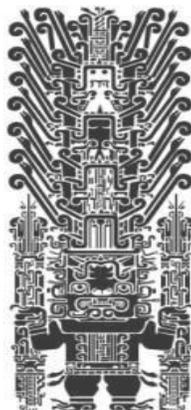


UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



“COMBINACIÓN DE LOS MÉTODOS JANBÚ – SPENCER EN EL ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES PARA EL EMPLEO DE SISTEMAS FLEXIBLES DE ALTA RESISTENCIA EN LA CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS”

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

AUTOR:

LUGO ALVAREZ, EMEL DIEGO

ASESOR:

ING. AYBAR ARRIOLA, GUSTAVO ADOLFO

JURADO:

DR. RAMOS FLORES, MIGUEL ANGEL

DR. RAMOS MEDRANO, FILIBERTO DEMETRIO

DR. CANCHO ZÚÑIGA, GERARDO ENRIQUE

ING. ULLOA LLERENA, BEDER FELIPE

LIMA - PERÚ
2018

DEDICATORIA

A Dios todo poderoso y a mis padres por ser parte importante en el desarrollo académico y profesional de mi vida.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, primeramente, por ser mi guía y dueño de mi confianza. Sé que las cosas que he logrado y voy logrando es gracias a Él, pues apartados de su camino nada podemos hacer.

A mis padres, Serafín Lugo e Hilaria Álvarez por su constante apoyo no solo económico sino también moral y por darme la motivación a ser alguien en la vida, con sus consejos y buenos valores, cosas que me ayudaron a cumplir objetivos en mi vida.

A mi familia en general y en especial a mis hermanos mayores quienes de una u otra forma me apoyaron también en mis estudios y en mi estadía en la ciudad de Lima.

A mi novia, Abigail Carlier, quien fue mi apoyo incondicional a través de los años en que estuve estudiando y trabajando.

A los docentes en general de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional Federico Villarreal, por sus enseñanzas y doctrina empresarial que nos inculcan en la facultad.

RESUMEN

En este documento de investigación se presenta los diferentes métodos que han sido desarrollados para el análisis de la estabilidad de pendientes, centrándose en dos, principalmente, el método de Janbu y el método de Spencer. Estos métodos en su combinación logran que se realice un estudio completo que aborde todos los factores que causan y/o propician la inestabilidad en los taludes. De este modo, para resolver el problema, obtendremos a través de los métodos de análisis mencionados, el grado de estabilidad más certero indicado por el factor de seguridad que resulte del análisis del terreno en estudio.

Se hace énfasis en estos dos métodos de análisis por lo siguiente: El método Janbu por ser uno de los métodos que al igual que el método de Bishop toma en cuenta primordialmente los efectos del agua en su análisis; y el método de Spencer por ser un método que actualmente es el más usado para estudios de estabilidad de taludes, por ser un método que rigurosamente satisface el equilibrio estático de fuerzas y momentos en su análisis. Ambos métodos son aplicables a taludes y/o laderas con cualquier forma de superficie de falla.

El presente documento presenta adicionalmente, luego del estudio adecuado y de la determinación del grado de estabilidad del talud con los métodos de análisis mencionados, el desarrollo y aplicación de Sistemas Flexibles de estabilización que es el siguiente paso luego de un análisis del terreno (talud) y que demanda de trabajos insitu a través de mallas especiales en las zonas con taludes inestables o con bajo factor de seguridad hallado.

Palabras Clave: Estabilidad de taludes, métodos de análisis, sistemas de estabilización.

ABSTRACT

This research paper presents the different methods that have been developed for the analysis of slope stability, focusing on two, mainly, the Janbu method and the Spencer method. These methods in their combination will achieve a complete study that addresses all the factors that cause and / or cause instability in the slopes. In this way, to solve the problem, we will obtain through the aforementioned methods of analysis, the degree of stability more accurate indicated by the safety factor that results from the analysis of the land under study.

Emphasis is placed on these two methods of analysis for the following: The Janbu method as one of the methods that, like the Bishop method, takes into account primarily the effects of water in its analysis; and the method of Spencer for being a method that is currently the most used for studies of stability of slopes, for being a method that rigorously satisfies the static balance of forces and moments in its analysis. Both methods are applicable to slopes and / or slopes with any form of fault surface.

The present document presents, after the adequate study and the determination of the stability degree of the slope with the methods of analysis mentioned, the development and application of Flexible Stabilization Systems that is the next step after a terrain analysis (slope) and that demand of works insitu through special meshes in the zones with unstable slopes or with low found security factor.

Keywords: Stability of slopes, analysis methods, stabilization systems.

INTRODUCCION

El mundo de la ingeniería de la construcción avanza día a día y se van dando modernos desarrollos de las actuales vías de comunicación, tales como carreteras, ferrocarriles y canales.

Es así que el estudio y la estabilidad de taludes, es y continuará siendo un tema muy importante en la ingeniería geotécnica. Entonces esto nos conlleva a que se tienen que hacer un adecuado estudio y análisis del terreno o zona donde se proyecta la construcción de una carretera u obra como la ampliación de carreteras para asfaltado.

La importancia del análisis de la estabilidad de pendientes, antes del empleo de sistemas de estabilización, debe ser orientada enfocando esfuerzos a tender los procesos que controlan la inclinación, desarrollo y desencadenamiento de inestabilidades en las laderas y taludes.

Luego de contar con el grado de estabilidad que presenta determinada zona a través de la combinación de métodos de análisis como los métodos de análisis Janbu y Spencer, el profesional de ingeniería estará en la posibilidad de proponer un adecuado sistema de estabilización para el terreno en cuestión a fin de estabilizar los taludes y/o laderas con factor de seguridad mínimas, lo cual indica que nos encontramos en un terreno con altos índices de inestabilidad.

La presente tesis ha tomado los datos de muestras de la obra en ejecución “Ampliación y asfaltado de la carretera Paucartambo – Carhuamayo”, distritos ubicados en las regiones de Pasco y Junín, respectivamente.

También la tesis muestra a detalle los métodos de análisis a combinar, método de Janbu y método de Spencer, a fin de trabajar con un método de análisis completo

que aborde los principales factores que causan la inestabilidad. Así mismo luego de determinar el grado de estabilidad que presenta el terreno en estudio se propone el uso de un sistema flexible de estabilización para contrarrestar, si lo hubiera, la amenaza de inestabilidad del lugar siendo una alternativa ante la construcción de muros contención (de concreto, netamente), tomando como ventaja su flexibilidad en mallas o material requerido. Además desde el punto de vista estético encaja con el entorno de la naturaleza ya que facilita la revegetación, convirtiendo la zona en paisaje de vista agradable con un bajo impacto ambiental.

ÍNDICE

INTRODUCCION.....	7
--------------------------	----------

CAPITULO I: GENERALIDADES

1.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN.....	13
1.2 FORMULACIÓN NOMINAL DEL PROBLEMA.....	14
1.3 JUSTIFICACION E IMPORTANCIA.....	15
1.4 LIMITACIONES.....	15
1.5 OBJETIVOS.....	16
1.5.1 OBJETIVOS GENERALES.....	16
1.5.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	17
1.6 HIPÓTESIS.....	18
1.7 VARIABLES INDEPENDIENTE, DEPENDIENTE E INTERVINIENTES.....	19

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

2.1 CONCEPTOS GENERALES Y DEFINICIONES.....	20
2.2 ESTABILIDAD DE TALUDES.....	23
2.2.1 TALUD.....	24
2.2.2 DESLIZAMIENTO.....	31
2.2.2.1 CAUSAS DE LOS DESLIZAMIENTOS.....	31
2.2.3 FACTORES QUE CONDICIONAN LA ESTABILIDAD.....	32
2.2.4 TIPOS DE FALLA.....	38
2.2.4.1 FALLA POR DESLIZAMIENTO SUPERFICIAL.....	38
2.2.4.2 FALLA POR ROTACIÓN.....	39
2.2.4.3 FALLA LOCAL.....	39
2.2.4.4 FALLA DE PIE.....	40
2.2.4.5 FALLA DE BASE.....	40
2.2.4.6 FALLA POR TRASLACIÓN.....	41
2.2.4.7 FALLA POR FLUJO.....	42
2.2.4.8 FALLA POR LICUACIÓN.....	42

2.2.5 ALGUNOS MÉTODOS PARA MEJORAR LA ESTABILIDAD DE TALUDES	42
2.2.5.1 TENDER TALUDES.....	42
2.2.5.2 EMPLEO DE BERMAS LATERALES O FRONTALES.....	43
2.2.5.3 EMPLEO DE MATERIALES LIGEROS.....	43
2.2.5.4 CONSOLIDACIÓN PREVIA DE SUELOS COMPRESIBLES.....	43
2.2.5.5 EMPLEO DE MATERIALES ESTABILIZANTES.....	43
2.2.5.6 EMPLEO DE MUROS DE RETENCIÓN.....	43
2.2.5.7 PRECAUCIONES DE DRENAJE.....	44
2.2.6 RESISTENCIA AL ESFUERZO CORTANTE.....	44
2.2.6.1 PARÁMETROS FUNDAMENTALES.....	45
2.2.6.2 ECUACIÓN DE FALLA DE COULOMB (1776).....	46
2.2.7 MODELO DE ADMINISTRACION EN TALUDES.....	48

CAPÍTULO III: ANÁLISIS DE ESTABILIDAD

3.1 INTRODUCCIÓN.....	49
3.2 HERRAMIENTAS DISPONIBLES.....	50
3.3 METODOLOGÍAS PARA EL ANALISIS DE LA ESTABILIDAD.....	51
3.3.1 CARACTERÍSTICAS DEL ANÁLISIS DE LÍMITE DE EQUILIBRIO.....	51
3.4 FACTOR DE SEGURIDAD.....	52
3.5 SUPERFICIE DE FALLA.....	52
3.5.1 FORMAS DE LA SUPERFICIE DE FALLA.....	53
3.6 PARÁMETROS UTILIZADOS EN LOS ANÁLISIS DE LÍMITE DE EQUILIBRIO.....	55
3.6.1 PESOS UNITARIOS.....	55
3.6.2 RESISTENCIA AL CORTANTE.....	55
3.7 ANÁLISIS BIDIMENSIONAL.....	55
3.8 MÉTODOS DE EQUILIBRIO LÍMITE.....	56
3.8.1 ANÁLISIS Y FORMULACIÓN DEL F.S. POR EL CRITERIO “REBANADAS” ...	57
3.8.2 MÉTODO DE ANÁLISIS DE JANBÚ.....	61
3.8.2.1 EFECTO DEL AGUA.....	63
3.8.2.2 TABLAS DE JANBÚ.....	65
3.8.3 MÉTODO DE ANÁLISIS DE SPENCER.....	65
3.8.3.1 DIFERENCIAS CON OTROS MÉTODOS.....	66

3.8.3.2 ANÁLISIS PARA EL CÁLCULO DEL FACTOR DE SEGURIDAD PARA ESTABILIDAD DE TALUDES.....	66
3.8.3.3 HIPÓTESIS BÁSICAS QUE CONSIDERA SPENCER.....	66
3.8.3.4 DEDUCCIÓN DE FÓRMULAS EN FUNCIÓN A LA HIPÓTESIS DE SPENCER	67

CAPITULO IV: ESTABILIDAD DE TALUDES EN LA OBRA “AMPLIACIÓN Y ASFALTADO DE LA CARRETERA PAUCARTAMBO – CARHUAMAYO”

4.1 ASPECTOS GENERALES.....	71
4.1.1 OBJETIVO.....	71
4.1.2 UBICACIÓN Y ACCESO	71
4.2 CONTEXTO GEOLÓGICO	72
4.2.1 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL.....	72
4.3 GEOLOGÍA DE LA CARRETERA CARHUAMAYO - PAUCARTAMBO	76
4.3.1 ESTRATIGRAFÍA.....	76
4.3.1.1 DEPÓSITOS MORRÉNICOS	77
4.3.1.2 GRUPO PUCARÁ.....	77
4.3.1.3 GRUPO MITU.....	78
4.3.1.4 ROCAS INTRUSIVAS.....	78
4.4 ASPECTOS GEODINÁMICOS	79
4.4.1 GEODINÁMICA EXTERNA	80
4.4.1.1 CREEP	80
4.4.1.2 DESLIZAMIENTOS.....	81
4.5 GEOTECNIA DEL PROYECTO	82
4.5.1 TIPOLOGÍA DE SUELOS	82
4.5.2 ESTABILIDAD DE TALUDES	83
4.6 ESTRUCTURAS DE RETENCIÓN	91

CAPÍTULO V: ASPECTOS COMPUTACIONALES

5.1 INTRODUCCIÓN.....	93
5.2 EXPLICACIÓN DEL PROGRAMA GEO-SLOPE/W	94

CAPÍTULO VI: SISTEMAS DE ESTABILIZACIÓN

6.1 INTRODUCCIÓN.....	102
6.2 CRITERIOS A TENER EN CUENTA.....	103
6.3 SOLUCIONES DE TIPO ESTRUCTURAL	104
6.4 SOLUCIONES DE BIOINGENIERÍA.....	106
6.5 SISTEMA FLEXIBLE DE ALTA RESISTENCIA	108
6.5.1 SISTEMAS FLEXIBLES DE ESTABILIZACIÓN TDM GRUPO	109
6.5.2 GAMA DE SISTEMAS FLEXIBLES DE ESTABILIZACIÓN DE TALUDES.....	109
CONCLUSIONES	111
RECOMENDACIONES	112
BIBLIOGRAFÍA	113
ANEXOS	116
□ ANEXO N° 1.- FOTOGRAFÍAS DE LOS TRABAJOS DE OBRA.....	117
□ ANEXO N° 2.- TABLAS/ÁBACOS DE JANBU.....	121

CAPITULO I

GENERALIDADES

1.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

Anteriormente se han realizado investigaciones relacionadas a estabilidad de taludes y se han desarrollado tesis para doctorados que ahondan en la comprensión de los factores causantes de inestabilidad en taludes de zonas donde se proyecta construir y/o ampliar carreteras con fines de asfaltado. También se han estudiado varios sistemas de estabilización comprendidas desde sistemas de mallas metálicas hasta muros de contención de concreto armado.

