promedio del suelo.

τ_d = Esfuerzo cortante Promedio desarrollado a lo largo de la superficie potencial de falla.

La resistencia cortante del suelo consta de dos componentes, la cohesión y la fricción, y se expresa como.

$$\tau_f = c + \sigma' \tan \phi$$

Donde:

c = Cohesión

ϕ = Ángulo de fricción drenada.

σ' = Esfuerzo normal efectivo sobre la superficie potencial de falla.

De manera similar, también se puede escribir.

$$\tau_d = c_d + \sigma' \tan \phi_d$$

El sub índice $-d-$ indica que se trata de parámetros que se desarrollan a lo largo de la superficie potencial de falla. Sustituyendo estas ecuaciones en la primera, tenemos.

$$FS_s = \frac{c + \sigma' \tan \phi}{c_d + \sigma' \tan \phi_d}$$

Podemos introducir otros aspectos del factor de seguridad, es decir, el factor de seguridad con respecto a la cohesión FS_c y el factor de seguridad con respecto a la fricción FS_ϕ

$$FS_c = \frac{c}{c_d}$$

y

$$FS_\phi = \frac{\tan \phi}{\tan \phi_d}$$

Por lo tanto si:

$$\frac{c}{c_d} = \frac{\tan \phi}{\tan \phi_d}$$

Y entonces se puede escribir.

$$FS_s = FS_c = FS_\phi$$

1.7.1. Estabilidad de taludes infinitos sin infiltración

Al considerar el problema de la estabilidad de un talud, comenzamos con el caso de un talud infinito, que es aquel en el que H es mucho mayor que la altura de talud, por lo tanto recordando la ecuación cortante del suelo.

$$\tau_f = c + \sigma' \tan \phi$$

La deducción de las ecuaciones es básica por lo que se remitirá a la expresión final del factor de seguridad.

Para ello muy importante orientarse en el gráfico, que es donde se encuentran todos los parámetros de cálculo.

Por lo tanto tenemos.

$$FS_s = \frac{c}{\gamma H \cos^2 \beta \tan \beta} + \tan \phi$$

Cuando el factor de seguridad es igual a 1, se produce lo que se llama la altura crítica de talud.

$$H_{cr} = \frac{c}{\gamma \cos^2 \beta (\tan \beta - \tan \phi)}$$

1.7.2. Estabilidad de taludes infinitos con infiltración

Se supone que hay infiltración en el suelo y que el nivel freático coincide con la superficie del terreno. La resistencia cortante del suelo se da por.

$$\tau_f = c + \sigma' \tan \phi$$

De la cual se hacen las respectivas deducciones para llegar a la expresión final.

$$FS_s = \frac{c}{\gamma_{sat} H \cos^2 \beta \tan \beta} + \frac{\gamma' \tan \phi}{\gamma_{sat} \tan \beta}$$

1.8. Factores que influyen en la inestabilidad de Taludes

La gravedad puede mover los materiales térreos sólo cuando es capaz de vencer la resistencia del material que le impide moverse. Es claro, entonces, que cualquier factor que reduzca esta resistencia hasta el punto donde la gravedad pueda intervenir,

contribuye al movimiento de masa. Dependiendo en cómo actúan, los factores se clasifican en dos grupos: Condicionantes y Desencadenantes. Los primeros, también conocidos como pasivos o intrínsecos, son aquellos que dependen de la naturaleza, estructura y forma del terreno, mientras que los segundos, también llamados activos o externos, son factores que actúan desde fuera del medio que se estudia, provocando o desencadenando un deslizamiento.

1.8.1. Patología de taludes: tipos de falla

Tipos de Deslizamientos

Un deslizamiento o falla de un talud o ladera natural, es algunas veces una deformación plástica lenta, pero en otras ocasiones es catastrófica con poca o ninguna advertencia.

Como es general en la naturaleza el lugar de falla toma siempre la trayectoria de menor resistencia así los planos de falla tienden a seguir las zonas de debilidad a través de la masa.

Teniendo en cuenta la amplia gama de factores que incluyen en un deslizamiento o movimiento de masa, es poco probable que exista una rigurosa clasificación pero puede citarse la clasificación de Skempton y Hutchinson de amplia aceptación.

a) Deslizamiento tipo básico.

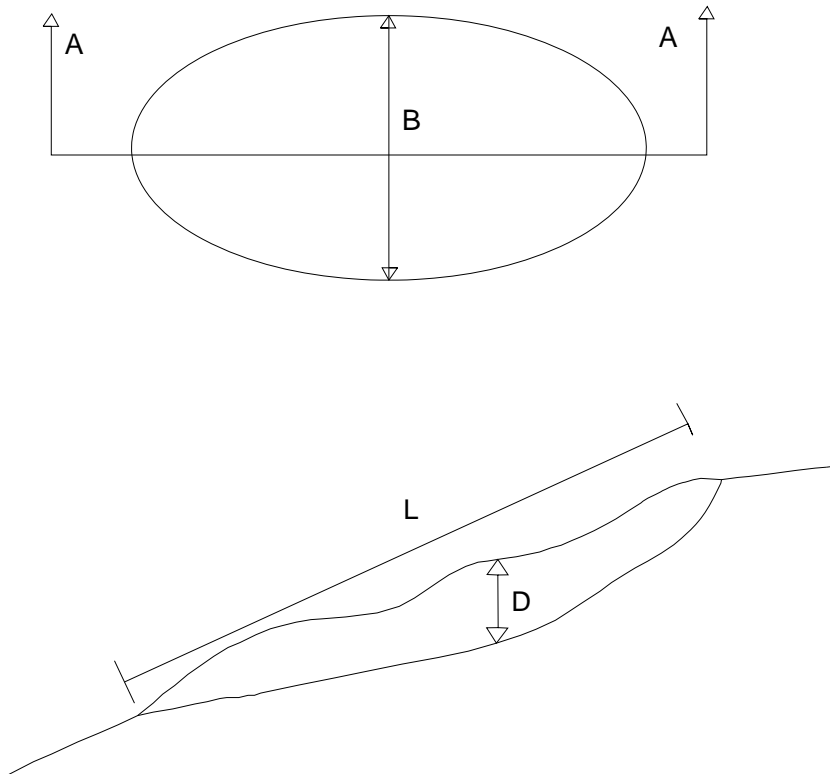
b) Deslizamientos múltiples.

c) Deslizamiento superficial.

Los deslizamientos del tipo básico son los más sencillos, generalmente poseen una cierta unidad y son los más fácilmente identificables.

Las características de los restantes deslizamientos, son en general, combinaciones múltiplex del tipo básico. Al clasificar los diversos tipos de deslizamientos, se ha dado mayor importancia a forma de la masa en movimiento en el momento de falla. Una propiedad útil es la relación D/L (figura 21.) la cual relaciona la profundidad

máxima del deslizamiento con su extensión máxima inicial. Deslizamientos con relación D/L similares pueden, sin embargo, comportarse muy distintamente durante y después de la falla. Por lo tanto, tanto en sección ladera abajo como en planta. Las relaciones de deslizamiento son, como se demostrará más adelante, extremadamente variables y no forman una base útil para la subdivisión primaria. Fig.2.19



L = Longitud máxima de deslizamiento.

D = Profundidad máxima de deslizamiento.

B = Ancho máxima del deslizamiento.

Figura 21. Proporciones de un deslizamiento

1.8.2. Caídas

a) Caídas simples. - Los derrumbes de arcilla en bloque, característicamente fallan a corte plazo en los taludes inclinados, por ejemplo, las excavaciones artificiales o taludes de ríos erosionados.

Tales derrumbes son en 10 general, bastantes insignificantes y se describen muy poco en la literatura (figura 22.).

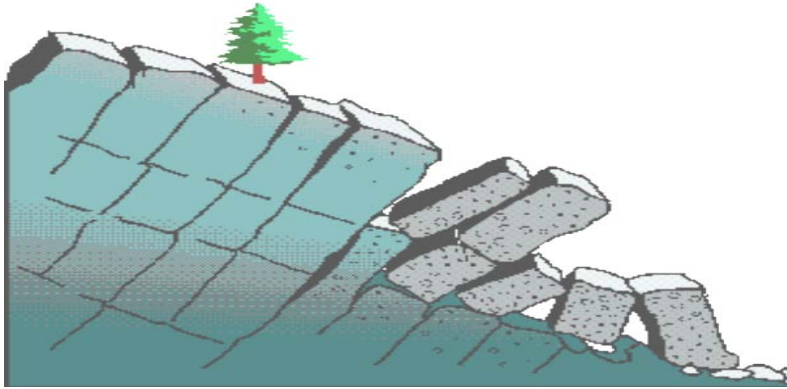


Figura 22. Caída de material

La mayoría de los taludes lo suficientemente inclinados como para estar sujetos a un deslizamiento, se encuentran entre las arcillas más resistentes y sobre consolidadas. Ya que éstas rara vez están inclinadas, los agrietamientos por tensión se desarrollan por las juntas o fisuras preexistentes. La posición de éstas en relación a cresta del talud, pueden influir en forma eventual de la falla. Las arcillas más consistentes, generalmente al fallar caen hacia atrás; una arcilla menos consistente en un talud casi vertical, puede caer hacia delante. La presencia de agua en tales agrietamientos provoca una reducción muy marcada en la estabilidad, en los caídos una masa de cualquier tamaño se desprende de un talud de pendiente fuerte, a lo largo de una superficie, en la cual ocurre ningún o muy poco desplazamiento de corte y desciende principalmente, a través del aire por caída libre, a saltos o rodando. (Figuras 23 a 24).

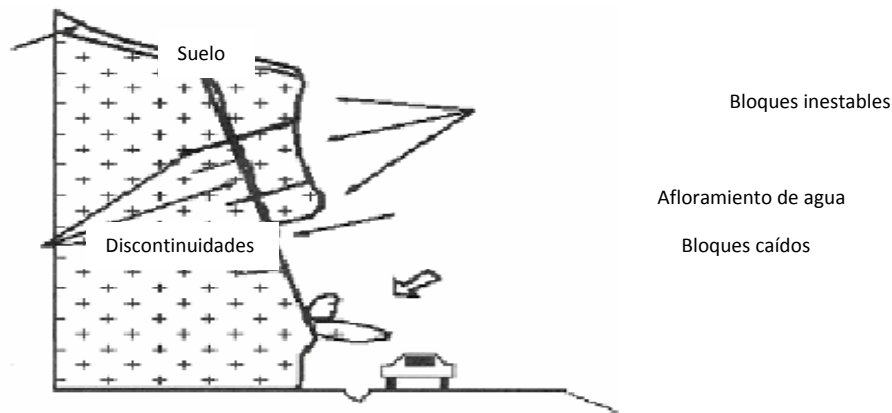


Figura 23. Caídos de bloques por gravedad en roca fracturada

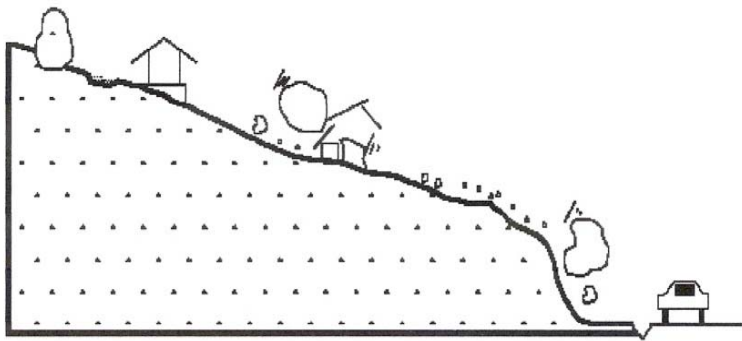


Figura 24. Caídos de bloques rodando

El movimiento es muy rápido a extremadamente rápido y puede o no, ser precedido de movimientos menores que conduzcan a la separación progresiva o inclinación del bloque o masa de material.

La observación muestra que los movimientos tienden a comportarse como caídos de caída libre cuando la pendiente superficial es de más de 75 grados. En taludes de ángulo menor generalmente, los materiales rebotan y en los taludes de menos de 45 grados los materiales tienden a rodar.

Los "caídos de roca" corresponden a bloques de roca relativamente sana, *los* caídos de residuos o detritos están compuestos por fragmentos de materiales pétreos y los caídos de tierra corresponden a materiales compuestos de partículas pequeñas de suelo o masas blandas (Figura 25).

Roca resistente a la
presión (granito o caliza)

Junta llena de
agua

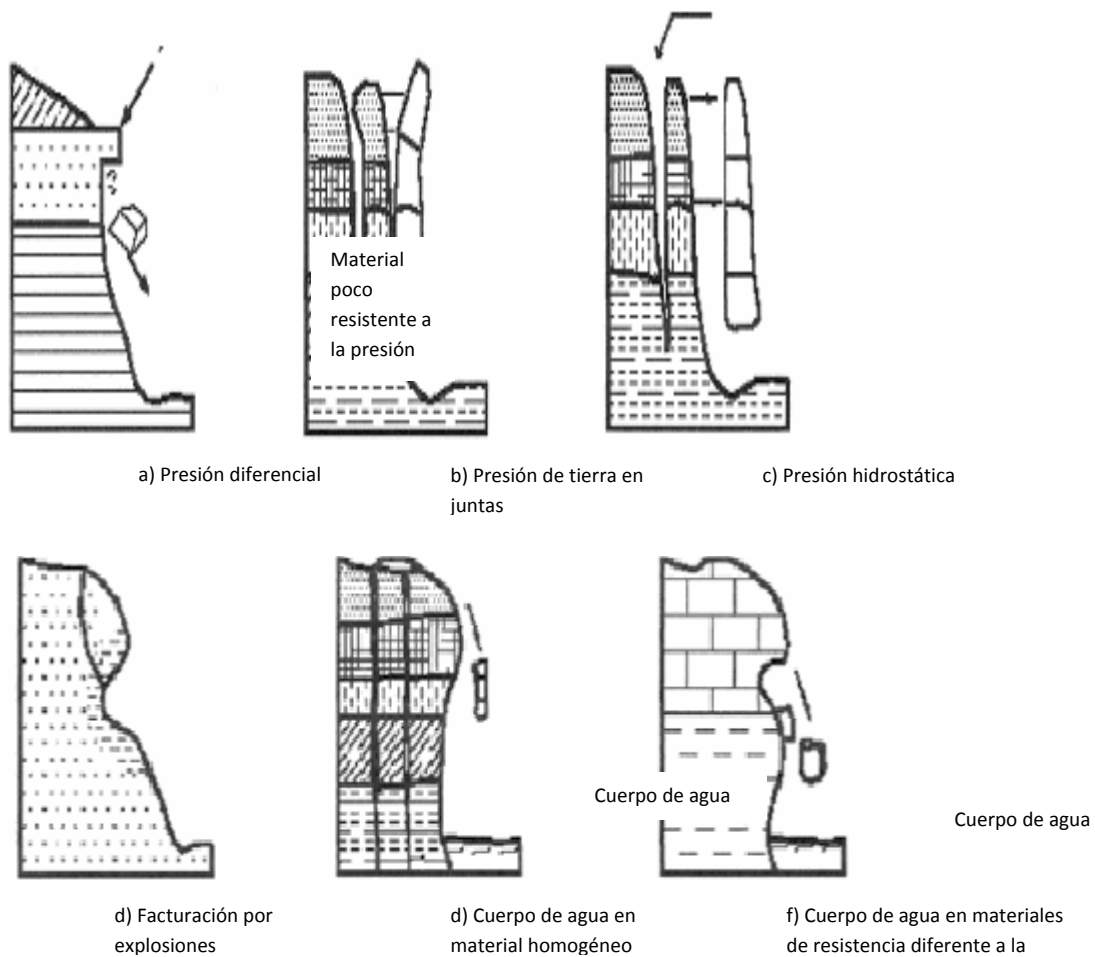


Figura 25. Algunos mecanismos de falla de caídos

a) Wyllie y Norrish (1996) indican como causas de los caídos de roca en California la lluvia, la roca fracturada, el viento, la escorrentía, las fracturas planares adversas, el movimiento de los animales, la erosión diferencial, las raíces de los árboles, los nacimientos de agua, las vibraciones de maquinaria y vehículos y la descomposición del suelo.