En el Perú se han realizado muchas obras de construcción de carreteras y se han hecho evaluaciones mínimas o nulas de estabilidad de taludes a través de métodos de análisis en las carreteras previo al empleo de determinado sistema de estabilización y sencillamente de manera “práctica” se ha procedido a la puesta de sistemas de estabilización en zonas donde se realizaron obras de construcción vial (carreteras, ampliación para asfaltado, etc.).

Algunas de las obras ejecutadas han sido Las Pirias-Cruce, región Lambayeque; Diseño y Construcción de sistema de estabilización de Talud correa Overland-Las Bambas, región Apurímac; entre otras obras.

Las obras de ingeniería civil en la rama de carreteras han ido aumentando año tras año, pues la necesidad de conectar pueblos y ciudades se hace necesario e importante para el desarrollo y progreso de la sociedad actual.

Se han construido nuevas carreteras y otras ya existentes se han mejorado, esto con asfaltado y/o pavimentación, pero en ambos casos muchas veces se ha dejado de lado el estudio previo adecuado del lugar por donde pasará la carretera, nos

referimos específicamente al estudio de los taludes. Y para la correcta ejecución de obras se hace necesario el uso de métodos de análisis de cálculo de estabilidad de taludes, para determinar el factor de seguridad que nos ofrece dicha zona a construir. Cosa que en el pasado y años atrás no se ha tomado con la seriedad del caso.

1.2 FORMULACIÓN NOMINAL DEL PROBLEMA

En obras de ingeniería, el talud constituye la estructura más compleja de las vías terrestres; antes, durante y después de la construcción de carreteras. Y como tal se debe tener especial cuidado en las zonas donde se trabajará en cuanto a la estabilidad de taludes, pues ésta se mantiene principalmente por el balance entre la resistencia cortante del terreno y la fuerza deslizante de gravedad del talud.

Sin embargo, la estabilidad de un talud está influenciada grandemente por (1) disminución en la resistencia del terreno por infiltración de agua en el terreno o lluvia fuerte, (2) cambios en el balance de gravedad debido a cortes artificiales y rellenos, (3) aumento en la presión de poros debido a lluvia fuerte o movimiento del agua freática o (4) aumento en la aceleración de la gravedad debido a sismos.

Cuando se habla de estabilidad de taludes es primordial mencionar que antes de emplear un sistema de estabilización a través de mallas metálicas u otros sistemas, se hace necesario e indispensable el empleo de métodos de análisis de estabilidad para el cálculo del factor de seguridad y para calcular la forma en que ocurren los deslizamientos, y así poder prevenirlos.

De esta manera las obras de ingeniería en cuanto a la construcción de carreteras se refieren, tendrán datos certeros para su ejecución y posteriormente se logrará la eficacia de dicha obra para satisfacción tanto de los usuarios y pobladores de zonas aledañas, como para los profesionales en ingeniería civil que participaron en su ejecución.

1.3 JUSTIFICACION E IMPORTANCIA

A medida que el tiempo pasa y las construcciones, de carreteras en este caso, van adquiriendo modernas técnicas. En tal sentido la geotecnia desempeña un papel importante donde se hace frecuente estar ante el problema de realizar un análisis correcto que nos ayude a obtener un valor de estabilidad de taludes correcto, por lo que es necesario determinar los detalles geométricos del talud, factores de seguridad por medio de los métodos de análisis(cálculo) y las propiedades mecánicas del suelo donde se localizará esta estructura(carretera), ya que también debemos establecer el tipo de mecanismo de falla que más se adecúe para la determinación de la estabilidad del talud o ladera en cuestión.

Un aspecto también a tomar en cuenta es el tema económico, ya que, los taludes son a la fecha de suma importancia ingenieril, y es por esto que requieren de un estricto y minucioso análisis.

1.4 LIMITACIONES

En obras lineales de ingeniería y principalmente cuando hablamos de construcción de carreteras; nos encontramos con las primeras limitaciones y las hallamos en el momento de estudio y análisis, pues es aquí donde se aprecian como parte de información necesaria los factores matemáticos y la modelación matemática de los suelos/rocas que componen el talud o ladera en cuestión. Otro de los factores determinantes y que en muchas ocasiones ha influido bastante es la naturaleza del terreno o zona en estudio, tales como su geología, su topografía, tipo de relieve entre otros. Pero para los cuales existen Métodos de análisis probados y recomendados que resuelven y toman cada factor limitante y hacen un análisis y estudio a profundidad con el fin de obtener los factores de seguridad para la estabilidad del suelo del talud.

Y es justamente en las metodologías o métodos de análisis de estabilidad donde se encuentran las primeras limitaciones para su correcto estudio y aplicación. Estas limitaciones están relacionadas netamente al uso y/o empleo de determinados métodos de análisis; y las representan, por ejemplo la topografía del terreno, entre otros.

En síntesis, se podría decir que las limitaciones para lograr la estabilización de taludes y/o ladera están regidas básicamente por condiciones geográficas y naturales, como lo son la geología y la topografía del lugar donde se proyecta ejecutar una obra de construcción vial (carreteras). Pero cabe señalar que en los últimos años ya se cuentan con métodos de análisis y cálculo desarrollados para contrarrestar las inconveniencias que presente la zona en estudio. Y es justamente parte de esta investigación dar énfasis a dos métodos de análisis: Janbu y Spencer, los cuales en su combinación nos permitirán abordar las limitaciones frecuentes en estabilización de taludes y se logrará obtener un correcto estudio para proceder a utilizar sistemas de estabilización adecuadas para cada lugar.

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 OBJETIVOS GENERALES

¿Qué pretendo obtener con los resultados de mi investigación?

- a)** Lograr que en la construcción de carreteras en el Perú en zonas con taludes y laderas inestables se emplee métodos de análisis para luego recién usar determinado sistema de estabilización.
- b)** Establecer los métodos de análisis adecuados para saber el grado de inestabilidad de taludes y ladera por donde se proyecta la construcción de una vía (carretera).

- c) Proponer el uso de un sistema flexible de alta resistencia para la estabilización de las laderas y taludes existentes en la zona donde se construirá la carretera, post a un estudio con métodos de análisis del lugar.

¿Qué hare con los resultados de mi investigación?

- a) Fomentar la construcción de más carreteras, pero con estudios previos de la zona en cuestión mediante métodos de análisis de estabilidad para tener seguridad y eficacia de la obra.
- b) Incentivar a los gobiernos central, regional y local la construcción de más vías de acceso a los lugares que no cuentan con carreteras por las condiciones de inestabilidad del lugar con el fin de lograr la integración de pueblos y propiciar su desarrollo.

1.5.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

¿Qué logros previos debo alcanzar para apoyar a cada uno de los objetivos generales?

- a) Realizar estudios minuciosos a nivel geológico y geográfico determinando todos los factores influyentes en la inestabilidad del suelo de la zona por donde se construirá la carretera.
- b) Proponer la combinación de métodos de análisis (Janbu-Spencer) a fin de realizar estudios que aborden todos los factores que propician la inestabilidad de los suelos de la zona.
- c) Determinar los tipos y causas de las fallas más comunes que suelen presentarse en el campo, para desarrollar así la mejor solución posible en la estabilización de taludes pues a partir de ello también se formara un criterio más amplio y correcto para definir las posibles

soluciones a emplear sin descuidar tanto el criterio teórico como el económico que son partes vitales de cualquier obra de infraestructura civil.

- d) Utilizar el programa Geo-Slope para saber el grado de inestabilidad de los taludes de la zona por donde se construirá la carretera.

1.6 HIPÓTESIS

a) Por relación causa-efecto

- El correcto análisis y estudios de suelos para la estabilización de taludes con métodos de cálculo adecuados cuando se proyecta la construcción de carreteras, evitará futuras complicaciones, así como problemas de derrumbes y/o deslizamientos de suelos que provoquen ineficacias y encarecimiento de la obra.
- El necesario Análisis de estabilidad de taludes a través de Métodos de Cálculo, permitirá obtener y contar con parámetros más precisos, que ayudaran al correcto diseño de sistemas de estabilización y reducirán efectos económicos en el caso de producirse deficiencias en la obra ejecutada.

b) Por condición antecedente-consecuente

Si, se tiene estudios adecuados de suelo mediante la combinación de métodos de análisis, tal como los métodos Janbu y Spencer, que aborden todos los factores causantes de inestabilidad, entonces se logrará la construcción de carreteras con la seguridad que se requiere al tener taludes estabilizados.

1.7 VARIABLES INDEPENDIENTE, DEPENDIENTE E INTERVINIENTES.

a) Variables Independientes

- El correcto análisis y estudios de suelos para la estabilización de taludes.
- Análisis de estabilidad de taludes.
- Estudios adecuados de suelo mediante la combinación de métodos de análisis.

b) Variables Dependientes

- Futuras complicaciones, ineficacias y encarecimiento de la obra.
- Parámetros más seguros.
- Construcción de carreteras con la seguridad que se requiere.

c) Variables Intervinientes

- Construcción de carreteras.
- Sistemas de estabilización y técnicas de mitigación.
- Taludes estabilizados.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

2.1 CONCEPTOS GENERALES Y DEFINICIONES

- **Talud.** - Cualquier superficie inclinada respecto a la horizontal, que haya de adoptar la estructura de la tierra bien en forma natural o como consecuencia de la intervención humana en una obra de ingeniería, se dividen en taludes naturales(laderas) o artificiales (cortes y terraplenes).

- **Geomorfología.** - Rama de la geografía física que tiene como objeto el estudio de las formas de la superficie terrestre enfocado a descubrir, entender su génesis y entender su actual comportamiento. Uno de los modelos geomorfológicos explica que las formas de la superficie terrestre es el resultado de un balance dinámico que evoluciona en el tiempo entre procesos constructivos y destructivos.

- **Riesgo.** - Pérdida social o económica promedio anual debido a la ocurrencia de todos los eventos posibles que pueden causar daño. El riesgo anual para una obra existente, en la que hay estadísticas sobre pérdidas del pasado, puede calcularse como la pérdida esperada o promedio multianual de pérdidas. Para un diseño, o para el desarrollo de medidas correctivas, el riesgo anual puede calcularse, determinando primero la amenaza o frecuencia de distintos niveles de lluvias, y luego promediando valores de vulnerabilidad con las respectivas frecuencias de ocurrencia de todas las lluvias.

- **Acantilado.** - Pendiente escarpada que retrocede o es erosionada por efecto de las olas marinas, corrientes fluviales u otros elementos relativos a la intemperie.

Calicata es una excavación superficial en el suelo de determinado punto de estudio a fin de observar los estratos del suelo mencionado según se vaya incrementando la profundidad de excavación. Es un estudio de suelo previo a la construcción de estructuras viales y carreteras. Mientras que la **Superficie de Falla** es referida a todo un bloque de suelo, que por composición o efectos externos tienden a un deslizamiento.(Ministerio de Transportes y Comunicaciones[MTC], 2008).

- **Subsidencia.** - Asentamiento súbito (colapso), o relativamente continuo con el tiempo, de la superficie del terreno. Envuelve generalmente grandes áreas y no, por ejemplo, el asentamiento de un terraplén o de una sola edificación.
- **Erosión.** - Remoción (desprendimiento) de granos individuales o grumos de partículas de suelo y transporte de los mismos después del desprendimiento.
- **Corrimientos.** - Movimientos de masa de suelo o roca, fundamentalmente por la acción de la gravedad en materiales de laderas o taludes de un modo general. Los corrimientos son clasificados de la siguiente manera: caídas, volcaduras, flujos, deslizamientos.

Ludeña (2014), señala que:

Factor de Seguridad. - Se define como la división entre las condiciones reales que presenta un talud y las condiciones que podrían ocasionar la falla. También es definida como el cociente de la cohesión del terreno o el ángulo de rozamiento del talud actual y cohesión o ángulo de fricción del talud requerido para mantener el talud estable.