Deben incluirse adicionalmente, los terremotos, los cortes de las vías, explotación de materiales y las actividades antrópicas.

b) Inclinación o volteo.-Este tipo de movimiento consiste en una rotación hacia adelante de una unidad o unidades de material térreo con centro de giro por debajo

del centro de gravedad de la unidad y generalmente, ocurren en las formaciones rocosas (Figura 26.).

Las fuerzas que lo producen son generadas por las unidades adyacentes, el agua en las grietas o juntas, expansiones y los movimientos sísmicos.

La inclinación puede abarcar zonas muy pequeñas o incluir volúmenes de varios millones de metros cúbicos.

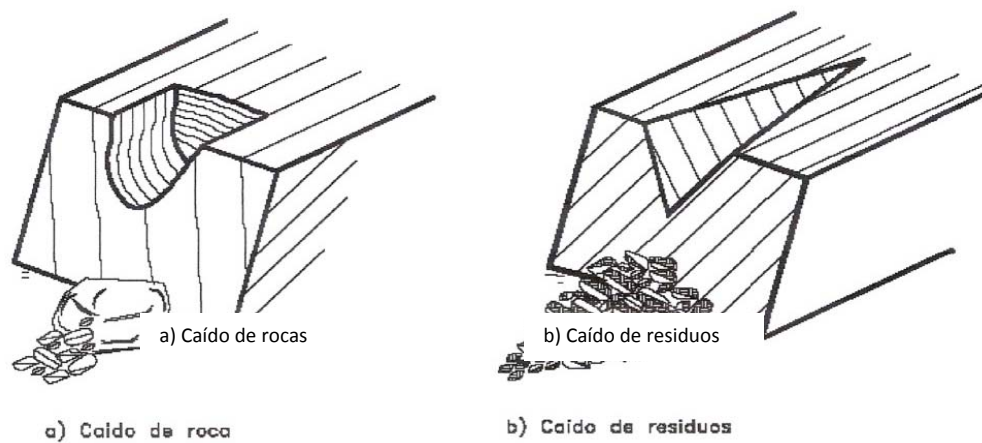


Figura 26. Esquema de caídos de roca y residuos

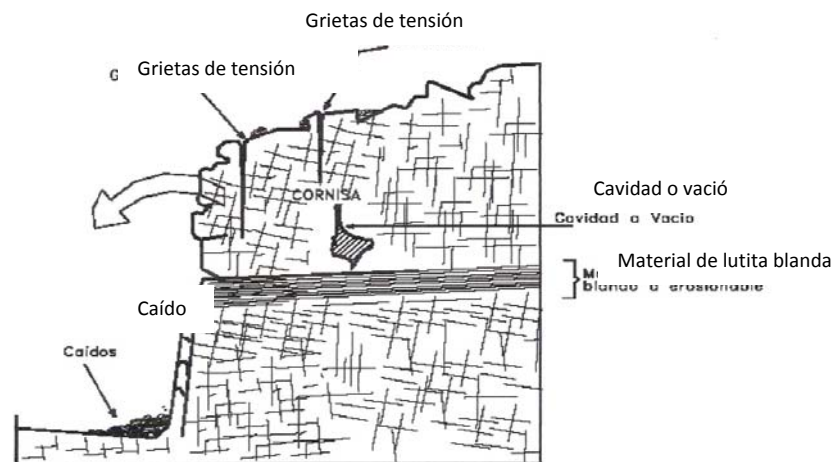


Figura 27. Volteo o inclinación en materiales residuales

Dependiendo de las características geométricas y de estructura geológica, la inclinación puede o no terminar en caídos o en derrumbes (Figuras 26. y 27.).

Las inclinaciones pueden variar de extremadamente lentas a extremadamente rápidas. Las características de la estructura de la formación geológica determinan la forma de ocurrencia de la inclinación.

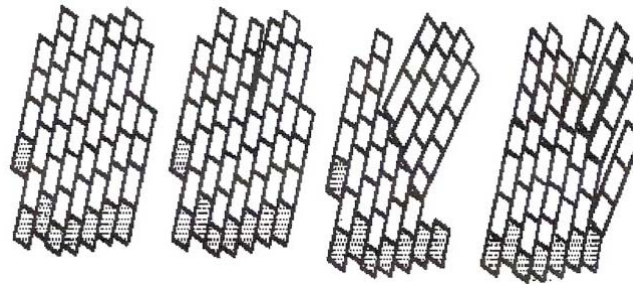


Figura 28. Proceso de falla al volteo

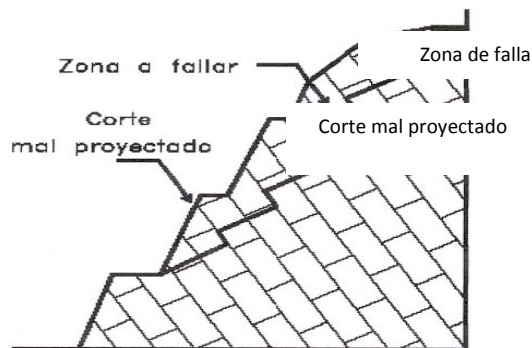


Figura 29. El volteo puede generar un desmoronamiento del talud o falla en escalera

1.8.3. Deslizamiento Rotacional

En un deslizamiento rotacional la superficie de falla es formada por una curva cuyo centro de giro se encuentra por encima del centro de gravedad del cuerpo del movimiento (Figura 30.) , con la cual le imparte una inclinación hacia atrás a la masa deslizante, y por lo tanto, se hunde en la parte superior y gira en la base (figura 30.).

Tales deslizamientos son relativamente profundos y la relación D/L varía entre 0,15 Y 0,3. En taludes más empinados esta relación tiende a ser mayor.

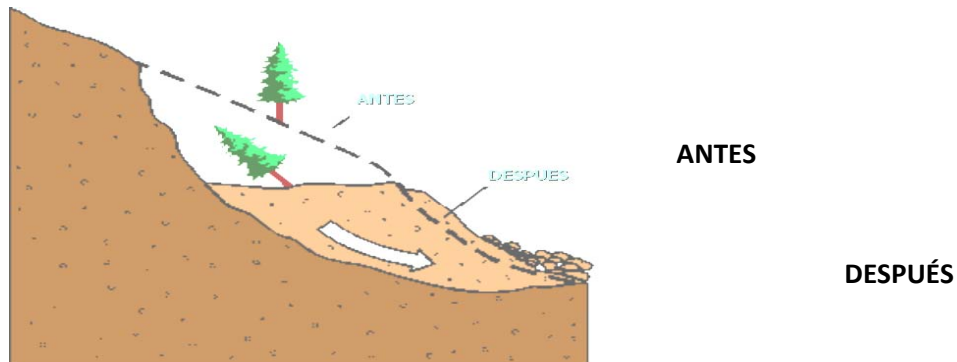


Figura 30. Deslizamiento rotacional

Visto en planta el deslizamiento posee una serie de agrietamientos concéntricos y cóncavos en la dirección del movimiento. El movimiento produce un área superior de hundimiento y otra inferior de deslizamiento generándose comúnmente, flujos de materiales por debajo del pie del deslizamiento.

En muchos deslizamientos rotacionales se forma una superficie cóncava en forma de "cuchara".

Generalmente, el escarpe debajo de la corona tiende a ser semivertical, lo cual facilita la ocurrencia de movimientos retrogresivos.

El movimiento aunque es curvilíneo no es necesariamente circular, lo cual es común en materiales residuales donde la resistencia al corte de los materiales aumenta con la profundidad.

En la cabeza del movimiento, el desplazamiento es aparentemente semi-vertical y tiene muy poca rotación, sin embargo se puede observar que generalmente, la superficie original del terreno gira en dirección de la corona del talud, aunque otros bloques giren en la dirección opuesta.

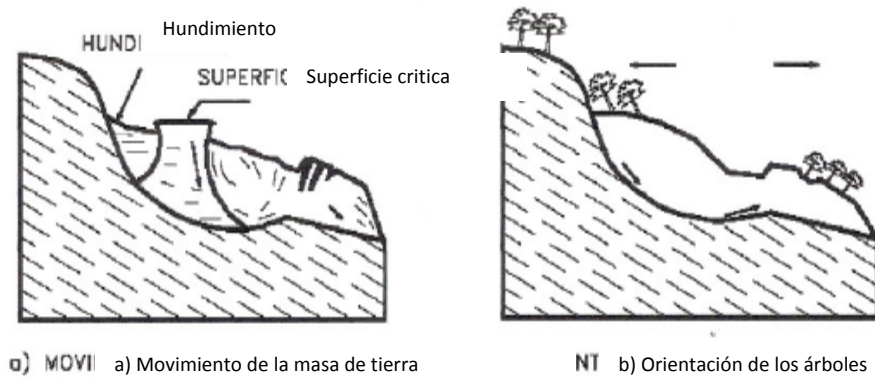
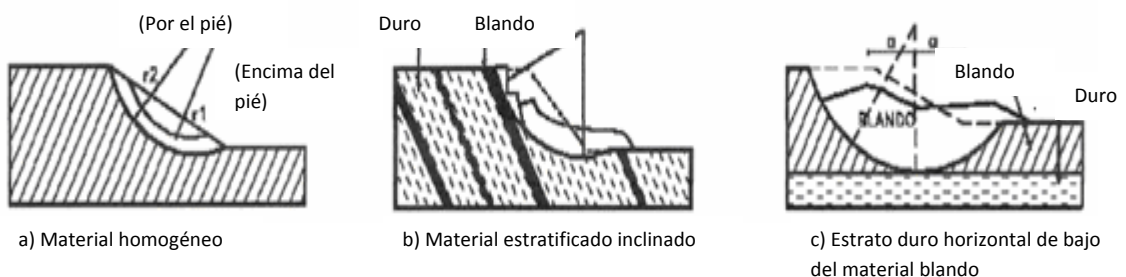


Figura 31. Deslizamiento rotacional típico

Frecuentemente la forma y localización de la superficie de falla está influenciada por las discontinuidades, juntas y planos de estratificación. El efecto de estas discontinuidades debe tenerse muy en cuenta en el momento que se haga el análisis de estabilidad (Figura 31.). Los deslizamientos estrictamente rotacionales ocurren usualmente, en suelos homogéneos, sean naturales o artificiales y por su facilidad de análisis son el tipo de deslizamiento más estudiado en la literatura.

En zonas tropicales este tipo de suelos no es común y cuando existe rotación, la superficie de falla es usualmente curva pero no circular; Sin embargo, en zonas de meteorización muy profunda y en rellenos de altura significativa algunas superficies de falla pueden asimilarse a círculos. Dentro del deslizamiento comúnmente, ocurren otros desplazamientos curvos que forman escarpes secundarios y ocasionalmente ocurren varios deslizamientos sucesivos en su origen pero que conforman una zona de deslizamientos rotacionales independientes.



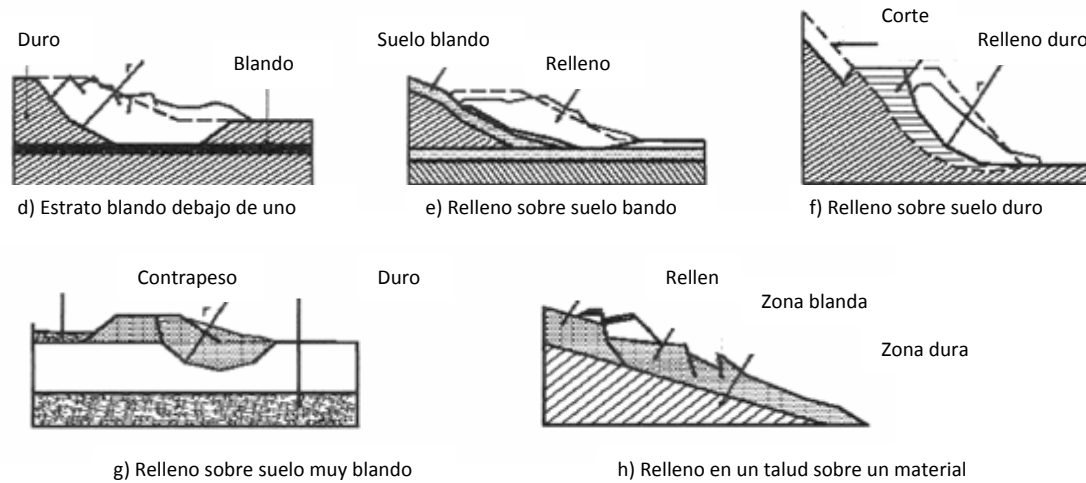


Figura 32. Efectos de la estructura en la formación de deslizamientos a rotación

Los deslizamientos rotacionales pueden ser:

- a) Circulares
- b) No circulares
- c) Poco profundos

a) Los deslizamientos rotacionales de forma circular se presentan típicamente en taludes de arcilla muy uniforme, ligeramente sobre consolidada y son mucho más frecuentes en arcillas normalmente consolidadas.

Estos deslizamientos se forman sin distorsión del cuerpo que gira, excepto en la base, en donde se presenta superposición y volteo.

Terzaghi y Peck (1948) sugieren que los deslizamientos pueden ser también aproximadamente circulares, siempre y cuando la presión de los poros en las capas de sedimentos no sea la causa del deslizamiento.

b) Los deslizamientos de forma no circulares, parece estar generalmente asociado con taludes de arcilla sobre consolidadas en la que un grado de no homogeneidad ha sido producido por el interperizado también influye en la forma de estos deslizamientos, ya que los movimientos en la superficie de falla no circular necesariamente son

acompañados por distorsiones de la masa deslizante, éstas son siempre resquebrajadas en algún grado y pueden desarrollarse graves.

c) Los deslizamientos rotacionales poco profundos, tanto de la forma circular como la de no circular, son comunes en taludes de inclinación moderada en arcillas interperizadas.



Foto 1. Ejemplo de deslizamiento rotacional circular

1.8.4. Deslizamientos Compuestos

La superficie de falla compuesta abarca movimientos en el que se combina la rotación y la traslación, dando lugar a las zonas planas y tramos curvos, asimilables a arcos circulares. En general, estas superficies están predeterminadas por la presencia de heterogeneidades dentro del talud. El predominio de las partes circulares y planas es el que sirve para clasificar la falla como rotacional o rotacional, quedando la categoría de compuesta para los casos en que ambas curvas se reparten más o menos por igual. En general, cuando menor sea la profundidad a que la heterogeneidad es aparezca (fallas, juntas, un estrato débil, etc.) mayor será la componente trasnacional en la falla. La figura 2.28 muestra un croquis de una falla típica de esta naturaleza.