- **Cohesión.** - La cohesión del terreno es la cualidad por la cual las partículas del terreno se mantienen unidas en virtud de fuerzas internas, que dependen, entre otras cosas, del número de puntos de contacto que cada partícula tiene con sus vecinas. En consecuencia, la cohesión es mayor cuanto más finas son las partículas del terreno. La cohesión se mide kg/cm^2 . Los suelos arcillosos tienen cohesión alta de $0,25 \text{ kg/cm}^2$ a 1.5 kg/cm^2 , o más. Los suelos limosos tienen muy poca, y en las arenas la cohesión es prácticamente nula.
- **Fricción interna.** - Es la resistencia al deslizamiento causado por la fricción que hay entre las superficies de contacto de las partículas y de su densidad. Como los suelos granulares tienen superficies de contacto mayores y sus partículas, especialmente si son angulares, presentan una buena trabazón, tendrán fricciones internas altas. En cambio, los suelos finos las tendrán bajas.
- **Ángulo de rozamiento interno.** - La fricción interna de un suelo, está definida por el ángulo cuya tangente es la relación entre la fuerza que resiste el deslizamiento, a lo largo de un plano, y la fuerza normal "p" aplicada a dicho plano. Es un ángulo de reposo o máximo ángulo posible para la pendiente de un conjunto de material granular.
- **Capacidad Portante.** - Valor soporte, es la resistencia del suelo a la acción de las cargas o su capacidad para resistir cargas. Significa conferir al suelo la capacidad de resistir las cargas exteriores que se le aplican sin que produzcan fallas como rotura o deformaciones excesivas.
- **Sistema de Estabilización.** - Materiales para la estabilización de taludes de cualquier tipo de terreno y pendiente, con inestabilidades y movimientos importantes con requerimientos de soporte medio-altos. Es concebido para terreno en taludes con pendiente moderada o riesgosa, paredes rocosas

globalmente estables con importante fracturación superficial, material rocoso alterado con pendiente media y para todo tipo de terreno con requerimiento de soporte.

- **Geo-Slope.** - Programa usado para la modelación geotécnica y geo ambiental, lo suficientemente amplia como para manejar todas sus necesidades de modelado de taludes donde se quiera realizar los análisis a través de métodos de cálculo.

2.2 ESTABILIDAD DE TALUDES

Al momento de llevar a cabo un proyecto o de ejecutar una obra de construcción, como lo es el de la construcción de carreteras; es aquí cuando se vienen a tallar aspectos fundamentales como lo son la ingeniería geotécnica y la ingeniería geológica.

La inestabilidad del talud o ladera presente en la zona en estudio/proyecto se pueden dar por razones geológicas, variaciones del nivel freático o por rellenos o excavaciones ocasionados por obras pasadas.

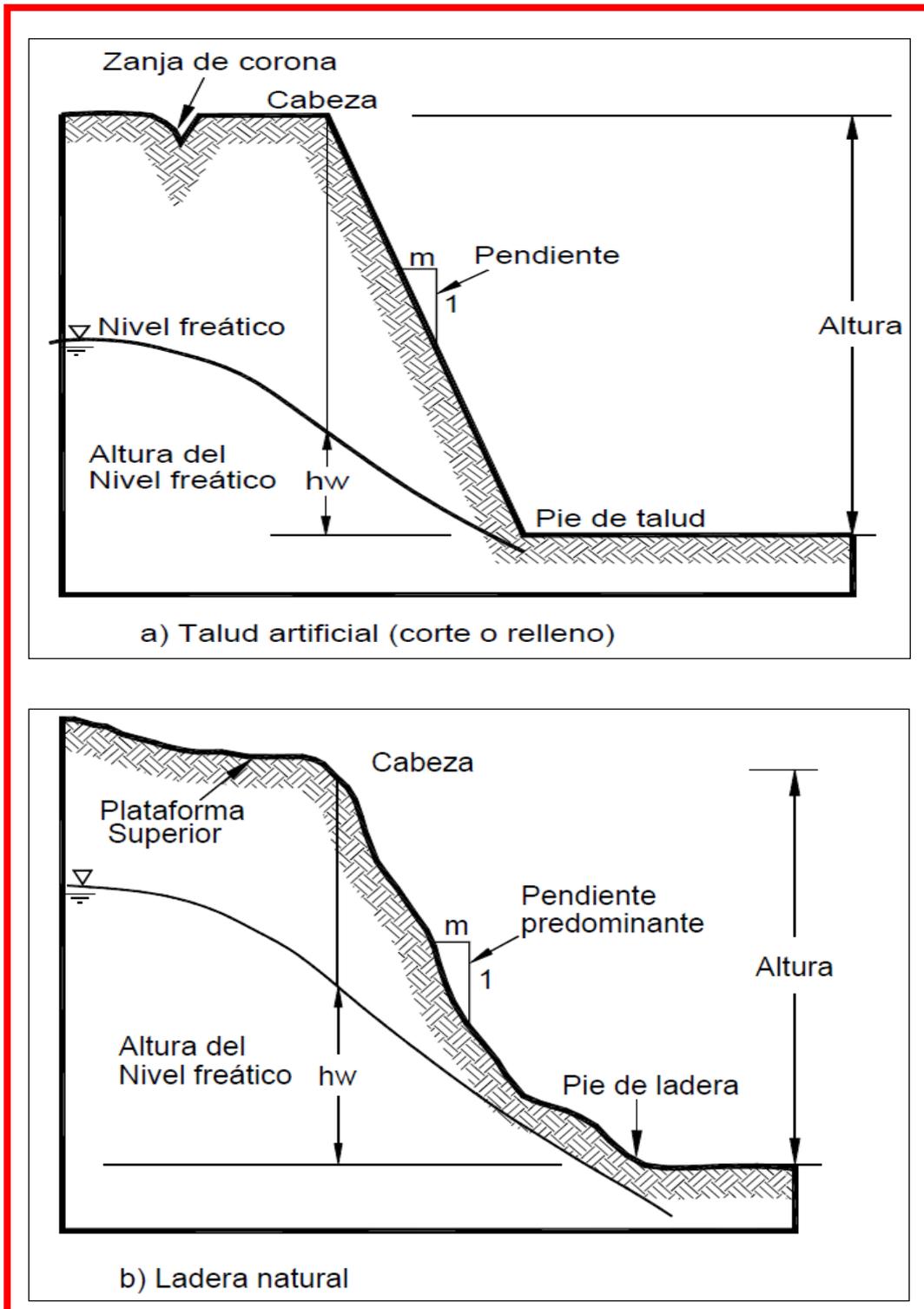
La estabilidad de un talud dependerá, también, del material del que esté compuesto éste y de su resistencia ante empujes que por gravedad y presión presentan.

2.2.1 TALUD

En forma concisa entendemos por “talud” a una ladera conformada por fragmentos de roca o por estratos de suelo acumulados en forma compacta. Las hallamos por lo general como parte de los relieves y morfologías de diferentes zonas como son montañas, cuencas de valles, y son pues los taludes el punto esencial a estudiar en las obras de ingeniería vial como lo es la construcción de carreteras.

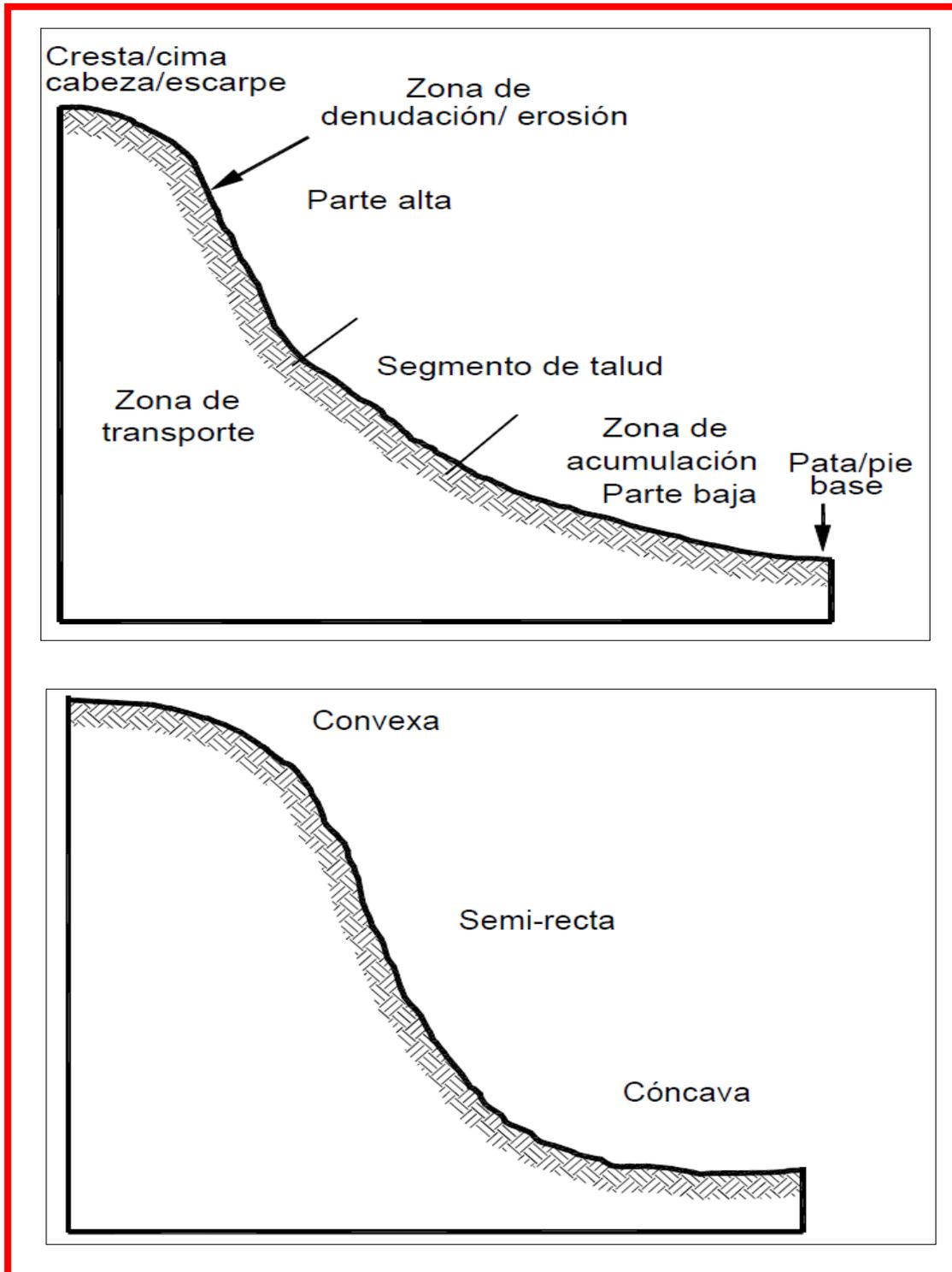
Todo talud, según la Geotecnia, tiene en su estructura las siguientes partes: Base, cabeza o cima, altura, altura de nivel freático y pendiente.

Fig. Nomenclatura de Taludes y Laderas



Fuente: MTC.

Fig. Partes generales de un talud o ladera.



Fuente: MTC

a) Mecanismo de falla de un talud

Morales (2000), señala que:

La falla de un talud excavado en una masa rocosa, ocurre generalmente a lo largo de un plano de debilidad siguiendo rasgos estructurales definidos como discontinuidades. Considerando un bloque de masa (ver figura) que buza en dirección de la pendiente del talud y conociendo los parámetros que rigen el plano de deslizamiento (B), podemos evaluar la tendencia a deslizarse. Este problema se resuelve por equilibrio estático del bloque. Mediante métodos conocidos encontramos el peso del bloque (W), que en el plano de deslizamiento (B) se descompone en una fuerza normal (C) y una tangencial (T); además de fuerzas determinadas en la roca son: el ángulo de rozamiento ϕ y la cohesión c entre superficies de la figura se desprende que:

$$C = w \cos \beta \quad (I)$$

$$T = W \operatorname{sen} \beta \quad (II)$$

La fuerza resistente en el plano R será:

$$R = c + C \operatorname{Tg} \phi \quad (III)$$

Donde:

ϕ = ángulo de rozamiento

c = cohesión

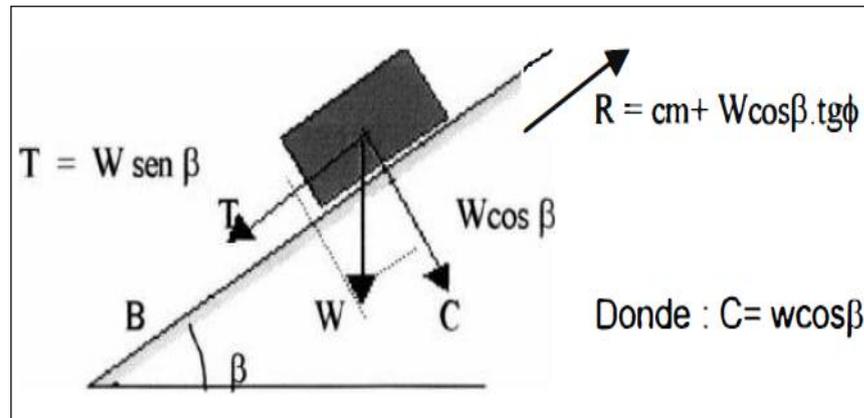


Fig. Mecánica de falla de un talud. Fuente: Elaboración Propia.

Morales (2000), señala que:

W = Peso del bloque; T = Fuerza que tiende a arrastrar el bloque.

R = Resistencia debido a la fricción entre el bloque y el plano inclinado.