Las fallas compuestas suelen producir distorsión de los materiales y cortes al inclinarse los movimientos del deslizamientos.

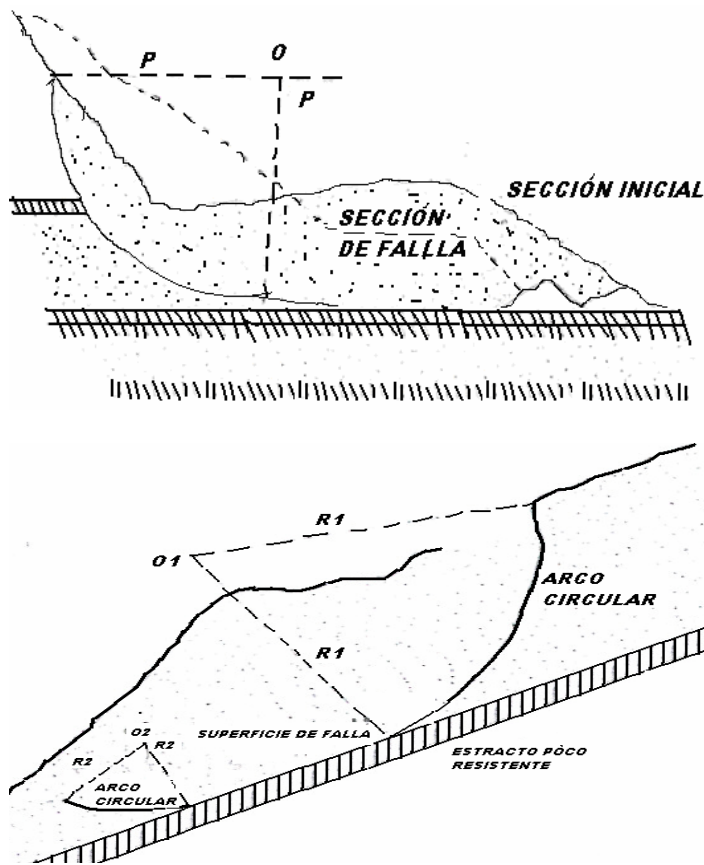


Figura 33. Deslizamiento compuesto

1.8.5. Deslizamientos Transnacionales

Estas fallas por lo general consisten en movimientos transnacionales importantes del cuerpo del talud sobre superficie de falla básicamente planas, asociado a la presencia de estratos poco resistentes localizados a poca profundidad bajo el talud.

La superficie de deslizamiento se desarrolla en forma al estrato débil y remata en sus extremos por dos cantiles, por lo general formando agrietamientos.

Los estratos débiles que forman estas fallas son por lo común de arcillas blandas o de arenas finas o limas no plásticos sueltos. Con mucha frecuencia, la debilidad del terreno está ligada a elevadas presiones de poros en el agua contenida en las arcillas o a fenómenos de elevación de presión de agua en estratos de arena (acuíferos). En este sentido, las fallas pueden estar ligadas también al calendario de las temporadas de lluvias en la región.

Las fallas en bloques muchas veces están asociadas a discontinuidades fracturas de los materiales que forman un corte o ladera natural. Las proporciones de los deslizamientos son controladas en gran parte por espacio en las discontinuidades que unen el bloque, y por lo tanto, las relaciones D/L varían ampliamente.

Las fallas de una franja superficial son típicas de laderas naturales formadas por materiales más interperizados y arcillos. Tales deslizamientos se mueven con poca distorsión, predominante como una sola unidad. La relación D/L rara vez alcanza valores mayores de 0,1. La figura 33. muestra estos tipos de fallas trasnacionales.

Sin embargo, un movimiento de rotación trata de autoestabilizarse, mientras uno de traslación puede progresar indefinidamente a lo largo de la ladera hacia abajo.

Los movimientos de traslación son comúnmente controlados por superficies de debilidad tales como fallas, juntas, fracturas, planos de estratificación y zonas de cambio de estado de meteorización que corresponden en términos cuantitativos a cambios en la resistencia al corte de los materiales o por el contacto entre la roca y materiales blandos o coluviones. En muchos deslizamientos de traslación la masa se deforma y/o rompe y puede convertirse en flujo.

Los deslizamientos sobre discontinuidades sencillas en roca se les denomina deslizamientos de bloque, cuando ocurren a lo largo de dos discontinuidades se le conoce como deslizamiento de cuña y cuando se presentan sobre varios niveles de una familia de discontinuidades se le puede denominar falla en escalera.



Foto 2. Ejemplo de deslizamiento trasnacional

1.8.6. Flujo

En un flujo existen movimientos relativos de las partículas o bloques pequeños dentro de una masa que se mueve o desliza sobre una superficie de falla. Los flujos pueden ser lentos o rápidos (Figura 34.), así como secos o húmedos y los puede haber de roca, de residuos o de suelo o tierra. La superficie del deslizamiento o no es distinguible o se desarrolla durante un lapso relativamente breve; es también frecuente que la zona de contacto entre la parte móvil y las masas fijas del talud sea una zona de flujo plástico. El material susceptible de fluir puede ser cualquier formación no consolidada, y así el fenómeno puede presentarse en fragmentos de roca, depósitos de talud, suelos granulares finos o arcillas francas. Los flujos que indudablemente involucran una forma de movimientos de masa son categorizados ya sea como flujos de tierra o flujos de lodo. Los flujos muy lentos o extremadamente lentos pueden asimilarse en ocasiones, a los fenómenos de reptación y la diferencia consiste en que en los flujos existe una superficie fácilmente identificable de separación entre el material que se mueve y el subyacente, mientras en la reptación la velocidad del movimiento disminuye al profundizarse en el perfil, sin que exista una superficie definida de rotura.

La ocurrencia de flujos está generalmente, relacionada con la saturación de los materiales sub. Superficiales. Algunos suelos absorben agua muy fácilmente cuando son alterados, fracturados o agrietados por un deslizamiento inicial y esta saturación conduce a la formación de un flujo.

Algunos flujos pueden resultar de la alteración de suelos muy sensitivos tales como sedimentos no consolidados.

Recientemente se han realizado estudios para cuantificar el nivel de lluvias que se requieren para producir flujos y es frecuente la ocurrencia de los flujos simultáneamente en sitios diferentes, dentro de una misma formación en el momento de una determinada lluvia de gran intensidad o de un evento sísmico.

a) Flujo de tierra.- Este término lo utilizó Sharpe (1938). Los materiales involucrados en este movimiento son detritus en fragmentos de grava, boleos o fragmentos de roca embebidos en una matriz de suelo fino, tal como es común que suceda en los depósitos de talud en muchas laderas de suelo residual.

Los flujos de tierra son transitorios entre deslizamientos y flujo de lodo. Se diferencian de este último en su menor grado de descomposición estructural. Así pues, los flujos de tierra comúnmente retienen una parte considerable de su recubrimiento vegetal original e incluyen mucho material, que es reconocible del talud donde se originaron.

Son movimientos cuya velocidad puede variar entre límites muy amplios y que se refieren sobre todo a materiales plásticos húmedos o a suelos friccionantes muy finos. La falla sigue aumentando con el contenido de agua y con el aumento de presiones de agua. En caso de suelos plásticos el flujo puede continuar en forma lenta durante largo tiempo.



Foto 3. Ejemplo de flujo de tierra

b) Flujo de lodo.- El deslizamiento ocurre en materiales muy finos con muy alto contenido de agua. La falla produce una completa perturbación estructural. La forma típica del deslizamiento es análogo al avance de un glaciar y la velocidad de deslizamiento desde unos pocos centímetros por año hasta la velocidad correspondiente a deslizamientos catastróficos.

En flujos lentos es común que la velocidad del movimiento influya mucho en las variaciones estacionales del clima, en tanto que los flujos rápidos en seguir a épocas de violenta precipitación pluvial. Los movimientos lentos suelen ocurrir en materiales arcillosos figurados o finamente ínterstratificado con capas de agua; ocurren a lo largo de la superficie no muy profunda y sus relaciones de D/L varían ampliamente; la inclinación media de la superficie puede variar entre 5° y 15°. Los flujos de lodo muy rápidos se presentan muchas veces en ladera de las que se ha removido la cobertura vegetal por alguna razón y suelen comenzar en muy modestas proporciones, creciendo rápidamente hasta llegar a desencadenar verdaderos ríos de lodo, capaces de causar verdaderas catástrofes. En la figura 34. se presentan los tipos de flujo.

c) Flujo en roca.- Los movimientos de flujo en roca comprenden las deformaciones que se distribuyen a lo largo de muchas fracturas grandes y pequeñas. La distribución

de velocidades puede simular la de líquidos viscosos. Este tipo de movimiento ocurre con mucha frecuencia en zonas tropicales de alta montaña y poca vegetación, especialmente en la cordillera de los Andes.

Se observa la relación de estos flujos con perfiles de meteorización poco profundos en los cuales las fallas están generalmente, relacionadas con cambios de esfuerzos y lixiviación, ocasionados por la filtración momentánea del agua en las primeras horas después de una lluvia fuerte. Las pendientes de estos taludes son comúnmente muy empinadas (más de 45°). Su ocurrencia es mayor en rocas ígneas y metamórficas muy fracturadas y pueden estar precedidos por fenómenos de inclinación. Estos flujos tienden a ser ligeramente húmedos y su velocidad tiende a ser rápida a muy rápida.

d) Flujo de residuos (Detritos).- Por lo general, un flujo de rocas termina en uno de residuos. Los materiales se van triturando por el mismo proceso de flujo y se puede observar una diferencia importante de tamaños entre la cabeza y el pie del movimiento. El movimiento de los flujos de detritos puede ser activado por las lluvias, debido a la pérdida de resistencia por la disminución de la succión al saturarse el material o por el desarrollo de fuerzas debidas al movimiento del agua subterránea (Collins y Znidarcic, 1997).

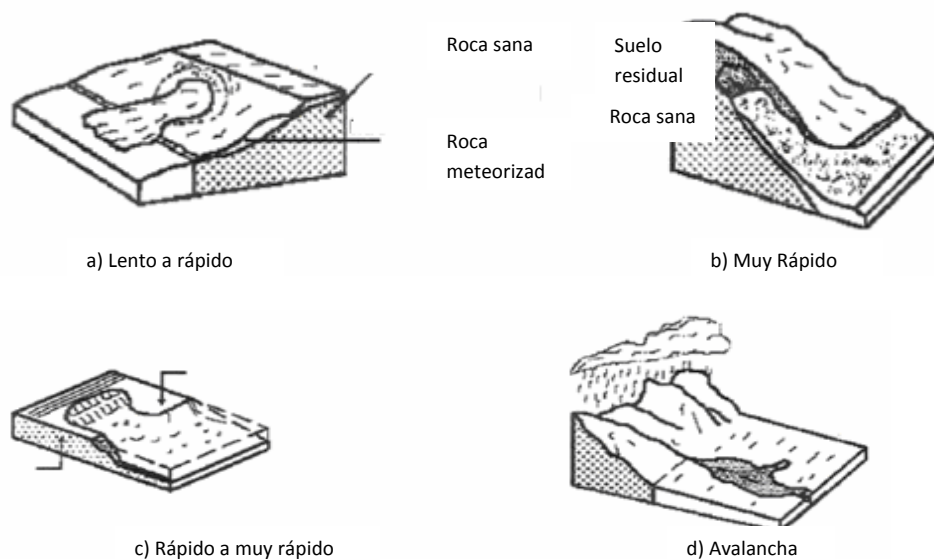


Figura 34. Flujos de diferentes velocidades

Los daños causados por los flujos de detritos abarcan áreas relativamente grandes. El flujo típico de detritos es una honda larga de materiales sólidos y líquidos entremezclados, que se mueve en forma constante a través de un canal con algunas ondas menores súperimpuestas que se mueven a velocidades superiores a aquellas del flujo mismo. Cuando el canal es más pequeño que el flujo, se forman ondas horizontales o depósitos laterales a los lados del canal



Foto 4. Ejemplo de flujo lento a rápido



Foto 5. Ejemplo de flujo rápido



Foto 6. Ejemplo de flujo en avalanchas

1.8.7. Deslizamientos Múltiples y Complejos

Con mucha frecuencia los movimientos de un talud incluyen una combinación de dos o más de los principales tipos de desplazamiento descritos anteriormente, este tipo de movimientos se les denomina como "Complejo". Adicionalmente, un tipo de proceso activo puede convertirse en otro a medida que progresa el fenómeno de desintegración; es así como una inclinación puede terminar en caído o un deslizamiento en flujo.

Cuadro7. Glosario de nombres para la caracterización de movimientos en masa

Tipo	Secuencia	Estado de actividad	Estilo	Velocidad	Humedad	Material
Caído	Progresivo	Activo	Complejo	Extremadamente rápido	Seco	Roca
Inclinación	Regresivo	Reactivado	Compuesto	Muy rápido	Húmedo	Tierra
Deslizamiento	Ampliándose	Suspendido	Múltiple	Rápido	Mojado	Residuo
Espaciamiento	Alargándose	Inactivo	Sucesivo	Moderado	Muy mojado	
Flujo	Confinado	Dormido	sencillo			

	Disminuyendo	Abandonado		Lento		
	Moviéndose	Estabilizado		Muy lento		
		Relicto		Extremadamente lento		

1.8.8. Caracterización del Movimiento

Adicionalmente al tipo de movimiento es importante definir las características que posee en cuanto a secuencia, estado de actividad, estilo, velocidad, humedad, y material.

1. Tipo de material.-Los términos siguientes han sido adoptados como descripción de los materiales que componen un determinado movimiento del talud.

a. Roca- Se denomina "Roca" a la roca dura y firme que estaba intacta en su lugar antes de la iniciación del movimiento.

b. Residuos.- Se denomina con el nombre de Residuos o "Detritos" al suelo que contiene una significativa proporción de material grueso. Se considera que si más del 20% del material en peso es mayor de 2 milímetros de diámetro equivalente, debe llamarse como Residuos.

Por lo general, deben existir partículas muchos mayores de 2 milímetros para que pueda considerarse de este modo.

c. Tierra.- Se denomina tierra, al material de un deslizamiento que contiene más del 80% de las partículas menores de 2 milímetros. Se incluyen los materiales desde arenas a arcillas muy plásticas.

2. Humedad.- Se proponen cuatro términos para definir las condiciones de humedad así:

a.Seco: No contiene humedad "visible".

b. Húmedo.-Contiene algo de agua pero no posee agua (corriente) libre y puede comportarse como un sólido plástico pero no como un líquido.

c. Mojado.-Contiene suficiente agua para comportarse en parte como un líquido y posee entidades visibles de agua que pueden salir del material.

d. Muy mojado.-Contiene agua suficiente para fluir como líquido, aún en pendientes bajas.