Entonces, si $T < R$ el bloque será estable; Si $T > R$ el deslizamiento desprendimiento será eminente. La seguridad del bloque F_s es determinada por la relación de la fuerza resistente(R), con la fuerza de arrastre o empuje (r) es decir:

$$F_s = \frac{\text{Fuerza total que impide el deslizamiento}}{\text{Fuerza total que induce el deslizamiento}} = \frac{R}{r}$$

$$F_s = \frac{c + W \cos \beta \cdot \text{tg } \phi}{W \text{ sen } \beta} \quad \text{(IV)} \quad \text{Si no existe cohesión}(c=0) \text{ se tendrá:}$$

$$F_s = \frac{\text{tg } \phi}{\text{tg } \beta} \quad \text{(V)} \quad \text{La ecuación (V) indica que el punto crítico de}$$

deslizamiento $\phi = \beta$, es decir, la inclinación del plano de deslizamiento debe ser igual al ángulo de rozamiento. Si $\beta > \phi$ el movimiento es eminente. De este hecho se desprende que: Si c es igual a 0 y $\beta = \phi$ no hay deslizamiento y se necesita una mayor pendiente del plano de deslizamiento para producir el deslizamiento.

b) Esfuerzos actuantes en los taludes

Esfuerzos actuantes en los taludes	
Determinantes que originan incrementos de los esfuerzos dentro de los taludes	Determinantes que originan disminución de la resistencia del suelo en los taludes
<ul style="list-style-type: none">• Sobrecargas aplicadas en el terreno.• Aumento del peso del material por incremento de humedad.• Filtración de subterráneas.• Erosión de los estratos profundos del subsuelo.• Impactos producidos por sismos.• Socavaciones producidas por perforaciones cercanas.	<ul style="list-style-type: none">• Expansión o retracción de la arcilla por causa del agua o cambios de temperatura.• Deterioro del material cementante.• Destrucción de la estructura interna de suelo por vibración o actividad sísmica.• Pérdida de la tensión capilar por desecación.

Fuente: MTC.

c) Factor de seguridad

La relación entre fuerzas actuantes y fuerzas resistentes, en un talud, es la que define el factor de seguridad del mismo. La condición de equilibrio mínima considerada es un factor de seguridad igual a uno (F.S.=1).

Esto significa que las fuerzas o esfuerzos resistentes serán iguales a las fuerzas actuantes. A su vez, se considera que la altura crítica del talud se alcanza bajo ese mismo valor.

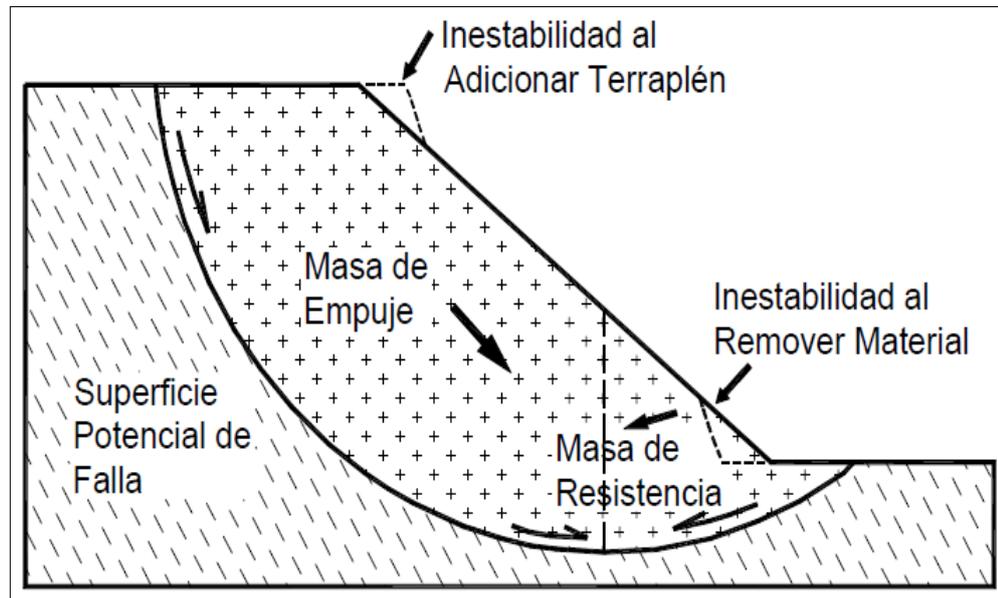


Fig. Equilibrio o desequilibrio de fuerzas en un talud. Fuente: MTC.

Las superficies de falla y superficies críticas de los taludes son definidos por el factor de seguridad, mientras que las superficies críticas de deslizamiento son aquellas que poseen el menor factor de seguridad entre todas las demás.

En la siguiente tabla se muestran algunos valores del factor de seguridad, así como comentarios sobre la estabilidad que genera en la estructura de suelo dicho factor:

Valores que determinan la estabilidad de un talud	
Factor de seguridad	Estabilidad
< 1	Inestable
1 – 1,20	Estabilidad cuestionable
1,20 – 1,50	Estable bajo condiciones estáticas
> 1,50	Estable bajo condiciones dinámicas

Fuente: MTC.

2.2.2 DESLIZAMIENTO

En forma clara y breve se puede entender que un deslizamiento es aquel fenómeno que conlleva gran volumen de masa de tierra (en movimiento), esto causado por la inestabilidad del suelo de determinada zona o en su defecto por la acción de la naturaleza tales como los sismos que remueven grandes masas de tierra.

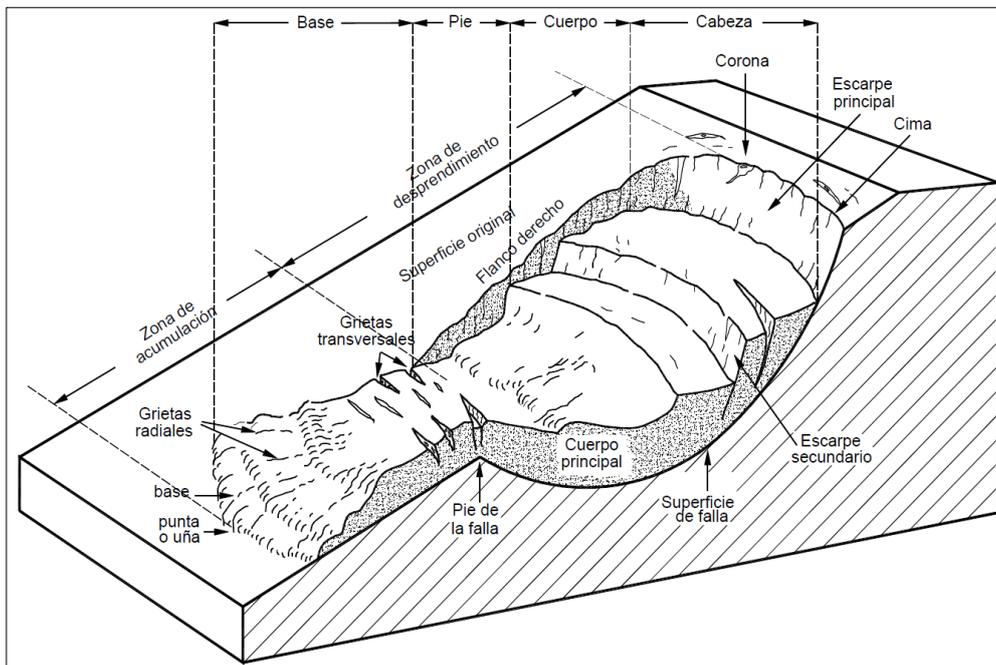


Fig. Nomenclatura de las diferentes partes que conforman un deslizamiento. Fuente: MTC.

2.2.2.1 Causas de los deslizamientos

En un proyecto de construcción de carreteras, si bien es cierto que se tomarán zonas que comprenden taludes para realizar el debido estudio y análisis insitu, también es aquí donde se inician a evaluar los posibles deslizamientos de masa de suelo, roca u otro que componen la estructura de un talud y en ocasiones ser testigos de éste evento.

Estos episodios se pueden dar por la acumulación de movimientos a que son sometidos los suelos de los taludes por acción de la naturaleza, o también por el estado geológico de la zona en estudio o proyecto.

Existen varios factores, en realidad, que propician estos eventos de deslizamientos de pequeñas y grandes volúmenes de masa de material que componen la estructura de los taludes y/o las colinas.

Esta inestabilidad que muestran determinadas zonas suelen ocurrir cuando las fuerzas de la resistencia a la cortante son menores y no son capaz de resistir o contrarrestar las fuerzas que tienden a empujar a lo largo de la superficie de determinado talud, y que son ocasionados por efectos de gravedad (peso propio), tensiones tectónicas, actividad sísmica, etc., propios de la naturaleza.

Cualquier talud, así se haya mantenido estable por mucho tiempo, puede fallar debido a lo siguiente:

- Movimientos de las placas terrestres internas (actividad sísmica).
- Incremento del esfuerzo cortante.
- Infiltración de agua por acción de las lluvias.
- Incremento de la presión de poros en el suelo que comprende la estructura del talud.
- Expansión de material muy plástico tal como la arcilla, por baja permeabilidad de éste.
- Generación de planos de deslizamientos.
- Intemperismo o meteorización(descomposición de minerales y rocas que ocurre sobre o cerca de la superficie terrestre)
- Trabajos de excavación en la parte baja del talud(la base)

2.2.3 FACTORES QUE CONDICIONAN LA ESTABILIDAD

Morales (2000), señala que:

Existen una serie de factores que que afecta y condicionan la estabilidad del suelo que compone la estructura de un talud. Y dentro de estos factores se hallan los sismos de gran intensidad que también por sus acciones dinámicas influyen considerablemente en un eventual deslizamiento del cuerpo del talud o ladera.

Pero es necesario mencionar que si luego de un análisis profundo y correcto mediante el empleo de un método, nos resulta un factor de seguridad grande, mayor a 1, entonces existen bajas probabilidades de que en la zona de proyecto ocurran deslizamientos.

Es decir que según vaya decreciendo el valor del factor de seguridad del suelo de determinada zona, las probabilidades de falla y deslizamiento aumentan. Hay un punto medio, donde el factor de seguridad es igual a 1, el cual indica un punto de equilibrio pero que podría ser alterado en eventuales movimientos de masa terrestre (sismos).

Entonces en toda zona proyectada a realizar obras de ingeniería, como la construcción de carreteras, se deben de considerar probabilidades y la existencia de zonas propensas a eventos de deslizamiento.

a) Pendiente y extensión del talud o ladera.

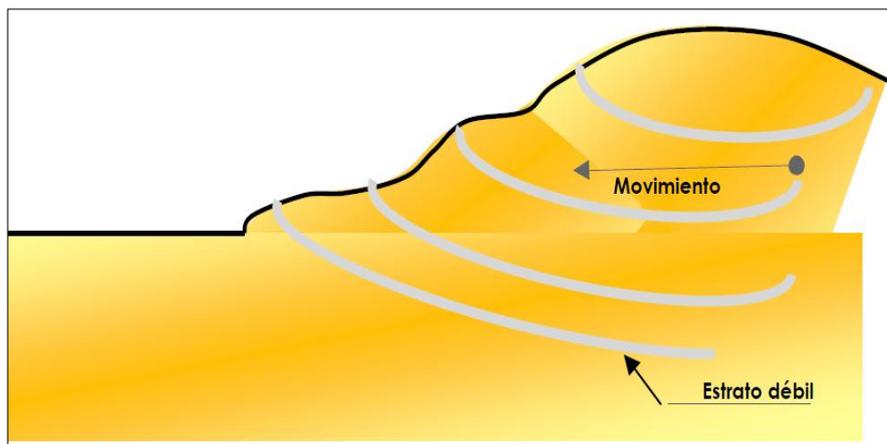
Morales (2000), señala que:

En este punto son importantes las dimensiones que puedan presentar los taludes, esto en cuanto a su pendiente, altura y proyección horizontal. En un talud de tramo menor con altura y base en proporción de 1:2, que representa una pendiente de 0.5, la probabilidad de que esta falle y se dé un evento de deslizamiento, es menor en comparación a un talud con la misma proporción pero de tramo de mayor longitud y altura.

b) Aspectos geotécnicos y geológicos

Morales (2000), señala que:

Estos aspectos resultan ser fundamentales para la estabilidad del talud y se evite eventos de deslizamientos inesperados. Es así que la cohesión y el ángulo de fricción presentes en la zona de estudio, cumplen un papel primordial que encajan en las condiciones de estabilidad de la masa de suelo que compones la estructura de los taludes que conforman la zona en estudio. Aquí también toma un papel protagónico y determinante, los factores climáticos que se presenten en las regiones o localidades donde se realizara determinada obra.