3. Secuencia de repetición.- La secuencia se refiere a movimientos que inician en un área local y progresan o se repiten en una determinada dirección. Varnes (1978) recomienda utilizar la siguiente terminología:

a. Progresivo.- La superficie de falla se extiende en la misma dirección del movimiento.

b. Retrogresivo.- La superficie de falla se extiende en dirección opuesta al movimiento.

c. Ampliándose.- La superficie de falla se extiende hacia una u otra de las márgenes laterales.

d. Alargándose.-La superficie de falla se alarga agregando continuamente volumen de material desplazado. La superficie de falla puede alargarse en una o más direcciones. El término alargándose puede utilizarse indistintamente con el término progresivo.

e. Confinado.- Se refiere a movimientos que tienen un escarpe visible pero no tienen superficie de falla visible en el pie de la masa desplazada.

f. Disminuyendo.- El volumen de material siendo desplazado, disminuye con el tiempo.

CAPÍTULO II

RELEVAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

CAPÍTULO II

RELEVAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

2.1. Generalidades

La información que se tiene que realizar es en campo y en el lugar de la zona, aunque algunos datos tienen un origen general como lo es el caso de la información geológica, sin embargo hay que distinguir que información es la que se necesita en primera instancia y la información complementaria del lugar.

La carretera Tarija – Bermejo tiene una longitud de 209 Km, tiene mucha importancia por ser la misma parte de la frontera con la república Argentina, nos permite gran cantidad de flujo vehicular con turistas como de grandes cantidades de comercio hacia la capital del departamento y de todo Bolivia; también nos permite el traslado rápido de productos del lugar donde se cultivan grandes cantidades de caña de azúcar y cítricos que son comercializados en Tarija y en todo el país, carretera con paisajes paradisíacos, con masas montañosas importantes y gran cantidad de flora y fauna.

Gran parte de esta carretera está construida en una zona montañosa, con presencia de mucha vegetación, pendientes altas, donde se producen fuertes precipitaciones pluviales, las mismas que produjeron daños muy tempranos, influyendo fundamentalmente en la estabilidad de taludes de tierra como de roca produciendo en ellos deslizamientos con volúmenes grandes de tierra como de rocas. Dicho fenómeno ha producido también socavaciones en muros de contención de HoCo como de gaviones produciendo grandes deformaciones en su estructura, así como erosión hídrica y pérdida de la carpeta asfáltica, taponamiento de alcantarillas, colmatación de cunetas de drenaje, debilitamiento de la capa base y subbase por infiltración de masas de agua, dejando grietas en las cuales se producen colchones que a la larga producen hundimiento en la vía con el resultado de la pérdida de la carpeta asfáltica.

El talud es el más largo de los taludes analizados y se encuentra entre las progresivas 21 + 220 y 21 + 620 llegando a la zona más alta de Guayavillas en donde se presentan deficiencias y posibles deslizamientos que ocasiona trastornos a la libre circulación de los vehículos. La carretera Tarija – Bermejo especialmente en época de lluvias presenta muchos problemas y por ello hay que saber identificar muy bien si las causales que hacen denotar las lluvias son del tipo natural o si el hombre a fallado en los diseños y construcción de las obras viales.

2.2. Localización del tramo en la zona del problema

La zona de estudio se encuentra en la provincia Arce a unos 20 kilómetros de Padcaya, en dirección hacia el sur, forma parte fundamental de la Carretera Internacional Tarija Bermejo, en el tramo nuevo Padcaya la Mamora. El área de estudio es conocida por el nombre de La Zona Alta de Guayavillas. En las progresivas 21 + 220 y 21 + 620. La carretera Tarija - Padcaya – Zona alta de Guayavillas - Bermejo, forma parte de la Ruta Fundamental No. 1, que conforma a su vez el corredor Oeste - Sur que vincula las poblaciones fronterizas del Desaguadero (Perú) y Bermejo (Argentina) a lo largo de 1.194 Km. La carretera Tarija - Bermejo tiene una longitud de 209 kilómetros. Ubicación geográfica del lugar dentro de un contexto internacional es una carretera que nos permite tener una comunicación socioeconómica con la república vecina de la Argentina.

Cuadro 8. Ficha técnica

FICHA TÉCNICA	
Ubicación	TARIJA
Ruta	RF 1
Corredor de Integración	OESTE – SUR
Longitud	0,4 Km.

Ubicación geográfica del lugar dentro del contexto nacional está catalogada como una carretera fundamental por el SNC.

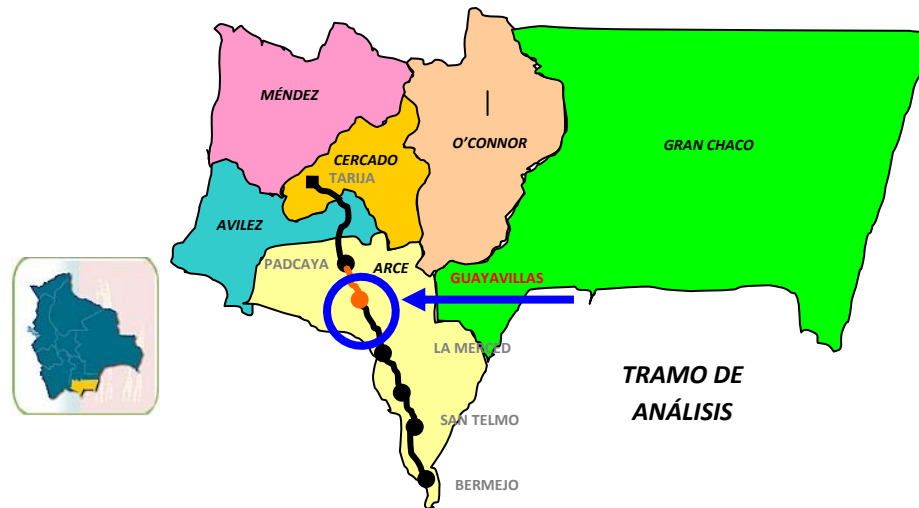


Figura 35. Ubicación del tramo analizado dentro el contexto nacional y departamental

Como se puede apreciar el área de estudio dentro el contexto departamental se encuentra en la provincia Arce que comunica las provincias de Cercado y Arce.

2.3. Información General

Se puede destacar una información general en cuatro aspectos que son:

- Factor Geológico
- Factor topográfico
- Factor de vegetación
- Factor hidrológico.

a) Factor geológico

Como información general se presenta a continuación la estratificación geológica del lugar, esto mediante un relevamiento visual en los entornos del lugar, esta inspección fue fácil deducirla ya que la topografía accidentada permitió un recorrido por las hendiduras de la montaña y descubrir su verdadera estratificación, a esto se suma la información geológica del lugar y poder así definir el origen y composición montañosa de la zona.

De acuerdo al gráfico se puede establecer que else encuentra con material del cuaternario comprendido por arcillas, lutitas, arenas y gravas con materiales finos y conglomerado de material granular como rocas de diferentes tipos.

Esquema que representa la estratificación geológica del lugar.



Figura 36. Estratificación Geológica

El esquema deduce que un suelo de origen coluvial que fue depositado sobre la roca dura con un buzamiento de una pendiente alta que se manifiesta inestable cuando se realizan los cortes por donde transitará la carretera. Además de que la combinación de los factores como ser; tipo de suelo y disponibilidad de las rocas en inclinaciones considerables, movimiento vibratorio por el transitar vehicular, exceso de humedad, lluvias entre otros, son determinantes al contribuir con los movimientos y deslizamiento del talud. Aspectos como la composición, resistencia, deformabilidad, grado de alteración y facturación, porosidad y permeabilidad determinan la posibilidad del terreno de sufrir roturas y desplazamientos.

En la fotografía adjunta se puede identificar con precisión el conglomerado existente en el lugar, que claramente tiene una tendencia deslizante, por los efectos que tiene la fuerza de la gravedad, y que constantemente origina un deslizamiento superficial de los materiales que al parecer se encuentran con una flojedad media



Foto 7. Terreno suelto deslizable

b) Factor Topográfico

Este factor es fundamental, debido a que describe las características accidentadas del lugar, obviamente se observa una cadena montañosa, con fuertes pendientes en sus laderas, compuesta por una variedad de materiales propios de este sistema. La cadena montañosa en la zona de estudio tiene pendientes del orden superior a los 30 grados de inclinación, y la carretera pasa por aproximadamente $\frac{3}{4}$ partes de la altura del talud, quedando todavía mucho tramo para llegar a la cima que en este caso sería la corona del talud.

Este factor es muy importante debido a que cambiará la forma de pensar y calcular la estabilidad de taludes, ya que por el tamaño explicado éste tendrá que ser reforzado hacia el cálculo de taludes infinitos.

c) Factor de vegetación

Éste es el factor que no ocasiona deslizamientos, si más aún la falta de estos como una cobertura vegetal adecuada ya sea natural o hidrosiembra como medida de mitigar el deslizamiento del talud del tramo en estudio.

En este talud se puede observar que se realizó un intento de hidrosiembra, pero que fue bastante escasa y que al parecer no podemos afirmar de qué tipo se trata pero no logró su objetivo.



Foto 8. Vegetación intento de Hidrosiembra en el lugar

d) Factor Hidrológico

Este factor es muy importante resaltar ya que se puede evidenciar una fuerte presencia de humedad en el lugar, al parecer es una zona bastante húmeda inclusive en época fuera de lluvias y que seguramente definirá la orientación del cálculo en la estabilidad de taludes.

Foto 9. Presencia de agua que se filtra en talud



En esta foto se puede evidenciar la presencia de agua que se filtra por el cuerpo del talud lo cual produce un potencial de deslizamiento, que ocasiona el rompimiento del muro de gaviones que se construyó para mitigar el deslizamiento del talud.

Por lo observado podemos afirmar que las filtraciones de agua son determinantes para que el talud pierda su estabilidad y su resistencia al esfuerzo cortante disminuya por el agua y la fuerza de gravedad.

2.4. Levantamiento Topográfico

➤ Topografía

La topografía en el área de análisis tiene unas características donde se presenta principalmente la existencia de una secuencia de serranías que se intercalan de manera paralela con valles longitudinales que tienen sentido norte sur y presentan variaciones entre los 1800 m.s.n.m. y 2200 m.s.n.m.

Dichas serranías se presentan a lo largo de la carretera especialmente en el tramo en estudio dando lugar a la presencia de cortes en las serranías debido al alineamiento de la carretera todo lo anterior ya mencionado se puede verificar en el mapa de relieves montañosos del tramo que se presentan en los anexos.

El levantamiento topográfico enfoca su trabajo, primeramente en trazar puntos referenciales fijos de los cuales con disparos radiales se puede realizar la información en detalle de todo el relieve del lugar, en este caso el plano principal que se requiere es un plano de las curvas de nivel en detalle y de manera general, que combine la plataforma de la calzada y el talud a ser estudiado.

Se observa que es imposible llegar a la cima, además que es totalmente innecesario ya que con una distancia prudencial se puede obtener los datos requeridos y preparar en gabinete los perfiles necesarios para desarrollar este trabajo.

El detalle de todo el trabajo, las planillas, planos y otros están ubicados en el **anexo** de este trabajo.

2.5. Estudio hidrológico

Uno de los aspectos identificados en el lugar, es la humedad constante durante todo el año, en épocas secas se encuentra humedades de saturación en los suelos que hacen de cobertura vegetal y mineral en la zona, mucho más todavía cuando es la época de lluvias, lo que implica a pensar que si las condiciones del suelo son apropiadas, se puede producir un fenómeno de infiltración en el lugar, situación que puede ser determinante a la hora de los cálculos.

En tal sentido es necesario levantar información adecuada sobre el comportamiento de lluvias y otros en el lugar, de esa manera tendremos la certeza de que la orientación de la investigación es la correcta.

➤ Hidrológica

Las máximas precipitaciones que se presentan en el tramo analizado, con más de 2.000 mm. anuales, distribuyéndose de manera variable y con un ciclo hidrológico de máximas lluvias en los meses de octubre, noviembre, diciembre, enero, febrero y marzo con lluvias que superan los 100 mm. mensuales.

A continuación se presentan las planillas oficiales, que brindan los datos del lugar.

2014													
2015													
MEDIA	12	11	10	4	0	0	0	0	2	5	8	11	62

➤ **Clima**

El área de análisis presenta las siguientes características climatológicas correspondiendo a la parte sur del sub andino que presenta una humedad muy notoria varia su clima frio a templado subhúmedo a cálido subhúmedo, con precipitaciones pluviales que varían entre 1000 mm y 2200 mm año, con temperaturas medias anuales de 16°C y 23°C.

Planilla 3. Resumen climatológico

RESUMEN CLIMATOLÓGICO

Período Considerado: 1999 – 2009

Estación: LA MERCED

Latitud S.: 22° 01' 29"

Provincia: ARCE

Longitud W.: 64° 40' 36"

Departamento:TARIJA

Altura: 1.509 m.s.n.m.

Indice	Unidad	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.	ANUAL
Temp. Max. Media	°C	28,2	27,6	26,9	24,5	21,8	22,7	22,3	23,9	24,8	26,9	27,5	27,7	25,4
Temp. Min. Media	°C	15,7	15,1	15,0	12,4	8,3	6,8	6,1	7,2	8,6	12,6	13,5	15,1	11,4
Temp. Media	°C	22,0	21,4	21,0	18,4	15,0	14,7	14,2	15,6	16,7	19,7	20,5	21,4	18,4
Temp.Max.Extr.	°C	37,0	38,0	34,0	36,0	38,0	37,0	38,0	39,0	41,0	39,0	40,0	41,0	41,0
Temp.Min.Extr.	°C	11,0	8,0	7,0	3,0	-3,0	-1,0	-3,0	-2,0	0,0	1,0	5,5	9,0	-3,0
Dias con Helada		0	0	0	0	0	1	2	1	0	0	0	0	5

Precipitación	Mm	148,7	92,4	99,7	14,8	0,9	0,2	0,0	0,0	9,1	41,5	52,9	109,7	569,9
Pp. Max. Diaria	Mm	82,5	61,5	69,0	14,5	7,0	2,0	0,5	0,0	17,7	42,5	54,0	60,0	82,5
Dias con Lluvia		12	11	10	4	0	0	0	0	2	5	8	11	62

2.6. Mecánica de suelos

Esta área de conocimiento es muy importante ya que se trata de realizar un estudio completo de suelos del lugar, y para ello se recurre a la Mecánica de Suelos, en toda su extensión, ya que el cálculo de la estabilidad de taludes es parte fundamental de esta área profesional.

El trabajo está enfocado en definir tres aspectos fundamentales que son;

- Trabajo de Campo.

Consiste en referirse a la zona de estudio para realizar los muestreos necesarios de suelo considerando todos los aspectos normativos que implica esta investigación.

El muestreo de la plataforma; debe realizarse en la plataforma de la calzada, en donde existen las fallas que dejaron sus agrietamientos que permiten la visualización de las capas estructurales del pavimento, es ahí donde se aprovecha para la extracción de los materiales en las cantidades necesarias que requieren los ensayos.

No se pudo realizar una extracción de la sub rasante debido a que se trata del mismo suelo existente en el entorno del talud.

De esta Plataforma se extrajo material en suficiente cantidad para la realización de un CBR, lo que implica que el resto de los ensayos ya se encuentran involucrados en este cálculo.

El muestreo de los suelos de Talud; el mismo debió ser considerando un sistema de muestreo al tres al bolillo, sin embargo como se trata de referir a perfiles por donde se realizará el estudio de la estabilidad de taludes, se esperó a que topografía nos defina por donde pasaran los ejes de estudio, y se procedió al muestreo de los suelos en las cantidades suficientes que requieren los ensayos respectivos.