Fuente: CAPECO.

c) Aspectos climáticos

Morales (2000), señala que:

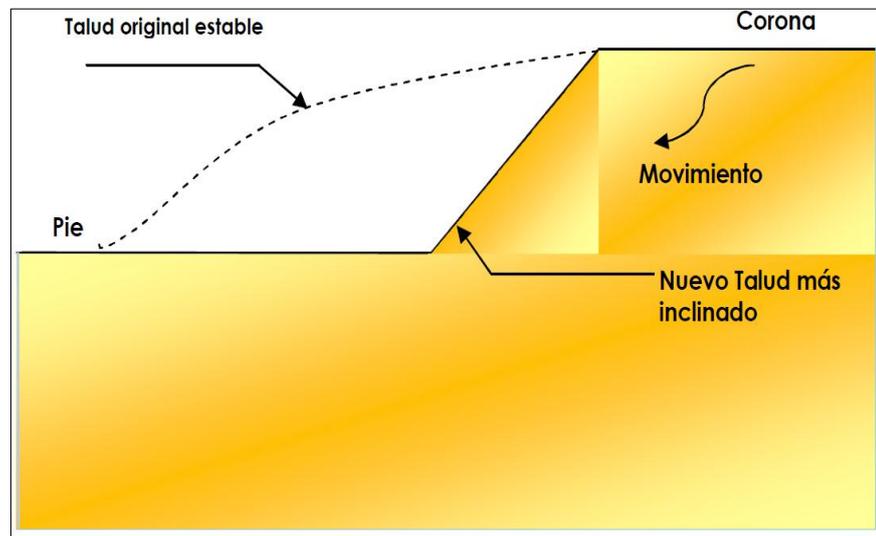
Para un proyecto de construcción, en este caso la construcción de carreteras, hay que tener presente las condiciones climáticas que frecuentan en la zona o región, pues son factores determinantes para posibles sucesos de deslizamientos por la inestabilidad que pueden producir éstos en los suelos de

la zona. Por ejemplo en zonas donde suele presentarse lluvias, se aprecian casos de saturación, humedad superficial o profunda en la masa de suelo, entre otros.

❖ Erosión:

Tanto el agua como el viento afectan en forma significativa, causando en el talud, una erosión. Y este agente puede ocasionar cambios de las condiciones en que se encuentra un talud inicialmente, y por consiguiente ocasionaría cambios en el análisis, también.

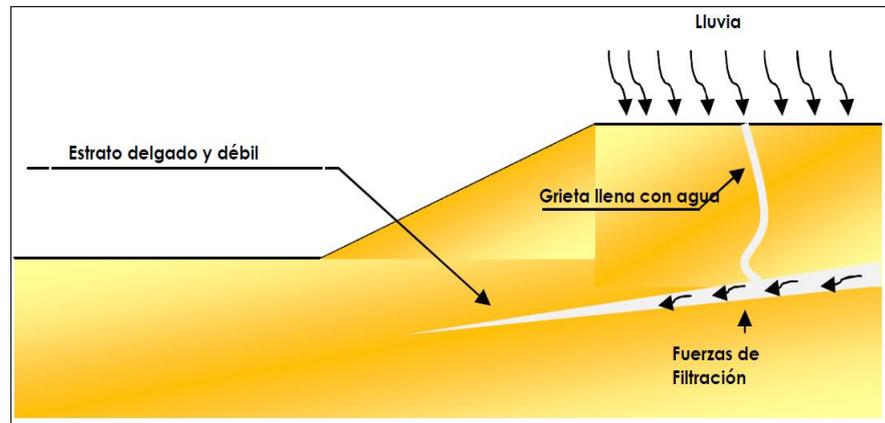
:



Fuente: CAPECO.

❖ Lluvia:

El agua en cualquier forma y estado, va a tener siempre implicancias importantes. Y las lluvias representan gran aporte a la inestabilidad de un talud, por las infiltraciones de agua dentro del suelo que producen. Es por eso que sabemos de los famosos huaycos en los desastres naturales.



Fuete: CAPECO

d) Condiciones de drenaje

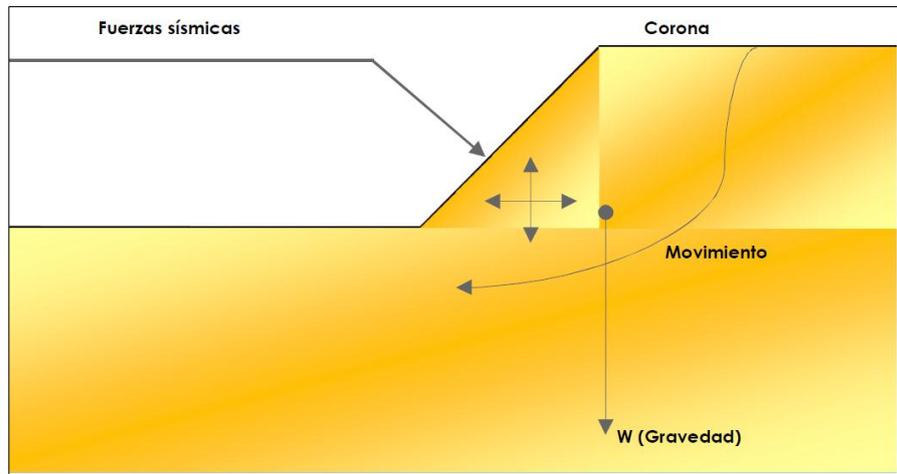
Morales (2000), señala que:

En aquellas zonas donde los taludes o laderas, que conforman el relieve de determinada zona, presentan bajas condiciones de drenaje o sin drenaje alguno, éstos tienden a acumular agua en su masa. Esto hace que el talud de la zona en estudio este propenso a tener posibles superficies potenciales de falla.

e) Intensidad sísmica

Morales (2000), señala que:

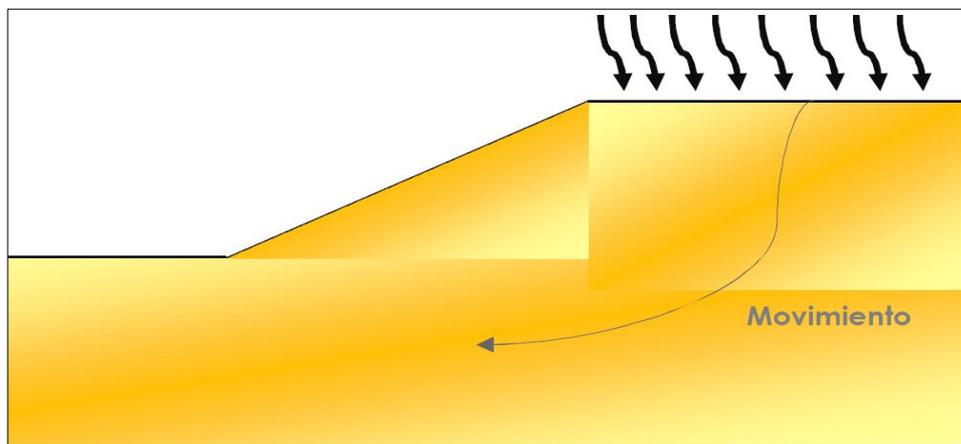
Como lo habíamos mencionado en puntos anteriores, la intensidad sísmica resulta ser un factor importante ante aquellas zonas con estabilidad pero propensas a deslizamientos por el efecto dinámico que ocurre. Pues un sismo puede cambiar todas las condiciones de estabilidad, generando deslizamientos de taludes y/o laderas de acuerdo a su intensidad.



Fuerzas debidas a la gravedad y fuerza provocadas por sismo. Fuente: CAPECO.

f) Cargas externas

El talud o ladera sometida a cargas externas provocarán un incremento de las fuerzas que actúan en la masa del suelo, y si no son controladas pueden ocasionar la indeseada inestabilidad que por lo general acaban con derrumbes.

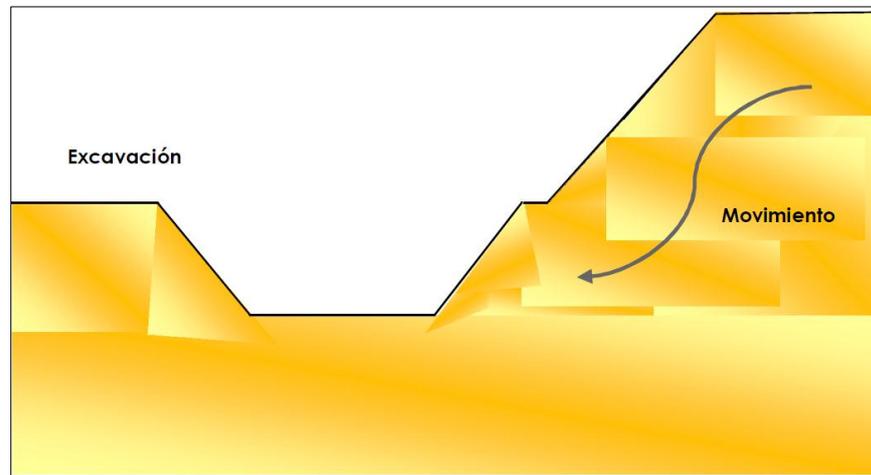


Fuente: CAPECO

g) Excavaciones y/o rellenos

Heredia y Salazar (2017), señalan que:

Al realizar obras que conlleven a excavaciones y/o rellenos, también se está propiciando la inestabilidad en la base de un talud que terminará en producir falla en su estructura.



Excavación en el pie del talud. Fuente: CAPECO.

2.2.4 TIPOS DE FALLA

En un talud o ladera, por un efecto propio, la composición de éste tiende a desplazarse hacia su parte más ínfima o hacia adelante; esto debido a efectos de la gravedad y la presión en su estructura por la presencia de masa (peso propio).

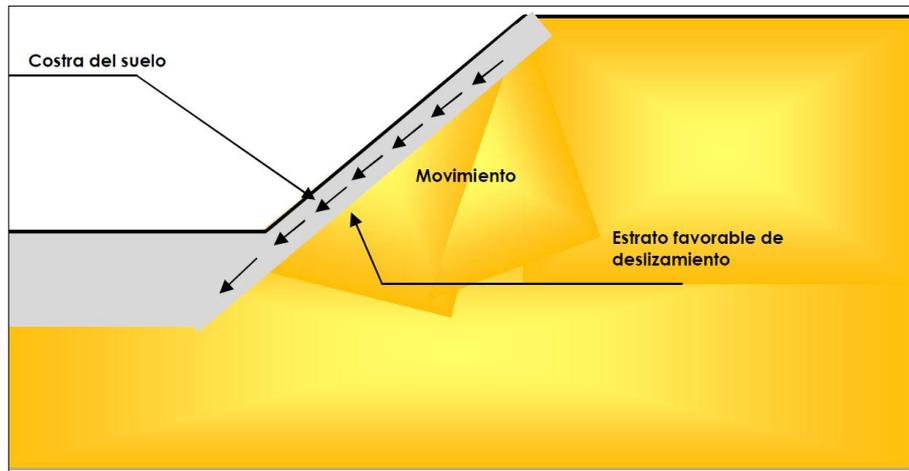
2.2.4.1 Falla por deslizamiento superficial

Romero (2011), señala que:

Este tipo de falla es de carácter minúsculo en velocidad, es decir lento en su desplazamiento y/o deslizamiento, presente en taludes naturales.

Catañón (2018), señala que:

En este tipo de falla por lo general suelen suceder en dos modalidades: Estacional, que actúa solo en la parte superficial del talud; y masivo, que actúa en toda la estructura del talud desde lo profundo.



Fuente: CAPECO.

2.2.4.2 Falla por rotación

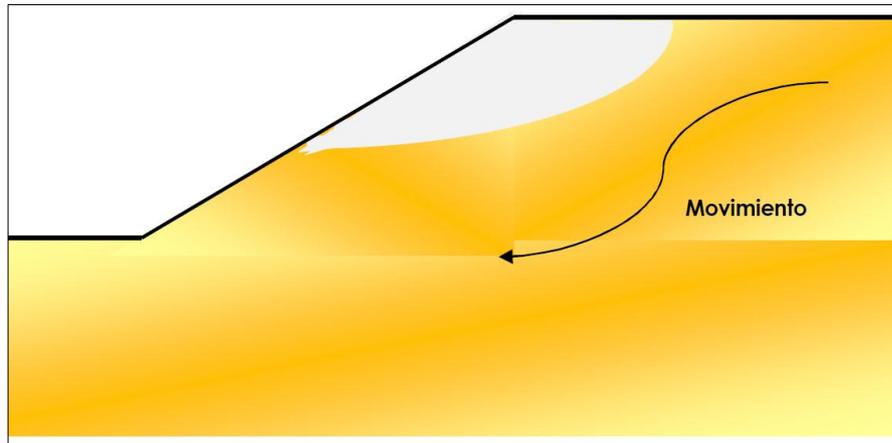
Catañón (2018), señala que:

En este tipo de falla se produce el desplazamiento profundo de masa de suelo del talud o ladera, de modo que después de la falla se hace visible una superficie ligeramente circular.

2.2.4.3 Falla local

Catañón (2018), señala que:

En este tipo de falla, el deslizamiento de masa de suelo del talud o ladera se produce no masivo, es decir solo se desplaza una parte del suelo que compone el talud, se da entre la cabeza y el cuerpo de éste y no toca su base.

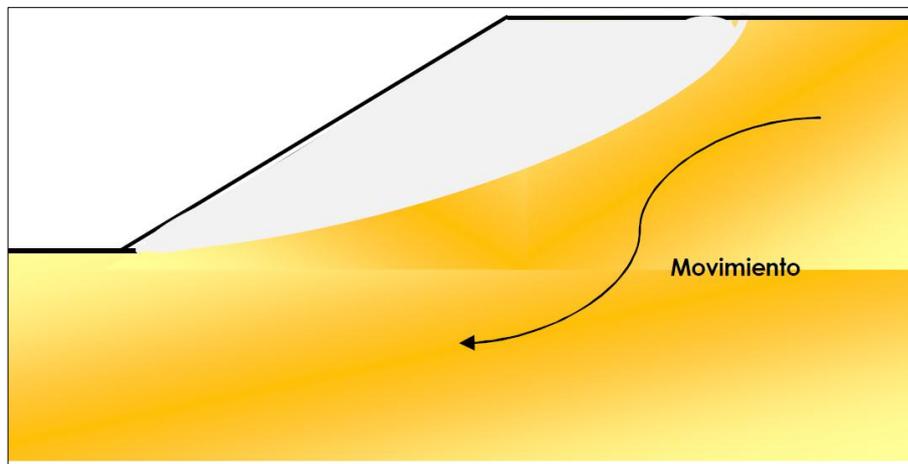


Fuente: CAPECO.

2.2.4.4 Falla de pie

Catañón (2018), señala que:

En este tipo de falla, el deslizamiento de masa de suelo del talud o ladera se produce entre la cabeza y el cuerpo de éste, llegando a su base.

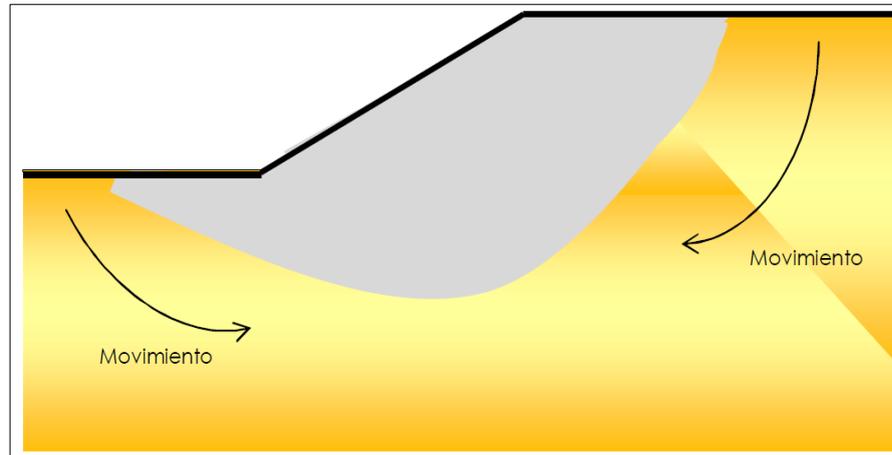


Fuente: CAPECO.

2.2.4.5 Falla de base

Catañón (2018), señala que:

En este tipo de falla, el deslizamiento de masa de suelo del talud o ladera se produce su totalidad geométrica, es decir incluye a su base con mayor profundidad.

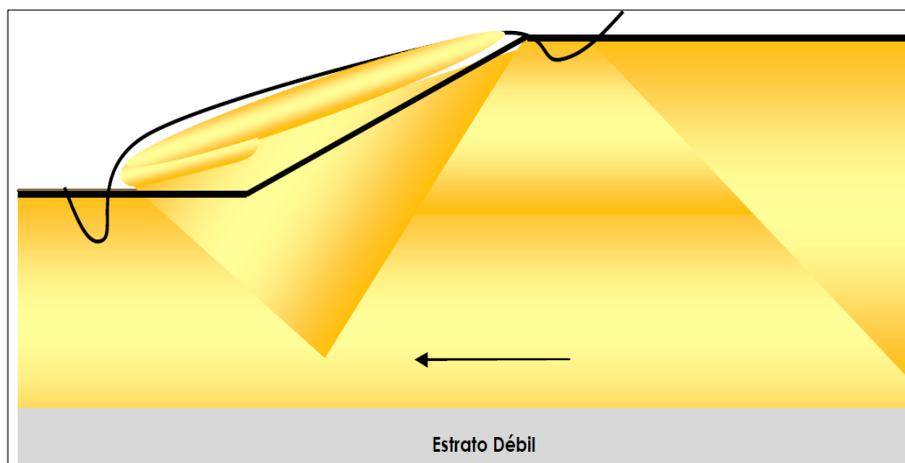


Fuente: CAPECO

2.2.4.6 Falla por traslación

Catañón (2018), señala que:

En este tipo de falla, el deslizamiento de masa de suelo del talud o ladera se produce en todo su cuerpo y se traslada en las cercanías del pie de éste. Suele suceder en taludes de composición de arcillas blandas o arenas.



Fuente: CAPECO.

2.2.4.7 Falla por flujo

Catañón (2018), señala que:

En este tipo de falla, el deslizamiento de masa de suelo del talud o ladera se produce por acción de líquido en su estructura, la cual hace que este deslizamiento sea de manera rápida y violenta. Se presenta en suelos no consolidados.

2.2.4.8 Falla por licuación

Catañón (2018), señala que:

Este tipo de falla se hace presente por lo general en taludes o laderas cuya composición es de material fino, sueltos saturados y de drenaje pobre. La presencia de carga externa sobre el talud hace más probable que ocurra este tipo de falla, y está considerado como uno de los fenómenos más destructivos, que también pueden ser inducidos por acciones sísmicas.

2.2.5 ALGUNOS MÉTODOS PARA MEJORAR LA ESTABILIDAD DE TALUDES

2.2.5.1 Tender taludes

Si el terreno es puramente friccionante la solución es indicada, pues la estabilidad de estos suelos es fundamentalmente cuestión de inclinación en el talud, tendiendo este convenientemente se obtiene la estabilidad deseada. En suelos cohesivos la estabilidad del talud está condicionada sobre todo por la altura de este y la ganancia a tender el talud es siempre escasa y en ocasiones nula. En suelos con cohesión y fricción el tender el talud aumentara la estabilidad general.

2.2.5.2 Empleo de bermas laterales o frontales

Bermas o masas generalmente del mismo material que el propio talud que se coloca en el lado exterior del mismo a fin de aumentar la estabilidad por dos motivos. Uno, por su propio peso, en la parte que queda hacia fuera de la vertical, otro aumenta el momento resistente, por el incremento en la longitud del arco de falla. Otro efecto es que estriba en la redistribución de esfuerzos cortantes que su presencia produce en el terreno de cimentación; la presencia de la berma hace que la distribución de esfuerzos sea más favorable y que en un mayor volumen del terreno de cimentación coopere a resistir tales esfuerzos.

2.2.5.3 Empleo de materiales ligeros

Se trata de colocar materiales de terraplén de suelos de peso específico bajo que, den bajos momentos motores, otras soluciones de concreto hueco, terraplenes con tubo, etc.

2.2.5.4 Consolidación previa de suelos compresibles

Que el suelo con el paso del tiempo, se consolide de manera que el talud o terraplén alcancen una resistencia aceptable.

2.2.5.5 Empleo de materiales estabilizantes.

El fin de la solución en estudio es mejorar las cualidades de resistencia de los suelos mezclándoles algunas sustancias que al producir una cementación entre las partículas del suelo natural o al mejorar sus características de fricción aumenten su resistencia. Las sustancias más empleadas han sido cementos, asfaltos y sales químicas.

2.2.5.6 Empleo de muros de retención

Cuando un talud es inestable, se ha recurrido con frecuencia a su retención por medio de un muro, hay que tomarse las precauciones adecuadas para el proyecto y construcción de los muros: ha de cuidarse la cimentación, tomar precauciones al drenaje.

En general, el muro de retención como elemento estabilizador de taludes, constituye una de las estructuras más delicadas en lo referente a su proyecto y construcción y es recomendable que ambas etapas sean muy cuidadosamente supervisadas por un especialista, cuando más alta sea la estructura que se requiera construir y cuando más plástico sea el suelo por retener.

2.2.5.7 Precauciones de drenaje

La principal y más frecuente causa de problemas derivados de la estabilidad de taludes en obras de ingeniería es, sin duda la presencia de agua y su movimiento por el interior de la masa de suelo.

2.2.6 RESISTENCIA AL ESFUERZO CORTANTE

Esta resistencia del suelo determina factores como la estabilidad de un talud, la capacidad de carga admisible para una cimentación y el empuje de un suelo.

Toda obra de ingeniería exige seguridad, funcionalidad y economía. Cuando se habla de seguridad en el caso específico de los suelos, se busca que el sistema que forman la cimentación y el suelo no genere un mecanismo de falla que ponga en peligro la estabilidad de la obra.

Para llevar a cabo el análisis de la estabilidad de una estructura, desde el punto de vista de la ingeniería geotécnica, es necesario determinar la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos involucrados en el mecanismo potencial de falla. Sin embargo, dicha determinación implica grandes retos para el ingeniero de mecánica de suelos, en virtud de las variables involucradas en el problema, tales como: tipo de suelo, grado de compacidad o consistencia, grado de saturación y anisotropía, entre otras.

2.2.6.1 Parámetros fundamentales

➤ Ángulo de Fricción

Jaime Suarez (1998), señala que:

Cuando se habla de ángulo de fricción interna, nos referimos a una propiedad que tienen todos los materiales granulares del suelo, y es denominado como coeficiente de rozamiento, que representa la tangente de la pendiente del talud o ladera en cuestión. Pero en suelos de baja fricción como en el caso de las arcillas, nos encontramos a un suelo con cohesión.

Éste ángulo depende de:

- Tipo de mineral constitutivo de las partículas.
- Forma de los granos o partículas. Φ es mayor para partículas angulosas.
- Distribución de granos por el tamaño de sus partículas. Para un suelo bien gradado, Φ es mayor que en un suelo uniforme.
- Fábrica o microestructura (organización de las partículas).
- Densidad.
- Permeabilidad (Facilidad de drenaje).
- Presión normal o de confinamiento.

➤ Cohesión

Cuando hablamos de cohesión, nos referimos a que las partículas del suelo se encuentran unidas debida a las fuerzas internas de atracción molecular, y ésta cohesión se incrementa cuando mayor es el grado de fineza de las partículas de determinada zona o terreno.

2.2.6.2 Ecuación de falla de Coulomb (1776)

➤ Suelos cohesivos

El suelo cohesivo contiene pequeñas partículas y suficiente arcilla para que el suelo se adhiera a sí mismo. Cuando el suelo es más cohesivo, es porque tiene mayor cantidad de arcilla, y presenta menos probabilidades de que se produzca un derrumbe. Los suelos granulares están formados por partículas gruesas como la arena o la grava.

Cuando el suelo es menos cohesivo, se necesita llevar adelante mayores medidas para prevenir un derrumbe. Se utiliza un sistema de medición llamado "fuerza de compresión" para clasificar cada tipo de suelo. Que es la cantidad de presión necesaria para que el suelo colapse.

➤ Suelos No cohesivos (Friccionantes)

Heredia y Salazar (2017), señala que:

Las partículas no tienden a juntarse ni adherirse, sus partículas son relativamente grandes, también llamados suelos granulares o friccionantes (arenas, gravas y limos). Estos suelos mencionados nos determinan la envolvente de falla en la ecuación de Coulomb.

Al sufrir un suelo o cualquier estrato, una falla, tienen un comportamiento de acuerdo a la Ecuación de Coulomb en cuanto a la cohesión y la fricción que se produce en él.

$$\tau = c' + (\sigma - \mu) \tan \phi'$$

Donde:

τ = Esfuerzo de resistencia al corte

c' = Cohesión o cementación efectiva

σ = Esfuerzo normal total

μ = Presión del agua intersticial o de poros

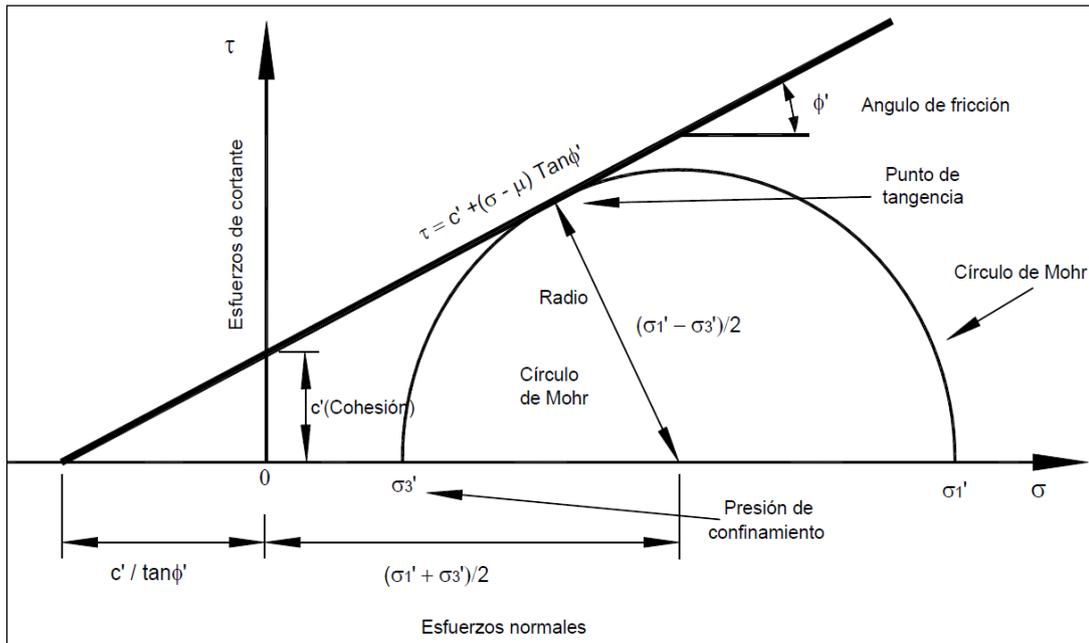


Fig. Representación gráfica de la ecuación de Coulomb. Fuente: Geociencias, UNAM.