Se consideró que las humedades naturales son valor importante en el cálculo por lo que se procedió con el cuidado necesario y poder obtener esos datos en el sitio.

- Trabajo de Laboratorio

Las muestras fueron procesadas en el laboratorio de suelos de la carrera de ingeniería civil, y el detalle de los ensayos en su número fue el siguiente:

Ensayos realizados	Plataforma	Talud
Humedad	3	3
Granulometrías	3	3
Límites	3	3
Clasificación AASHTO	3	3
Compactación	1	0
CBR	1	0
Pesos unitarios en Sitio	0	1
Peso específico natural		3

Peso específico relativo		1
Esfuerzo Cortante		3

Cuadro 9. Número de ensayos por área

Desde luego el detalle normativo de los ensayos ejecutados en el laboratorio no se encuentra en esta investigación por tratarse de constantes que no cambian en todas las investigaciones y servicios realizados por el laboratorio.

Las planillas de todos los ensayos numerados que se realizaron se encuentran en el **anexo** de esta investigación.

- Trabajo de cálculo de parámetros necesarios.

Obviamente con los parámetros y resultados obtenidos en laboratorio, se procedió al cálculo de otros parámetros que se necesitan para el cálculo de la estabilidad de taludes y se definen a continuación.

Parámetros
Compacidad Relativa
Cohesión
Peso específico natural
Angulo de Fricción interna

Cuadro 10. Parámetros calculados

Todas las planillas de estos cálculos se encuentran en los **anexos**.

2.7. Cálculo de la Estabilidad de Taludes Infinitos

El cálculo de la estabilidad de taludes está basado fundamentalmente en determinar el factor de seguridad, con el que cuenta la pendiente, para ello es necesario identificar el tipo de talud que se encuentra en la zona, como ya se vino previendo el caso puede darse en taludes finitos y taludes infinitos, dependiendo de que si la corona de talud se encuentra a una altura alcanzable o no para el estudio.

En este sentido y por la topografía planteada se puede establecer que el cálculo que se requiere en este caso es definir una estabilidad de taludes infinitos, que pueden estar en condiciones normales como estar sometidos a la infiltración.

La tarea del ingeniero encargado de analizar la estabilidad es determinar el factor de seguridad, en general el mismo se define como sigue:

$$FS_s = \frac{\tau_f}{\tau_d}$$

Donde:

FS_s = Factor de seguridad con respecto a la resistencia.

τ_f = Resistencia cortante promedio del suelo.

τ_d = Esfuerzo cortante promedio desarrollado a lo largo de la superficie potencial de falla.

2.7.1. Estabilidad de Taludes Infinitos sin Infiltración

Como la corona de talud es muy inalcanzable, se tiene que realizar un análisis de talud infinito, pero que tiene la misma base de cálculo en la siguiente expresión.

$$\tau_f = c + \sigma' \tan \phi$$

Donde:

c = cohesión

σ' = Esfuerzo efectivo normal.

ϕ = Ángulo de fricción interna.

En este caso se evalúa el factor de seguridad ante una falla potencial de talud a lo largo de un plano AB a una profundidad H por debajo de la superficie del terreno.

La falla del talud ocurre por el movimiento del suelo arriba considera un elemento de talud $abcd$, que tiene una longitud unitaria perpendicular al plano de la sección mostrada.

Las fuerzas F, que actúan sobre las caras ab y cd son iguales y opuestas y pueden despreciarse.

El peso efectivo del elemento de suelo (con presión de poro igual a cero).

$$W = (\text{volumen del elemento de suelo}) \times (\text{peso específico del suelo}) = \gamma LH$$

El peso W, se resuelve en dos componentes.

- La fuerza perpendicular al plano $AB = N_a = W \cos \beta = \gamma LH \cos \beta$
- Fuerza perpendicular al Plano $AB = T_a = W \sin \beta = \gamma LH \sin \beta$.
- Note que esta es la fuerza que tiende a causar el deslizamiento a lo largo del plano.

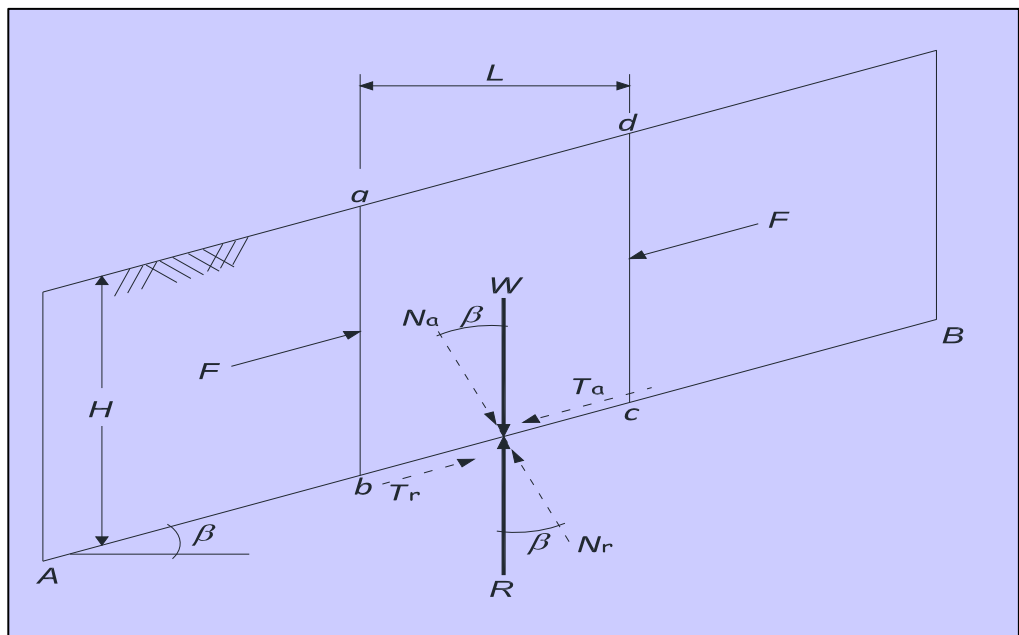


Figura 37. Esquema de talud infinito sin infiltración

El esfuerzo normal efectivo y el esfuerzo cortante en la base de talud son:

$$\sigma' = \frac{N_a}{\text{área de la base}} = \frac{\gamma L H \cos \beta}{\left(\frac{L}{\cos \beta}\right)} = \gamma H \cos^2 \beta$$

$$\tau = \frac{T_a}{\text{área de la base}} = \frac{\gamma L H \sin \beta}{\left(\frac{L}{\cos \beta}\right)} = \gamma H \cos \beta \sin \beta$$

En es sentido se pueden seguir las deducciones y se llega a la expresión buscada.

$$FS_s = \frac{c}{\gamma H \cos^2 \beta \tan \beta} + \tan \phi \frac{1}{\tan \beta}$$

Y la altura crítica se da por

$$H_{cr} = \frac{c}{\gamma \cos^2 \beta (\tan \beta - \tan \phi)}$$

2.7.2. Estabilidad de Taludes Infinitos con Infiltración

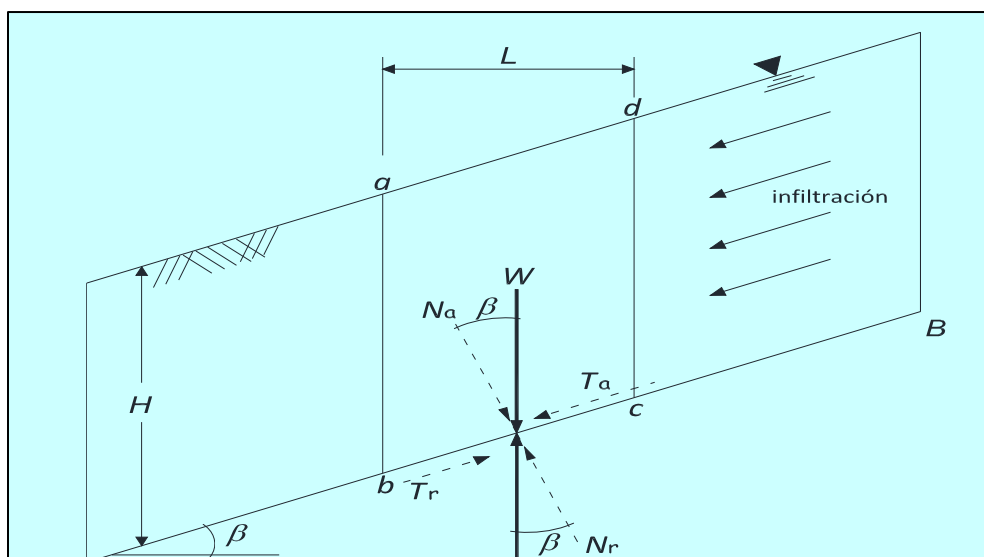
Este análisis consiste en suponer que hay infiltración a través del suelo y que el nivel de agua freática coincide con la superficie del terreno. La resistencia cortante del suelo se da por.

$$\tau_f = c + \sigma' \tan \phi$$

Con las mismas consideraciones en la deducción se obtiene.

$$FS_s = \frac{c}{\gamma_{sat} H \cos^2 \beta \tan \beta} + \frac{\gamma' \tan \phi}{\gamma_{sat} \tan \beta}$$

Figura 38. Esquema de talud infinito con infiltración



CAPÍTULO III

ANÁLISIS PATOLÓGICO POR ÁREAS DE ESTUDIO

CAPÍTULO III

ANÁLISIS PATOLÓGICO POR ÁREAS DE ESTUDIO

3.1. CRITERIOS DE ANÁLISIS PATOLÓGICO

Como el alcance del tema consiste en definir un análisis patológico que presentan los taludes en la zona alta de Guayavillas, ya que es en esa zona donde se presentaron algunas fallas sobre todo en la calzada correspondiente a la carretera, donde se presume existe una falla geológica que persistirá a través del tiempo y que es muy difícil poder realizar los arreglos correspondientes de las fallas existentes.

Se establecen criterios que corresponde a verificar si en verdad existe dicha falla geológica. Como es de conocimiento general un estudio geológico completo de la zona, puede incurrir a gastos demasiado onerosos, por lo que es necesario enfocar desde el punto de vista de la mecánica de suelos, si en verdad existe dicha falla.

La mecánica de suelos, mediante el estudio de la estabilidad de taludes, facilita la verificación de que si la falla es propia de un talud o si la falla es de un movimiento mucho más grande – geológico en este caso.

El estudio de la estabilidad de taludes, generalmente propone un estudio a taludes finitos, es decir que se puede apreciar la altura de talud limitada por una corona, lo que es muy difícil en este caso ya que la zona alta de Guayavillas está en medio de un macizo rocoso montañoso, donde la corona de talud no se logra percibir y mucho menos un tratamiento como talud finito.

En ese sentido, se propone el estudio de la estabilidad de taludes infinitos – ya que adecua con más facilidad en este caso -, sabiendo que su cálculo establece en verificar el factor de seguridad y sobre todo el cálculo de una altura crítica de seguridad, si esta altura critica se encuentra por sobre el espesor del estrato estudiado, entonces no se puede admitir que las fallas presentadas son

ocasionadas por una falla geológica, más al contrario el tipo de falla se deberá a otros factores que en su momento deberán ser estudiados y solucionados.

Como la zona alta de Guayavillas presenta mucha humedad, entonces es necesario la verificación en estados adversos, considerando la saturación en extremo, por lo que el cálculo previene dos condiciones principales como lo son: el cálculo de taludes infinitos sin y con infiltración.

3.2. DESCRIPCIÓN GENERAL - PATOLOGÍA VISUAL

La zona alta de Guayavillas, se encuentra en medio de un macizo montañoso, y corresponde como un punto obligado de paso de la carretera internacional Tarija Bermejo, esto debido a que el diseño busca las mejores alternativas a través de las montañas.

Es necesario mostrar de manera directa la zona de falla, por lo que con la siguiente fotografía se observa la zona de estudio correspondiente.



**Foto 10. Carretera Tarija-Bermejo
Zona Alta de Guayavillas**

Foto 11. Se observan estratos de suelos coluviales, aunque en algunas áreas se puede apreciar a la intemperie roca característica de las zonas montañosas. Es obvio que se observa que los taludes tienen pendientes bastante considerables como para ser parte de los



deslizamientos tradicionales de los estratos superficiales.

Foto 12.Obras de arte menor, cunetas y contracunetas.



Obviamente una carretera internacional, tiene todos los componentes que ayudan a su mejor funcionalidad, por lo que se puede observar que existen las obras de arte menor como ser las cunetas y contracunetas y por las alcantarillas correspondientes.

Foto 13.En la presente fotografía –parte inferior derecha -se observa que existe una mancha de tierra y deformaciones de la



calzada, lo que en algún momento se atribuyó a un deslizamiento geológico.



Foto 14.En este caso se presenta un **cabezal de alcantarilla** que se encuentra al terminar casi el recorrido del talud, de la cual se debe presentar la imagen que

para poder visualizar las deficiencias que existen en este tipo de obras. En la misma se observa que se trata de una alcantarilla doble que se encuentra invadida por el material que cae por gravedad de los estratos superiores, al parecer el diseño no considera la colmatación de este material.

Foto 15.En el cabezal de salida se muestra el funcionamiento cabal de la **alcantarilla**, obviamente se trata de de una construcción cuyas deficiencias son demasiado notorias, así por ejemplo los aleros se encuentran demasiado presionados por material acumulado y relleno en condiciones no ingenieriles, que a la larga ocasionan daños a estos muros, tal como se muestra la rajadura y el hundimiento del la base de dicho cabezal, que al parecer se ha socavado en la parte inferior, de manera retro gradante.



Este fenómeno debilita la base de la plataforma ya que el agua comienza a inundarse por debajo ocasionando asentamientos a un costado de la calzada.



Foto 16. Por las condiciones que se tiene en el cabezal de salida de la alcantarilla, se comienza a percibir **fallas** laterales que

dañan la plataforma y por ende ocasionan trastornos a los vehículos que transitan por la zona alta de Guayavillas.

3.3. ANÁLISIS TOPOGRÁFICO

Como era de esperarse una primera patología que presenta la topografía son los elevados ángulos de inclinación de los taludes, los mismos que se encuentran en el orden superior a los 30 grados. La altura de los taludes es demasiado alta, y no se puede visualizar una corona de talud, ya que los mismos corresponden a la cima de la zona montañosa y que está muy por encima del nivel de la plataforma o calzada de la carretera.

La zona montañosa o zona alta de Guayavillas, acoge a la carretera en un tramo bastante representativo, y la misma dentro del levantamiento topográfico se encuentra en la parte inferior, por lo que el levantamiento principal de topografía fue de la parte superior a la calzada, es decir los taludes arriba de la plataforma y no así los que se encuentran por debajo.

Es obvio que realizar el levantamiento topográfico de la parte debajo de la plataforma, no incide a la plataforma, ya que los estratos continúan su pendiente por un tramo todavía más largo.

Lo mencionado se puede apreciar en el plano de planta en anexos.

3.4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LABORATORIO

El estudio de suelos se realizó basado en un criterio de poder identificar los suelos que se ocuparon en el pavimento y los que se encuentran en estado natural, es decir los que pertenecen al talud.

Esta diferencia es debido a que no se trata de los mismos suelos y es necesario poder evaluar los mismos, para tratar de percibir alguna patología que nos indique la culpabilidad o no de las consecuencias que sufre la carretera.

3.4.1. SUELOS DEL PAVIMENTO

De la parte lateral dañada, se puede evidenciar una abertura que permite el muestreo de suelos de la plataforma, en este caso se estimó que el espesor de la capa base es de aproximadamente unos 30 cm, y la capa de sub base, la parte subyacente que tenía una altura de aproximadamente 30 cm.

Como primera patología se puede observar que se trata del mismo suelo, sin diferenciación de tamaños máximos y espesores, es decir que estas dos capas, de no ser por la junta fría que deja la compactación fácilmente pueden confundirse como una sola capa de 60 cm.

Se menciona patología, debido a que generalmente el tamaño máximo de la capa base en esta carretera es de 1" a 3/4", y que debe ser triturada, cumpliendo todas las características y especificaciones técnicas granulométricas.

La capa base analizada no cumple con las especificaciones técnicas recomendadas, ya que se observa que en el suelo ensayado el tamaño máximo es de 2" y la especificación técnica invoca un tamaño máximo de 1", en lo que respecta a los demás puntos esta granulometría cumple con las especificaciones técnicas.

En cuanto a la capa sub base, el tamaño máximo sí cumple, aunque se observa un material grueso en los tamices N° 40 y N° 200, en estos no se está cumpliendo las especificaciones técnicas de la sub base.

Cuadro 11. Comparación granulométrica con especificación técnica

Tamices	tamaño (mm)	Base	Sub Base	ESPECIFICACIÓN	
		% pasa	% pasa	Base	Sub base
2 1/2"	63	100,0	100,0		
2	50,8	100,0	100,0		100
1 1/2	38,10	95,8	95,2		
1	25,40	89,5	88,0	71 – 100	75 – 95
3/4	19,05	81,7	80,1		
1/2	12,27	69,8	67,2		
3/8	9,50	61,2	57,4		40 – 75
Nº4	4,80	45,5	39,5	28 – 58	30 – 60
Nº10	2	33,7	26,9		20 – 45
Nº40	0,43	19,5	11,2	8 – 24	15 – 30
Nº200	0,075	2,8	2,9	2 - 14	5 – 15

Por los valores obtenidos se observa que el material de capa base y sub base es prácticamente el mismo, y en general no existe la diferencia correspondiente, lo que corresponde a deducir que se trata de una patología granulométrica.

Además se puede apreciar que estos suelos son de canto rodado, es decir no han sido extraídos de una planta de trituración, como debería ser, lo cual afectará en el futuro la estabilidad correspondiente del talud que se tiene en estudio en el tramo de la Zona Alta de Guayavillas.

Por la verificación de que para la capa base y sub base, se presenta el mismo suelo, resta realizar ensayos que brindan indicadores físico resistentes, como ser los siguientes.

Cuadro 12. Resumen de ensayos físico resistentes

Identificación ensayo	Capa Base	Capa Sub Base	Rango
Densidad Máxima g/cm ³	2.210	2.209	2.10 – 2.23
Humedad Optima %	5.91	6.61	4 – 7
CBR al 100% D. Max.	94		97 – 100
CBR al 95 % D. Max.	57		>70

En lo que respecta a los ensayos de compactación T – 180, se obtienen resultados reales de este tipo de suelo, es decir tanto la densidad como la humedad, están dentro de los rangos permisibles de los suelos A-1-a(0).

En lo que respecta al valor de la capacidad de soporte CBR, se observa un valor bajo, al 100 % de la densidad Máxima – 94% - y este fluctúa en mucho menos al 95 % de la Densidad Máxima – 57% -, situación que se convierte en una patología por lo que no cumple los rangos estandarizados por las especificaciones técnicas.

3.4.2. SUELOS DE TALUD

Para el estudio de suelos que se encuentran en el talud y por el tamaño y largo del talud, se ha definido seccionar en tres partes los taludes, para ello se han trazado tres ejes de estudio, los mismos que servirán de base para analizar los taludes en los mismos ejes.

El criterio para muestreo, se procede primero en identificar el tipo de suelo predominante en cada eje, esto se hace con una clasificación de suelos, y por tratarse de una carretera se usa la norma AASHTO solamente.

Para detallar el estudio realñizado, tanto en campo como en laboratorio en esta parte del proyecto se brinda la siguiente planilla con todos los resultados obtenidos.

Cuadro 13. Resumen granulométrico y Clasificación de suelos

Muestra	2 1/2"	2	1 1/2	1	3/4	1/2	3/8	Nº4	Nº10	LL	IP	CLAS.
M1	100,00	90,99	84,73	81,08	75,13	65,57	60,24	46,72	41,11	49.1	13.9	A-2-7(1)
M2	100,00	100,00	100,00	96,49	89,80	80,68	75,69	64,77	55,23	50.9	14.3	A-2-7(1)
M3	100,00	97,39	92,80	89,09	83,61	74,29	72,62	70,28	63,50	50.0	16.4	A-2-7(1)

Se observa que de los tres ejes, se obtiene el mismo suelo, que como era de esperarse se trata de un suelo del tipo coluvial, con mucho grueso, pero con un alto contenido de material fino, con fuerte presencia de arcilla. Generalmente este tipo de suelo, suele ser muy parecido al suelo limoso, aunque este tiene material granular, durante la época de lluvias suele ser inestable y susceptible a los deslizamientos pertinentes.

Resumen Granulométrico	M1	M2	M3
Grava > 4.8 mm	53.3	35.2	29,7
Arena gruesa: 4.8 - 2.0 mm	5.6	9.2	6,8
Arena media: 2.0 - 0.43 mm	6.3	17.9	22,2
Arena fina: 0.43 - 0.075 mm	1.65	4.2	8,31
Pasa Nº 200	33.11	33.13	33,03
Total	100	100	100,0
Retenido Nº 10 - 200	8.0	22.1	8,31

Cuadro 14. Resumen de porcentaje fraccionado del suelo

De esta planilla, se deduce que la presencia de material grueso, no es constante ya que en la muestra M1, existe más del 50 % de grava, en las otras muestras M2 y M3, la grava baja en una proporción relevante. Si se observa una constante en el porcentaje que pasa el tamiz Nº 200, aunque su valor todavía corresponde a los de suelo granular, sin embargo la cantidad de arcilla será una constante en el

desarrollo del estudio sobre todo para la definición de un valor importante como lo es la cohesión.

El retenido en el Número 200, varía en función de los porcentajes de arena que en unos casos se combinan con el porcentaje constante de arcilla.

En cuanto a otro valor fundamental que es muy necesario dentro de un estudio de taludes, se debe al peso específico del talud. Por la conceptualización general de que este también se denomina peso unitario y debe ser en estado natural, se procederá a los ensayos de la densidad In situ, recordemos que las relaciones volumétricas de estos son las mismas, y que corresponden el uso de las densidades en el sistema internacional, pero que se refieren a los pesos específicos unitarios.

Identificación	M1	M2	M3
Peso específico natural (g/cm ³)	1.70	1.73	1.67
Humedad Natural (%)	13.57	26.64	19.08
Peso específico compacto (g/cm ³)	2.016		
Humedad óptima (%)	9.08		

Cuadro 15. Resumen pesos específicos y humedades

En esta planilla se observa que los valores, son los esperados en este tipo de suelos, aunque existe una observación en las humedades, se puede decir que sus valores corresponden a la fuerte presencia de una arcilla de alta plasticidad, y existe una variación bastante relevante que hay que considerar en el cálculo de taludes.

En la misma planilla, se puede observar el valor de la compactación y su contenido de humedad óptimo, en este caso por tratarse del mismo suelo, se dispuso el ensayo para representar a los tres ejes, de donde se extrajo las muestras respectivas. El valor de la compactación máxima corresponde a valores

usualmente encontrados en suelos coluviales y su contenido de humedad óptima también.

Comparando las humedades naturales con la óptima, se puede establecer una patología, y es referido al grado de saturación que presentan estos suelos, casi durante todo el año, ya que se trata de una zona alta con fuerte presencia de humedad.

La afirmación de decir durante todo el año, es porque el muestreo de estos suelos se realizó fuera de época de lluvias, por lo que hay que considerarlo como patología ya que la saturación crítica será en otra época del año.

Un estudio de suelos, donde se preparan los valores que se requieren en una estabilización de taludes, debe ser completa y no se puede dejar de lado otro ensayo muy importante y es el referido a la densidad de sólidos, que servirá de base para el cálculo de parámetros importantes, como ser la compacidad relativa y otros que definen indicadores importantes sobre el estado de flojedad que se encuentra el material. Sin embargo para encontrar la compacidad relativa de suelos, es necesario complementar en el laboratorio con el ensayo del peso específico suelto y poder así aplicar la correspondiente expresión.

Identificación	Valor
Densidad de sólidos	2.64
Peso específico suelto (g/cm ³)	1.413
Peso específico compacto (g/cm ³)	2.016
Peso específico natural (g/cm ³)	1.700
Compacidad Relativa (%)	56.094

Cuadro 16. Resumen Calculo de compacidad relativa

La compacidad relativa, se calculó mediante la expresión básica de una relación volumétrica.

$$Cr = \left[\frac{\gamma_d - \gamma_{d(\min)}}{\gamma_{d(\max)} - \gamma_{d(\min)}} \right] \left[\frac{\gamma_{d(\max)}}{\gamma_d} \right]$$

Se verifica que el valor obtenido puede ser sometido a establecer la flojedad del suelo mediante la siguiente tabla.

Compacidad Relativa (%)	Descripción de depósitos de suelo.
0 – 15	Muy suelto
15 – 50	Suelto
50 – 70	Medio
70 – 85	Denso
85 – 100	Muy denso

Cuadro 17. Determinación del estado del estrato respecto de su flojedad

De lo anteriormente establecido, se define que la flojedad del depósito de suelo encontrado tiene un estado medio, lo que correspondería a la verificación de una patología del depósito de suelo, ya que proporciona un indicador de que el suelo es potencialmente deslizable, inclusive a medio saturar, simplemente por efecto de la gravedad.

3.5. VERIFICACIÓN DE ESTABILIDAD DE TALUDES INFINITOS

Como ya se ha planteado al inicio de este capítulo, la altura excesiva de los estratos, donde no se puede percibir la corona de talud, hace que la estabilidad de taludes, tenga que ser mediante el estudio de taludes infinitos, situación que

facilita el cálculo, además que por la constante humedad encontrada en el sitio, este cálculo debe ser enfocado a una estabilidad de taludes con y sin infiltración.

La identificación de perfiles propios que se consideró para el muestreo de suelos, nos sirve de base, ya que mediante dichos perfiles se puede realizar el cálculo de la estabilidad de taludes finitos - obviamente la teoría de éstos se encuentra en los capítulos precedentes -

3.5.1. ANÁLISIS DE TALUDES INFINITOS SIN INFILTRACIÓN

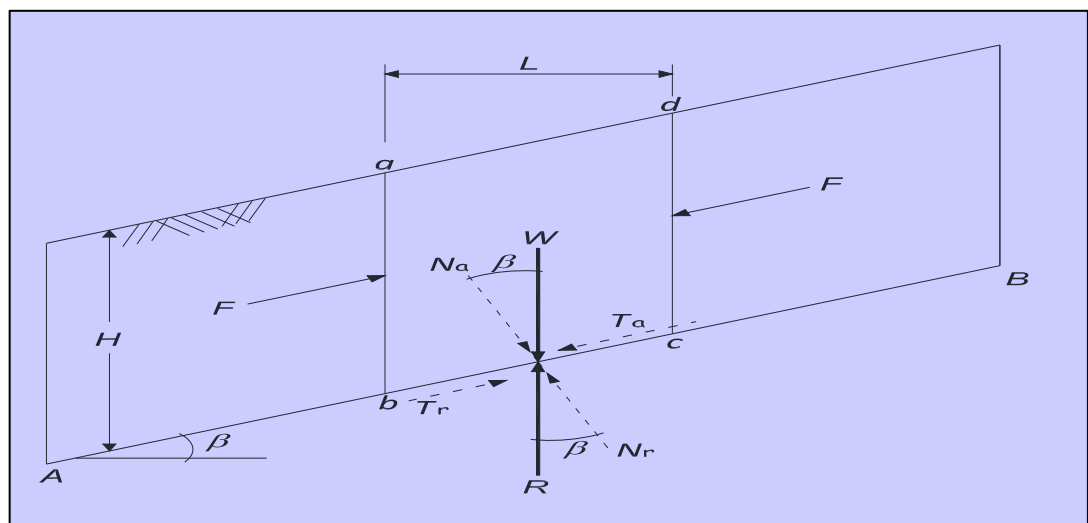


Figura39. Esquema talud infinito sin infiltración

Como se observa en el gráfico correspondiente a un talud infinito sin infiltración, se procede con la selección de un tramo del talud, dentro del cual obviamente se considera su peso propio, la reacción del suelo y sus componentes, tanto normales como horizontales; recordando que las expresiones correspondientes fueron deducidas anteriormente, se procede a recordar dos ecuaciones.

Factor de seguridad

$$FS_s = \frac{c}{\gamma H \cos^2 \beta \tan \beta} + \frac{\tan \phi}{\tan \beta}$$

Altura crítica.

$$H_{cr} = \frac{c}{\gamma \cos^2 \beta (\tan \beta - \tan \phi)}$$

Donde:

FS_s = Factor de seguridad.

H_{cr} = Altura crítica

c = Cohesión.

γ = Peso específico del suelo.

β = Angulo de inclinación del talud

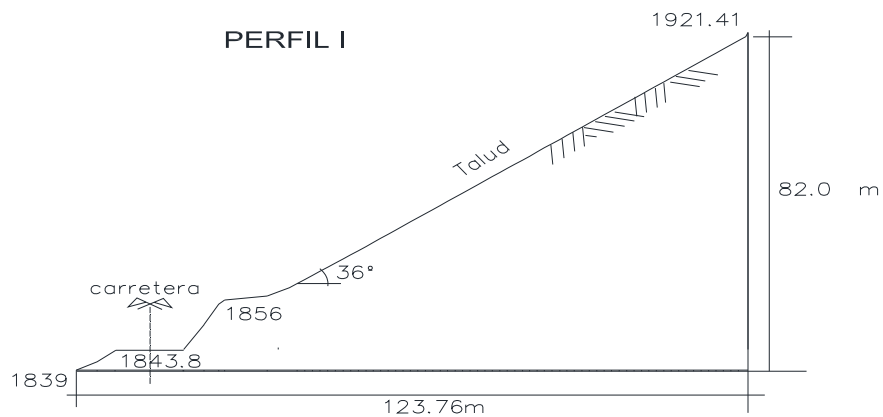
H = Espesor del estrato a considerar.

ϕ = Angulo de fricción interna del suelo

Estas expresiones, pueden ser acomodadas en una planilla y poder realizar el cálculo respectivo, pero para un mayor análisis del comportamiento gradual de acuerdo a la profundidad, se procede el cálculo por cada metro.

Todos los parámetros correspondientes al suelo, fueron extraídos de los ensayos de laboratorio realizados a los materiales que componen el talud en estudio y para cada perfil seleccionado, desde el nivel de la carretera hasta donde se pudo realizar el levantamiento, donde se cree que todavía se puede llegar a tener riesgos.