En los materiales granulares, $c = 0$ y, por lo tanto:

$$\tau = (\sigma - \mu) \tan \phi'$$

Contrariamente, en suelos puramente cohesivos, $\phi = 0$, luego:

$$\tau = c'$$

2.2.7 MODELO DE ADMINISTRACION EN TALUDES

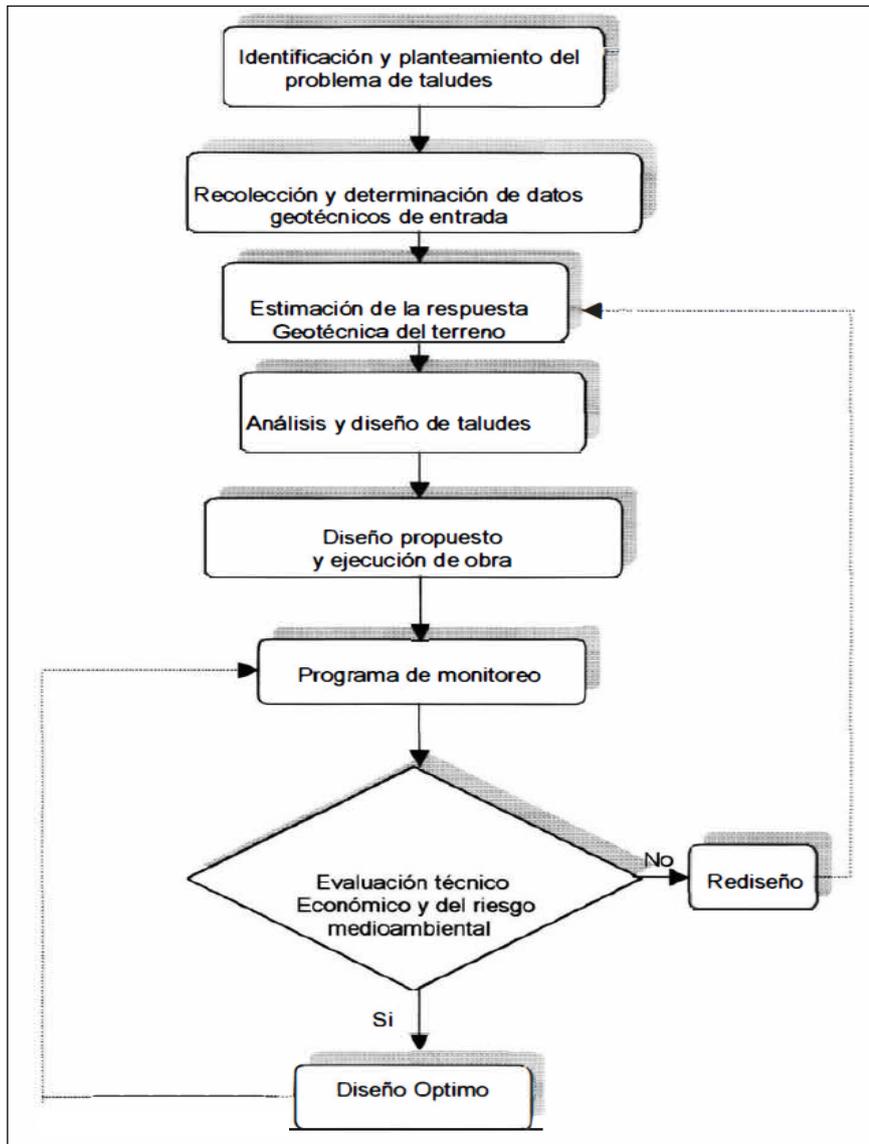


Fig. Modelo de Administración de Taludes. Fuente: CAPECO.

CAPÍTULO III

ANÁLISIS DE ESTABILIDAD

3.1 INTRODUCCIÓN

Ante la necesidad de realizar obras de infraestructura que sirva de avance y desarrollo para el país, la construcción de redes de comunicación vial forma parte fundamental que ayudan en gran manera a este propósito. Y es así que se hace demandante la construcción de carreteras, y ante ello se presenta como tema primordial el tema de taludes y laderas que conforman la topografía y/o relieve de la zona a intervenir con propósito de obra.

Entonces es cuando se presenta como la raíz o base dos aspectos fundamentales: El estudio y el Análisis de estabilidad del suelo, propiamente hablamos de este material u otro que compone la estructura de los taludes. En construcción de carreteras, la ingeniería geotécnica toma las riendas en cuanto al análisis y estudio previo de estabilidad para ver en qué condiciones se encuentra la zona proyectada a trabajar.

En la actualidad y desde muchos atrás se cuentan con metodologías que permiten modelar y a su vez analizar los taludes o laderas, y dan como resultado el grado de estabilidad de éstos. De esta manera nos permiten conocer las potenciales o moderadas fallas (mecanismos de falla) que presenta la región /zona en estudio. Por otro lado también éste análisis matemático nos dará referencias de cuan susceptible se encuentra el talud ante la acción de factores externos tales como las lluvias, los movimientos de tierras (sismos), infiltraciones, etc.

De esta manera el efectuar el análisis debido de los taludes como punto esencial y de partida para cuando se tiene proyectado la construcción de carreteras, nos permitirá conocer resultados determinantes en cuanto al factor de seguridad con que cuenta el talud en cuestión; y en muchas ocasiones, si

es necesario, también nos permitirá realizar los diseños apropiados para contención de taludes.

El adecuado estudio y análisis brindara al profesional encargado de ejecutar determinada obra, un alto grado de confiabilidad, ya que dependerá mucho la calidad y tiempo de vida útil de la carretera ya construida, a efectos de que no conlleve a pérdidas económicas por la ineficiencia o fallas en su estructura, y genere un gasto mayor en su reconstrucción.

3.2 HERRAMIENTAS DISPONIBLES

Cuando se quiere realizar el análisis de estabilidad necesario en los taludes y/o laderas que comprenden en un proyecto, en la construcción de carreteras en este caso, existen una variedad de herramientas, como por ejemplo: Las tablas o ábacos, los cálculos manuales, análisis de modo gráfico, empleo de softwares computacionales, etc.

Cada técnica que se escoja depende de la situación, características y complejidad geológica que pueda presentar la zona en estudio. Y en la actualidad se suelen usar en su mayoría las técnicas computacionales a través de Programas(softwares), ya que esta permite la inclusión de una serie de datos obtenidos dentro del estudio que se esté haciendo y de este modo puede arrojar resultados con la mayor precisión posible.

En esta tesis de investigación se ha utilizado el Programa SLOPE/W de GEO-SLOPE como software de herramienta, ya que este programa de computador permite modelar los taludes y laderas para su posterior análisis, simplificando de este modo el estudio en curso de determinada zona. Cabe señalar que a éste programa se le proporciona cuanta información sea necesaria para lograr un análisis profundo con la finalidad de obtener los resultados deseados.

3.3 METODOLOGÍAS PARA EL ANALISIS DE LA ESTABILIDAD

Cuando hablamos de las Metodologías para el necesario análisis de estabilidad, uno de estos las plasman **los métodos de límite de equilibrio**, los métodos numéricos y los métodos dinámicos para el análisis de caídos de roca y flujos, entre otros. Los más empleados en los últimos estudios de análisis de estabilidad de taludes han sido los métodos numéricos por su mejor aproximación al detalle, de las condiciones de estabilidad que se encuentran en la zona. Pero por otro lado, **los métodos de límite de equilibrio**, son menos complejos de utilizar y permiten analizar los casos de falla traslacional y de falla rotacional, así como las fallas de inclinación entre otros tipos de fallas. Cabe mencionar también que los métodos de límite de equilibrio permiten desarrollar y llevar a cabo un análisis combinado durante el estudio de determinado terreno o zona.

3.3.1 CARACTERÍSTICAS DEL ANÁLISIS DE LÍMITE DE EQUILIBRIO

Con este análisis, el objetivo deseado es el de obtener un valor de factor de seguridad, el cual indicará el grado de estabilidad con que se encuentra los suelos/rocas del terreno en estudio. Otro de los objetivos también es el de obtener los valores de la resistencia al cortante en el momento de la falla.

Pero previo a estos objetivos, se debe hacer el estudio minucioso de las propiedades del suelo que conforma el talud, tales como: presión de poros, humedad, composición geológica, saturación, etc.

Las variaciones principales de los diversos métodos son, el tipo de superficie de falla y la forma cómo actúan internamente las fuerzas sobre la superficie de falla de la zona en estudio.

3.4 FACTOR DE SEGURIDAD

Cuando hablamos de factor de seguridad, estamos hablando del grado de soporte al que se encuentra la estructura del talud, el cual será determinante para saber si existe la posibilidad de falla. En tal sentido si las fuerzas disponibles para resistir el movimiento son mayores que las fuerzas que desequilibran el talud entonces se considerará estable. Si nuestro factor de seguridad calculado es mayor o igual que 1, se puede considerar que estamos frente a un talud estable.

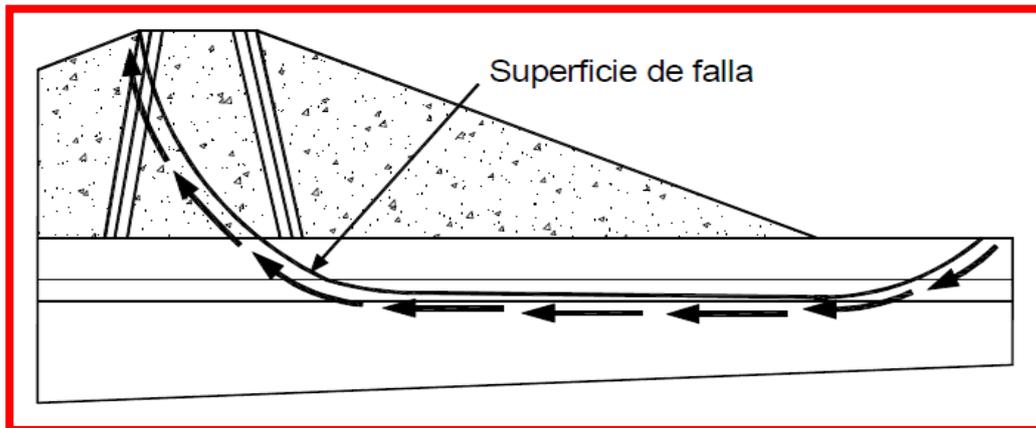
Es así que Fellenius (1922) presentó una fórmula de factor de seguridad como la relación entre la resistencia al corte real, calculada del material que compone el talud y los esfuerzos de corte críticos que tratan de producir la falla a lo largo de la superficie:

$$F.S. = \frac{\textit{Resistencia al cortante disponible}}{\textit{Esfuerzo al cortante actuante}}$$

3.5 SUPERFICIE DE FALLA

Suarez (1998), señala que:

Cuando se habla de superficie de falla, se habla de una faja de suelo superficial en la cual puede ocurrir el deslizamiento o la rotura del talud; pero puede no ocurrir a lo largo de esas superficies si el talud es diseñado adecuadamente. El factor de seguridad cuando usamos los métodos de límite de equilibrio, se asume que es igual en cada punto a lo largo de la superficie de falla; de este modo, el valor de F.S. equivale al promedio del valor total que hay en toda la superficie. Entonces de ocurrir una falla, los esfuerzos de cortante llegan a ser los mismos en todos los puntos a lo largo de la superficie de falla.



Superficie de falla y dirección de la resistencia al cortante. Fuente: CAPECO.