Figura 40. CÁLCULO DEL TALUD CORRESPONDIENTE AL PERFIL I



Datos de Laboratorio.

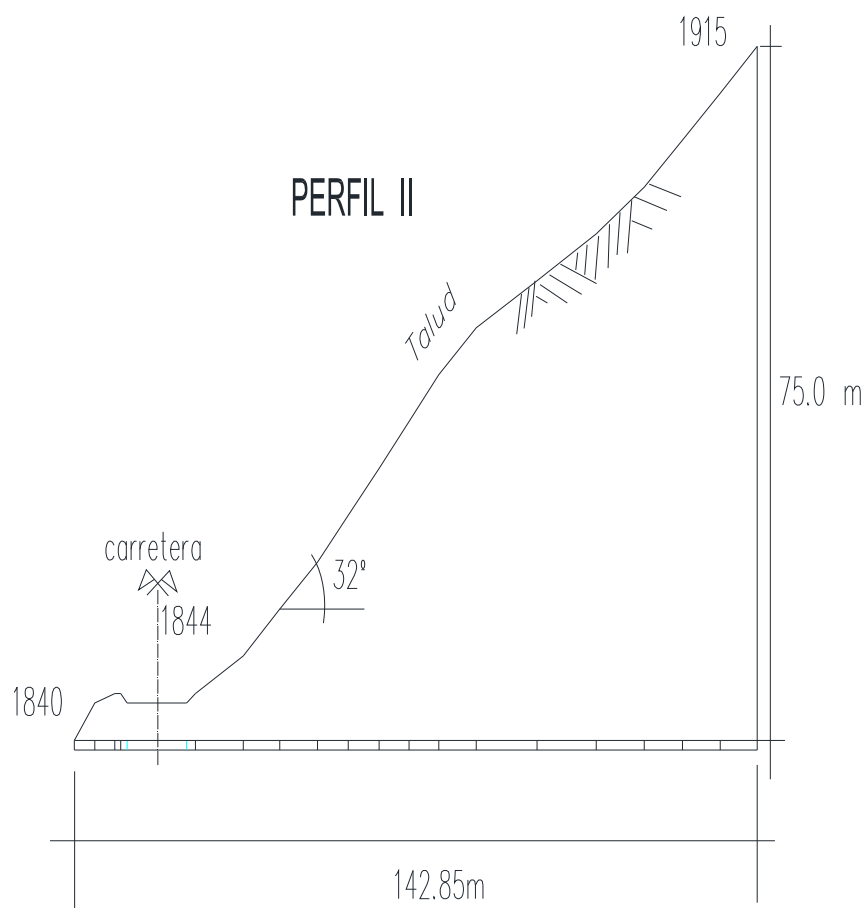
Cohesión =	$c =$	67,14 kN/m ²
Ángulo Inclinación talud =	$\beta =$	36
Peso Específico total =	$\gamma =$	16,66 kN/m ³
Ángulo de fricción interna =	$\phi =$	28
Peso específico saturado =	$\gamma_{sat} =$	20,83 kN/m ³
Peso específico de agua =	$\gamma_w =$	9,81 kN/m ³

PLANILLA DE TALUD INFINITO SININFILTRACIÓN

Altura	Cohesión.	Peso Esp.	Ang.Inclin	Ang.Fricción	FSs	Hcr
H	c	γ	β	ϕ		m
1	67,14	16,66	36	28	9,21	31,6
2	67,14	16,66	36	28	4,97	31,6
3	67,14	16,66	36	28	3,56	31,6
4	67,14	16,66	36	28	2,85	31,6
5	67,14	16,66	36	28	2,43	31,6
6	67,14	16,66	36	28	2,14	31,6
7	67,14	16,66	36	28	1,94	31,6
8	67,14	16,66	36	28	1,79	31,6
9	67,14	16,66	36	28	1,67	31,6
10	67,14	16,66	36	28	1,58	31,6
20	67,14	16,66	36	28	1,16	31,6
30	67,14	16,66	36	28	1,01	31,6

Como ya se mencionó, el cálculo se realizó por cada metro de profundidad, hasta los 10 metros, donde se procede a calcular a los 20 y 30 metros.

Figura 41. CÁLCULO DEL TALUD CORRESPONDIENTE AL PERFIL II



Datos de Laboratorio

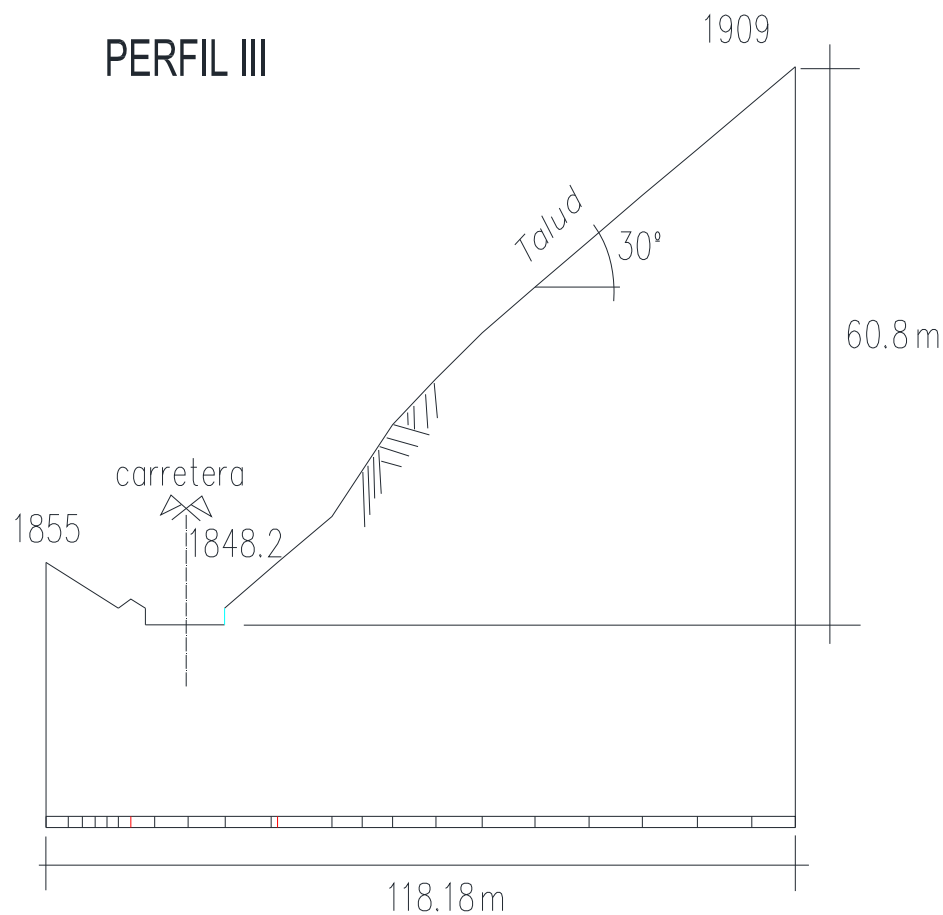
Cohesión =	$c =$	67,14 kN/m^2
Ángulo Inclinación talud =	$\beta =$	32
Peso específico total =	$\gamma =$	16,66 kN/m^3
Ángulo de fricción interna =	$\phi =$	28
Peso específico saturado =	$\gamma_{\text{sat}} =$	20,83 kN/m^3
Peso específico de agua =	$\gamma_w =$	9,81 kN/m^3

PLANILLA DE TALUD INFINITO SIN INFILTRACIÓN

Altura H	Cohesión. c	Peso Esp. γ	Ang.Inclin β	Ang.Fricción ϕ	FSs	Hcr m
1	67,14	16,66	32	28	9,82	60,15
2	67,14	16,66	32	28	5,33	60,15
3	67,14	16,66	32	28	3,84	60,15
4	67,14	16,66	32	28	3,09	60,15
5	67,14	16,66	32	28	2,64	60,15
6	67,14	16,66	32	28	2,35	60,15
7	67,14	16,66	32	28	2,13	60,15
8	67,14	16,66	32	28	1,97	60,15
9	67,14	16,66	32	28	1,85	60,15
10	67,14	16,66	32	28	1,75	60,15
20	67,14	16,66	32	28	1,3	60,15
30	67,14	16,66	32	28	1,15	60,15

Se observa que no se tienen problemas ya que la altura crítica se encuentra a una profundidad muy grande.

Fig. 42. CÁLCULO DEL TALUD CORRESPONDIENTE AL PERFIL III



Datos de Laboratorio:

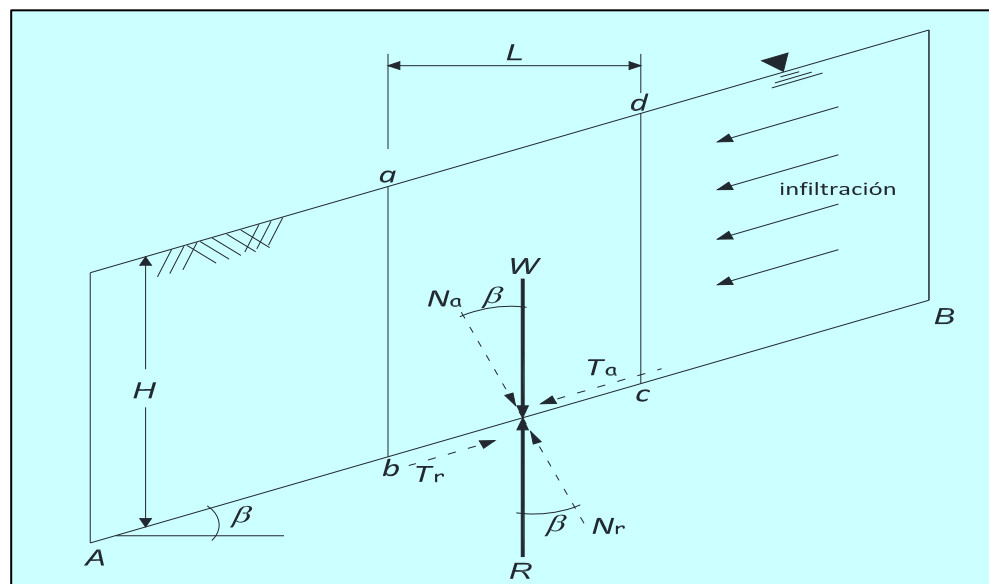
Cohesión =	$c =$	67,14 kN/m ²
Ángulo Inclinación talud =	$\beta =$	30
Peso específico total =	$\gamma =$	16,66 kN/m ³
Ángulo de fricción interna =	$\phi =$	28
Peso específico saturado =	$\gamma_{sat} =$	20,83 kN/m ³
Peso específico de agua =	$\gamma_w =$	9,81 kN/m ³

PLANILLA DE TALUD INFINITO SIN INFILTRACIÓN

Altura H	Cohesión. c	Peso Esp. γ	Ang.Inclin β	Ang.Fricción ϕ	FSs	Hcr m
1	67,14	16,66	30	28	10,23	117,73
2	67,14	16,66	30	28	5,57	117,73
3	67,14	16,66	30	28	4,02	117,73
4	67,14	16,66	30	28	3,25	117,73
5	67,14	16,66	30	28	2,78	117,73
6	67,14	16,66	30	28	2,47	117,73
7	67,14	16,66	30	28	2,25	117,73
8	67,14	16,66	30	28	2,08	117,73
9	67,14	16,66	30	28	1,96	117,73
10	67,14	16,66	30	28	1,85	117,73
20	67,14	16,66	30	28	1,39	117,73
30	67,14	16,66	30	28	1,23	117,73

Los tres perfiles fueron calculados de la misma manera y se observa que para que el factor de seguridad tenga riesgos, el espesor que indica la altura crítica debe ser muy profundo, por lo que no existen patologías de los taludes, cuando no se tiene infiltración.

3.5.2. ANÁLISIS DE TALUDES INFINITOS CON INFILTRACIÓN



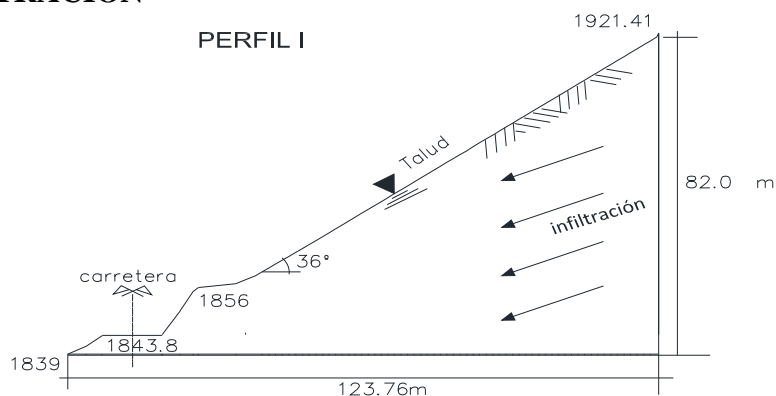
Recordando las condiciones de cálculo; corresponde saber que el nivel de aguas freáticas se encuentra coincidiendo con la superficie, y el flujo de la infiltración hacia abajo.

Factor de seguridad.

$$FS_s = \frac{c}{\gamma_{sat} H \cos^2 \beta \tan \beta} + \frac{\gamma' \tan \phi}{\gamma_{sat} \tan \beta}$$

En este caso se observa que la ecuación se encuentra compuesta por dos partes, y la altura crítica será estimada por iteraciones, cuando el factor de seguridad sea igual a la unidad "1". El resto de los datos son de laboratorio, además, de usar aquellos que indican el grado de saturación del estrato en conflicto.

Figura 44. CÁLCULO DEL TALUD CORRESPONDIENTE AL PERFIL I CON INFILTRACIÓN



Datos de laboratorio:

$$\text{Cohesión} = c = 67,14 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Ángulo Inclinación talud} = \beta = 36$$

$$\text{Peso específico total} = \gamma = 16,66 \text{ kN/m}^3$$

$$\text{Ángulo de fricción interna} = \phi = 28$$

$$\text{Peso específico saturado} = \gamma_{\text{sat}} = 20,83 \text{ kN/m}^3$$

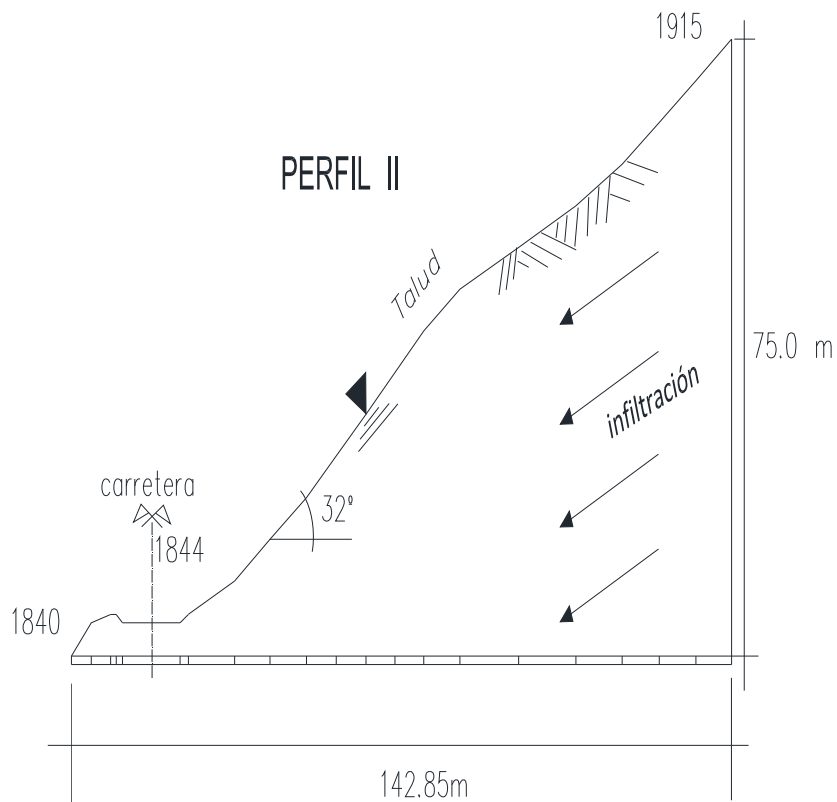
$$\text{Peso específico de agua} = \gamma_w = 9,81 \text{ kN/m}^3$$

Altura H	Cohesión. c	Peso Esp.Sat γ_{sat}	P. Esp.agua γ_w	P.Esp.sum γ'	Ang.Inclin β	Ang.Fricción ϕ	FSs
1	67,14	20,83	9,81	11,02	36	28	7,17
2	67,14	20,83	9,81	11,02	36	28	3,78
3	67,14	20,83	9,81	11,02	36	28	2,65
4	67,14	20,83	9,81	11,02	36	28	2,08
5	67,14	20,83	9,81	11,02	36	28	1,74
6	67,14	20,83	9,81	11,02	36	28	1,52
7	67,14	20,83	9,81	11,02	36	28	1,36
8	67,14	20,83	9,81	11,02	36	28	1,23
9	67,14	20,83	9,81	11,02	36	28	1,14
10	67,14	20,83	9,81	11,02	36	28	1,06
20	67,14	20,83	9,81	11,02	36	28	0,73
30	67,14	20,83	9,81	11,02	36	28	0,61

NOTA: En este caso se observa que por iteraciones, la altura crítica se encuentra a una altura igual.

$$H_{cr} = 11,00 \text{ m}$$

**Figura 45. CÁLCULO DEL TALUD CORRESPONDIENTE AL PERFIL II
- CONINFILTRACIÓN**



Datos de laboratorio:

Cohesión = $c = 67,14 \text{ kN/m}^2$

Ángulo Inclinación talud = $\beta = 32$

Peso específico total = $\gamma = 16,66 \text{ kN/m}^3$

Ángulo de fricción interna = $\phi = 28$

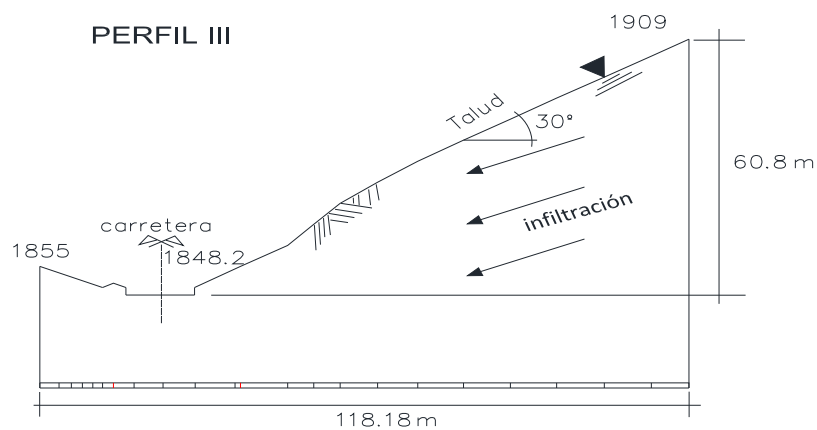
Peso específico saturado = $\gamma_{sat} = 20,83 \text{ kN/m}^3$

Peso específico de agua = $\gamma_w = 9,81 \text{ kN/m}^3$

Altura H	Cohesión. c	Peso Esp.Sat γ_{sat}	P. Esp.agua γ_w	P.Esp.sum γ'	Ang.Inclin β	Ang.Fricción ϕ	FSs
1	67,14	20,83	9,81	11,02	32	28	7,62
2	67,14	20,83	9,81	11,02	32	28	4,04
3	67,14	20,83	9,81	11,02	32	28	2,84
4	67,14	20,83	9,81	11,02	32	28	2,24
5	67,14	20,83	9,81	11,02	32	28	1,88
6	67,14	20,83	9,81	11,02	32	28	1,65
7	67,14	20,83	9,81	11,02	32	28	1,47
8	67,14	20,83	9,81	11,02	32	28	1,35
9	67,14	20,83	9,81	11,02	32	28	1,25
10	67,14	20,83	9,81	11,02	32	28	1,17
20	67,14	20,83	9,81	11,02	32	28	0,81
30	67,14	20,83	9,81	11,02	32	28	0,69

$$H_{cr} = 13,00 \text{ m}$$

**Figura46. CÁLCULO DEL TALUD CORRESPONDIENTE AL PERFIL III
- CONINFILTRACIÓN**



Datos de laboratorio:

$$\text{Cohesión} = c = 67,14 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Ángulo Inclinación talud} = \beta = 30$$

$$\text{Peso específico total} = \gamma = 16,66 \text{ kN/m}^3$$

$$\text{Ángulo de fricción interna} = \phi = 28$$

$$\text{Peso específico saturado} = \gamma_{\text{sat}} = 20,83 \text{ kN/m}^3$$

$$\text{Peso específico de agua} = \gamma_w = 9,81 \text{ kN/m}^3$$

Altura H	Cohesión. c	Peso Esp.Sat γ_{sat}	P. Esp.agua γ_w	P.Esp.sum γ'	Ang.Inclin β	Ang.Fricción ϕ	FSs
1	67,14	20,83	9,81	11,02	30	28	7,93
2	67,14	20,83	9,81	11,02	30	28	4,21
3	67,14	20,83	9,81	11,02	30	28	2,97
4	67,14	20,83	9,81	11,02	30	28	2,35
5	67,14	20,83	9,81	11,02	30	28	1,98
6	67,14	20,83	9,81	11,02	30	28	1,73
7	67,14	20,83	9,81	11,02	30	28	1,55
8	67,14	20,83	9,81	11,02	30	28	1,42
9	67,14	20,83	9,81	11,02	30	28	1,31
10	67,14	20,83	9,81	11,02	30	28	1,23
20	67,14	20,83	9,81	11,02	30	28	0,86
30	67,14	20,83	9,81	11,02	30	28	0,74

$$\text{Hcr} = 14,50 \text{ m}$$

Se puede establecer que cuando los suelos del talud, pese a tener humedades altas, son bastante estables, y no tienen riesgos de deslizamientos, esto debido a que a través de la historia, estos ya sufrieron deslizamientos considerables.

La patología aparece cuando existe infiltración, en ese momento el talud adquiere un potencial de inestabilidad que hay que considerar en su momento oportuno.

3.6. ANÁLISIS COMPARATIVO CON LA ESTRATIFICACIÓN PRESENTADA

El cálculo de taludes ha mostrado resultados bastante interesantes, pero muy cambiantes dependiendo del estado de suelo, es decir húmedo muy húmedo y con infiltración.

Sin embargo hasta ahora se ha considerado un solo tipo de suelo, como si el talud estaría conformado por un solo estrato, esta posición si bien está definida por la seguridad está muy lejos de la realidad, ya que una zona montañosa es la acumulación de muchos depósitos de suelo y generalmente están conformados por roca o la combinación de ambos.



Figura 47. Esquema de la estratificación real

Ante esta situación, hay que referir la formación estratificada de los taludes, y para ello de acuerdo a las inspecciones visuales y por las características topográficas del entorno, se llega a la conclusión de que el suelo estudiado en la estabilidad de taludes tiene una profundidad limitada, por lo que hay que necesariamente realizar una comparación de las alturas críticas calculadas con el espesor del estrato.

En el grafico, se muestra una porción de talud donde la realidad de la estratificación nos conduce a reafirmar nuestras conclusiones y ajustarlas en un grado comparativo, de tal manera se pueda verificar si en realidad el talud tiene riesgos de deslizamiento o si la zona tiene la tan mencionada falla geológica. Por lo tanto en el siguiente cuadro se resume los datos extraídos del cálculo de los taludes infinitos con y sin infiltración.

Talud Nº	Hcr		Estrato m
	S/INF	C/INF	
1	31,6	11,00	10
2	60,15	13,00	9
3	117,73	14,50	8,45
PROMEDIO =			9,15

Cuadro 18. Comparación de Altura crítica con estrato real

En este cuadro, se observa con bastante claridad las alturas críticas con y sin infiltración, así también se muestra el espesor estimado por las respectivas inspecciones del entorno en cada perfil y se procedió a determinar un promedio de este espesor, para generar la comparación.

Las alturas criticas menos profundas se dan cuando existe la infiltración, esto quiere decir que el factor de seguridad en estas profundidades son igual a la unidad, pero en la comparación ninguna altura de los perfiles son menores a los espesores parciales del estrato y mucho menos al promedio calculado.

Abajo del estrato de suelo clasificado como A – 2-4(1), se encuentra una formación rocosa muy estable que no define un deslizamiento de las características de una falla geológica, ya que esta última tendría que ser de magnitudes demasiado grandes y esto no fue observado en la zona.

Pero la realidad también afirma que existen deslizamientos superficiales de suelo, esto debido a las características ya estudiadas y que definen patologías particulares. El suelo cambia sus características con la humedad y obviamente por el ángulo de inclinación existirán dichos deslizamientos, pero que no son los culpables de la deformación existente en la plataforma de la carretera.

3.7. RESUMEN PATOLÓGICO Y PROPUESTAS DE SOLUCIÓN

Área de estudio	Patología	Propuesta
Inspección visual	Fallas en el diseño y construcción de alcantarillas	Rediseño y construcción
	Elementos de contención mal ejecutados.	Rediseño y construcción.
Topografía	Coronas de talud inalcanzables	Cambiar el cálculo de taludes finitos a taludes infinitos
	Ángulos de inclinación elevados	Sin solución por ser natural
Suelos de carretera	Capa base y sub base sin diferenciación técnica alguna	Evaluación estructural de todo el tramo que pasa por la zona.
	Granulometrías sin cumplir las especificaciones técnicas.	Evaluación estructural de todo el tramo que pasa por la zona.
	CBR, con valores no usuales. (por debajo de las especificaciones técnicas)	Evaluación y verificación estructural de todo el tramo.
Suelos de Talud	Inestabilidad granulométrica para	Sin solución por ser suelo

	un mismo tipo de suelo, con predominio diverso de grava, arena y arcilla en cada eje de talud.	natural
	Fuerte presencia de humedad en época fuera de lluvias	Sin solución por ser suelo natural.
	Fuerte infiltración en época de lluvias	Mejorar el sistema de drenaje – contracunetas, cunetas y alcantarillas -
	Estado deposito de flojedad media suelta	Diseñar elementos de contención materiales sueltos.
Calculo de taludes infinitos con infiltración.	Disminución brusca de la altura critica, cuando hay infiltración	Disminuir efectos mejorando el sistema de drenaje – contracunetas, cunetas y alcantarillas -
	Deslizamiento superficial de materiales sueltos	Diseñar elementos de contención materiales sueltos.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. CONCLUSIONES.-A las conclusiones que pudimos llegar en el presente proyecto de grado son los siguientes:

- De acuerdo al problema planteado y sus objetivos, se puede establecer que se cumplió a cabalidad con todo lo expuesto en el diseño teórico y metodológico de esta investigación, tratando de identificar las causales en cada área de estudio que interviene al estudio de taludes, para las carreteras de carácter internacional.
- En cada área de estudio se presentó al menos una patología, que en algunas son de carácter natural que obviamente no se puede establecer solución alguna, pero que ayudan a definir algunos aspectos mitigantes.
- Algunas patologías no naturales, establecidas por el mal diseño y construcción se encuentran presentes en esta investigación y fueron bien identificadas, de tal manera pueda corroborar con la verificación de causales de las fallas ocurridas en la carretera.
- La patología encontrada en las características topográficas, sobre la altura inalcanzable de la corona de talud, establecen el cambio de cálculo de la estabilidad de taludes, es decir en vez de usar un cálculo para taludes finitos, se procedió a un cálculo de taludes infinitos.
- La patología de la presencia fuerte de humedad en época fuera de lluvias, lleva a la conclusión de que es necesario un cálculo de taludes infinitos en su situación más adversa, es decir considerando un grado de saturación del 100%.
- Los valores de suelos, referidos a la compacidad relativa, indica que el depósito tiene un estado de flojedad media, lo que implica una relación de vacíos elevada y por lo tanto apropiada para un estudio de taludes con infiltración.
- Por la magnitud de los taludes en el tramo analizado, se establecen tres perfiles bien definidos, que soporten el estudio de suelos y el cálculo de taludes infinitos por perfil.
- Por la verificación del factor de seguridad, se establece una altura variable por metro de profundidad hasta los diez metros, luego se procede el cálculo a los veinte y treinta metros, de tal manera se analice el comportamiento de la altura crítica de talud.

- Se realiza el cálculo de la estabilidad de taludes infinitos con y sin infiltración en cada perfil definido por la topografía de terreno.
- Los resultados referidos a las alturas críticas, se resumen y son sometidos a un análisis comparativo con el espesor del estrato real, de tal manera se pueda verificar si existe alguna falla geológica.
- Se establece que las patologías encontradas, no tienen causales de falla geológica ya que esta última procede con magnitudes demasiados grandes que deformarían todo el tramo y no solamente partes puntuales del mismo.
- Los causales de las fallas puntuales están referidas al diseño y la mala ejecución de obras durante la construcción de la carretera.
- Los deslizamientos ocurridos, son superficiales y no dañinos y son por el tipo de suelo encontrado, considerado tolerante dentro del movimiento carretero normal.

4.2. RECOMENDACIONES

- Toda la investigación de establecer las patologías de la zona, han demostrado que muchas fueron ocasionadas por el hombre, por lo que la solución la tiene que brindar él mismo y así mitigar los efectos que a la larga pueden ser más contundentes.
- Se debe hacer una evaluación estructural y por qué no superficial de la plataforma del tramo en cuestión ya que se encontraron deficiencias concernientes a la construcción y diseño civil.
- Se debe hacer un estudio adecuado del sistema de drenajes, considerando el material suelto que se desliza superficialmente y muchas veces taponea lo existente.
- Hay que considerar que en el sistema de drenajes, pueden estar pozos de absorción que minimizan los efectos de la presión de poro cuando ocurre el fenómeno de la infiltración, es decir con estos pozos se encausa el agua hacia el sistema de drenajes y alcantarillas.
- Se tiene que realizar un estudio más adecuado sobre los elementos de contención que se tienen que disponer en los taludes, ya que se encontraron materiales sueltos que por efectos del peso propio y la fuerza de gravedad caen constantemente a la calzada de la carretera.

- Se puede utilizar esta investigación como base para la planificación, rediseño y construcción de las soluciones, tratando de mitigar los efectos identificados y mejorar la funcionalidad de la carretera Tarija – Bermejo, en el tramo de la zona alta de Guayavillas.