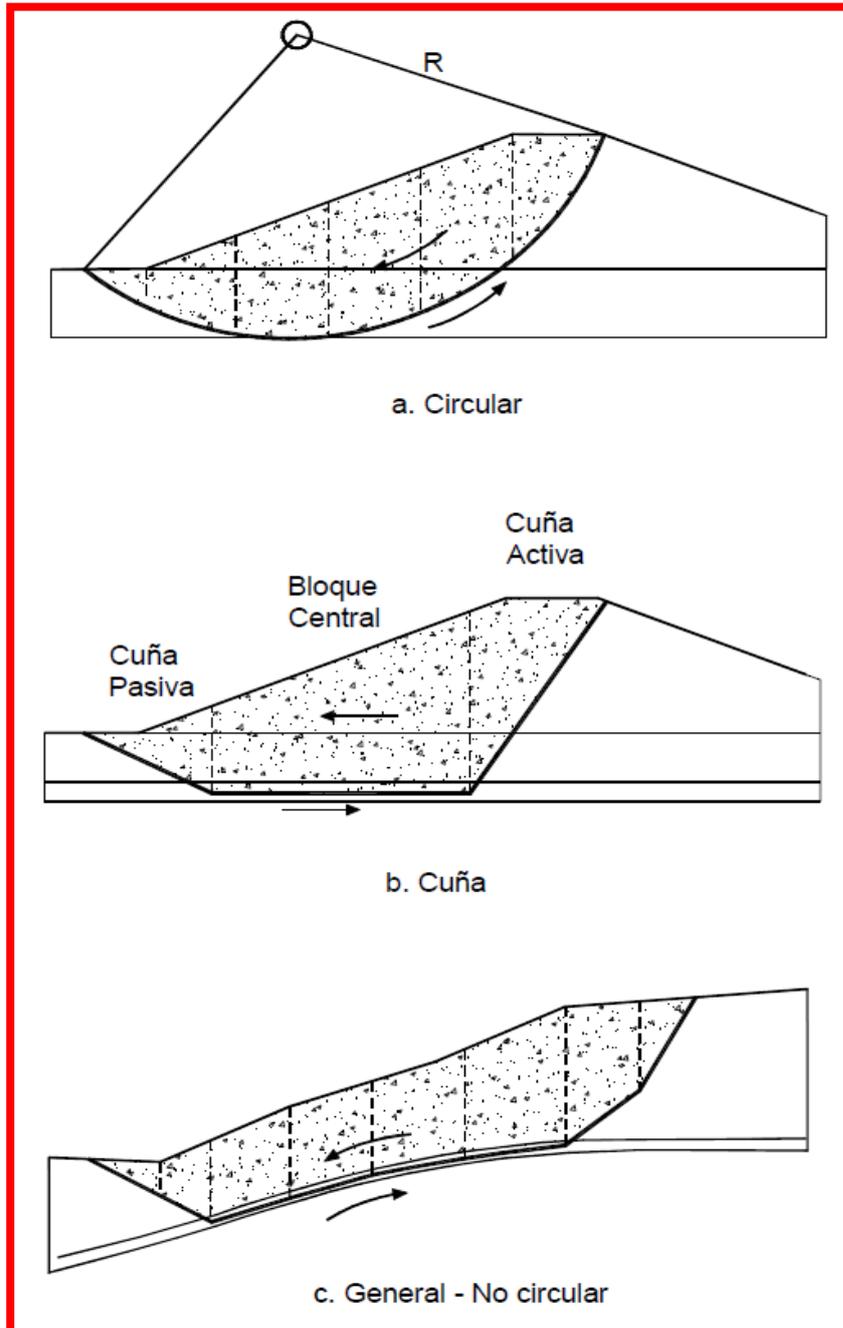
3.5.1 FORMAS DE LA SUPERFICIE DE FALLA

Suarez (1998), señala que:

Usamos técnicas de límite de equilibrio cuando las fallas corresponden a los deslizamientos de traslación o de rotación que ocurren sobre determinadas superficies de falla. Cuando se hace un estudio nos podemos encontrar con superficies planas, circulares, logarítmicas, parabólicas y combinaciones de éstas. Dentro de las investigaciones hechas se han encontrado que algunas superficies de falla tienen forma no geométrica.

Dentro de estas formas de superficie de falla, se hacen análisis de tipos de superficie que conforman el relieve del talud o ladera. Es decir, que dependiendo de la zona en que se estén realizando los estudios, se encontrarán superficies planas y superficies curvas, que necesitarán el análisis respectivo por separado.

En estos análisis de estabilidad es necesario ubicar la superficie crítica de falla, así como el factor de seguridad presente a lo largo de la superficie en estudio.



Formas de superficie de falla. Fuente: CAPECO.

3.6 PARÁMETROS UTILIZADOS EN LOS ANÁLISIS DE LÍMITE DE EQUILIBRIO

Existen algunos factores fundamentales que influyen en la estabilidad del suelo que compone la estructura del talud o ladera de determinada zona.

3.6.1 Pesos unitarios

Sabemos que el peso unitario está relacionada con el volumen de suelo/roca del terreno en estudio y con la masa por unidad de ésta.

Si bien es cierto, el peso unitario no influye en gran manera para la determinación del factor de seguridad deseado, éste es uno de los parámetros más fáciles en términos de medición dentro del análisis de estabilidad de taludes.

3.6.2 Resistencia al cortante

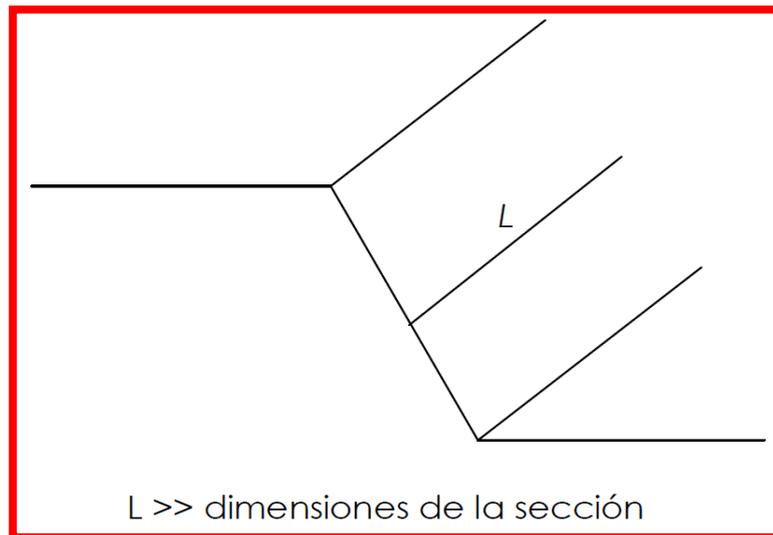
Cuando hablamos de la construcción de carreteras como obra de ingeniería, nos damos cuenta que ésta conlleva prevención, seguridad, óptima funcionalidad y el factor de la economía. Y es que como lo manifiesta la ingeniería geotécnica, se hace indispensable dentro de un estudio, determinar la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos que presenta un terreno a intervenir donde se podrían presentar mecanismos de falla.

3.7 ANÁLISIS BIDIMENSIONAL

Castañón (2018), señala que:

Cuando se hace este tipo de análisis se toma en cuenta la longitud “L” y la sección transversal de los taludes o laderas que conforman la zona en estudio. Luego se asume que el punto en cuestión es de deformación plana y que no hay acción de otros factores al analizar la sección transversal, debido a que L es menor que ésta

sección. Y se asume que el talud presenta las mismas características en cualquier corte transversal a lo largo de L.



Fuente: CAPECO.

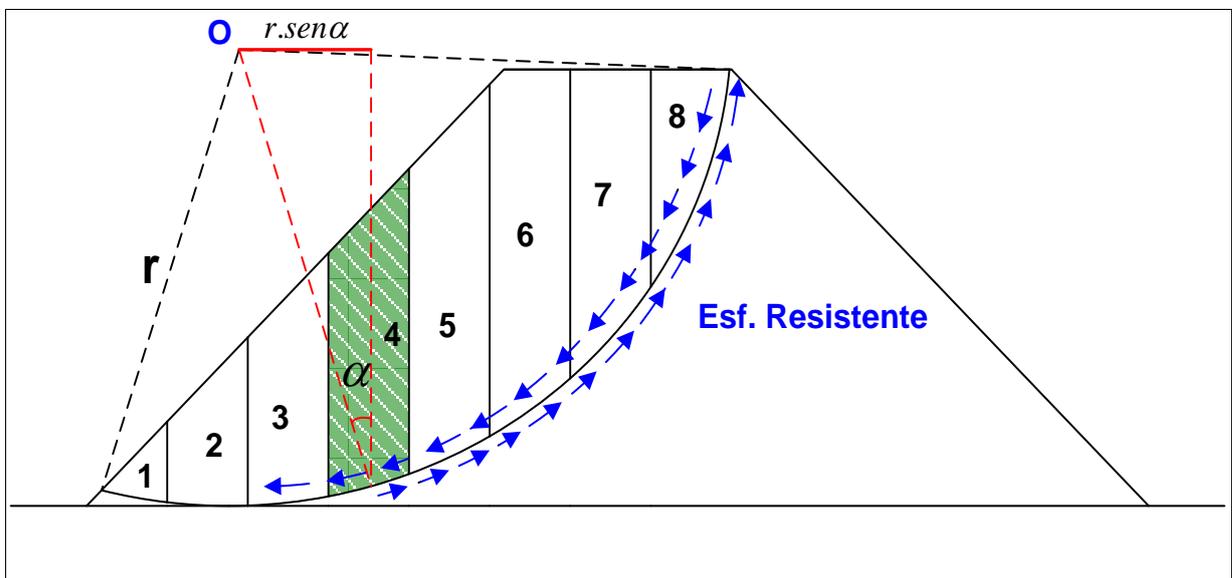
3.8 MÉTODOS DE EQUILIBRIO LÍMITE

Dentro del comportamiento móvil de los taludes o laderas, se han realizado por técnicas de límite de equilibrio para el análisis respectivo. Existen métodos ya estudiados, unos precisos y otros, aproximados. En esta investigación, damos énfasis al Método **Janbú (1954)** por contemplar dentro de su análisis los efectos del agua primordialmente y por ser uno de los métodos de mayor uso a través de los años en el estudio de taludes para determinar el factor de seguridad necesario para su estabilización. También damos énfasis al Método **Spencer** que es muy utilizado en los últimos años, éste último por ser de mayor grado de precisión. Ambos a través de usos de softwares garantizan un óptimo análisis de determinada zona en cuanto a su estabilidad.

En consecuencia, ésta tesis de investigación hace el uso de dos métodos de análisis de Equilibrio Límite, el método de análisis Janbu y el método de análisis de Spencer. Éstos en su combinación logran abordar todos los

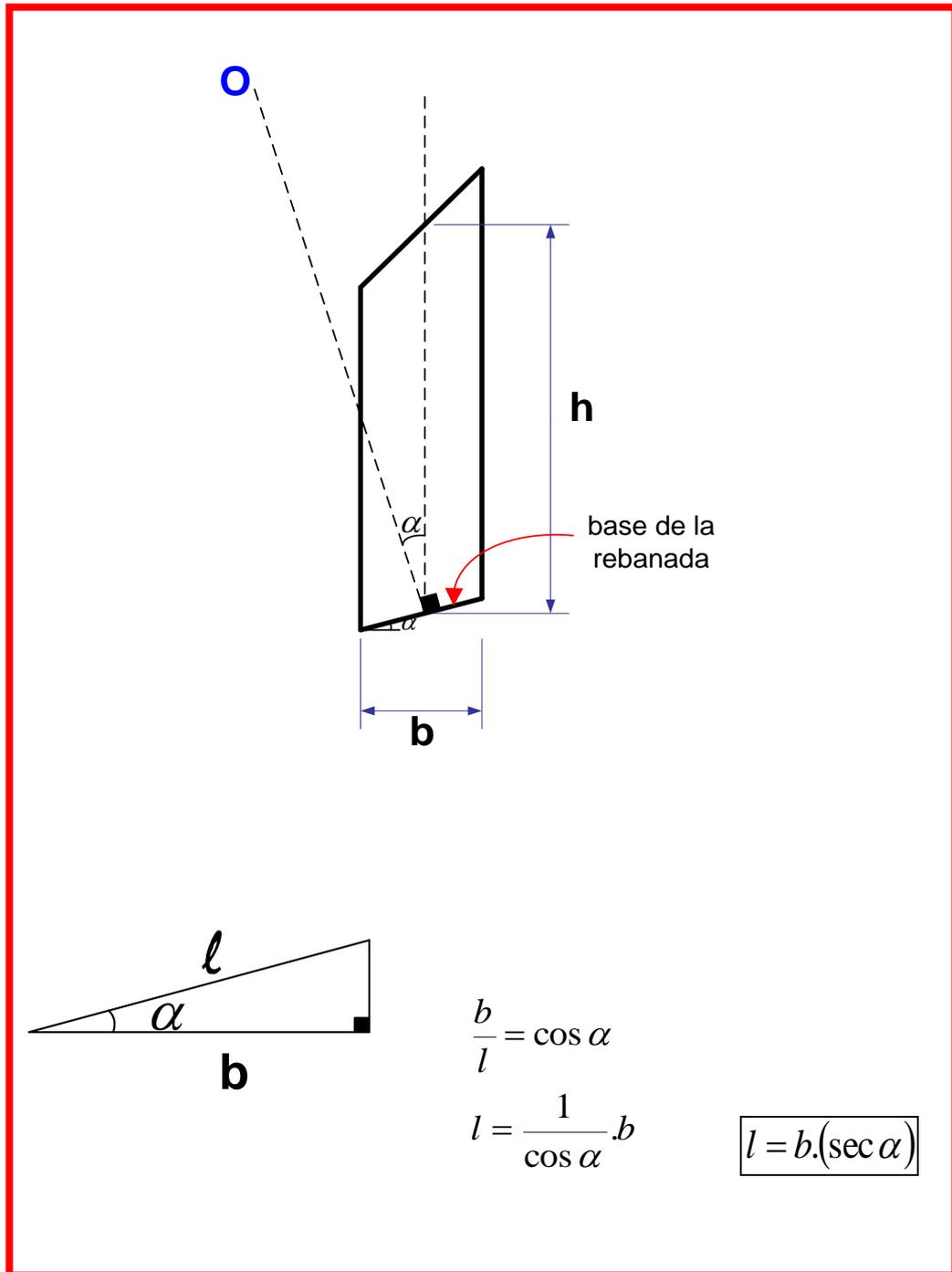
agentes causantes de inestabilidad de determinado talud y/o ladera y harán que se pueda hallar el factor de seguridad apropiado. Veamos el desarrollo de ambos métodos de análisis:

3.8.1 ANÁLISIS Y FORMULACIÓN DEL F.S. POR EL CRITERIO “REBANADAS”



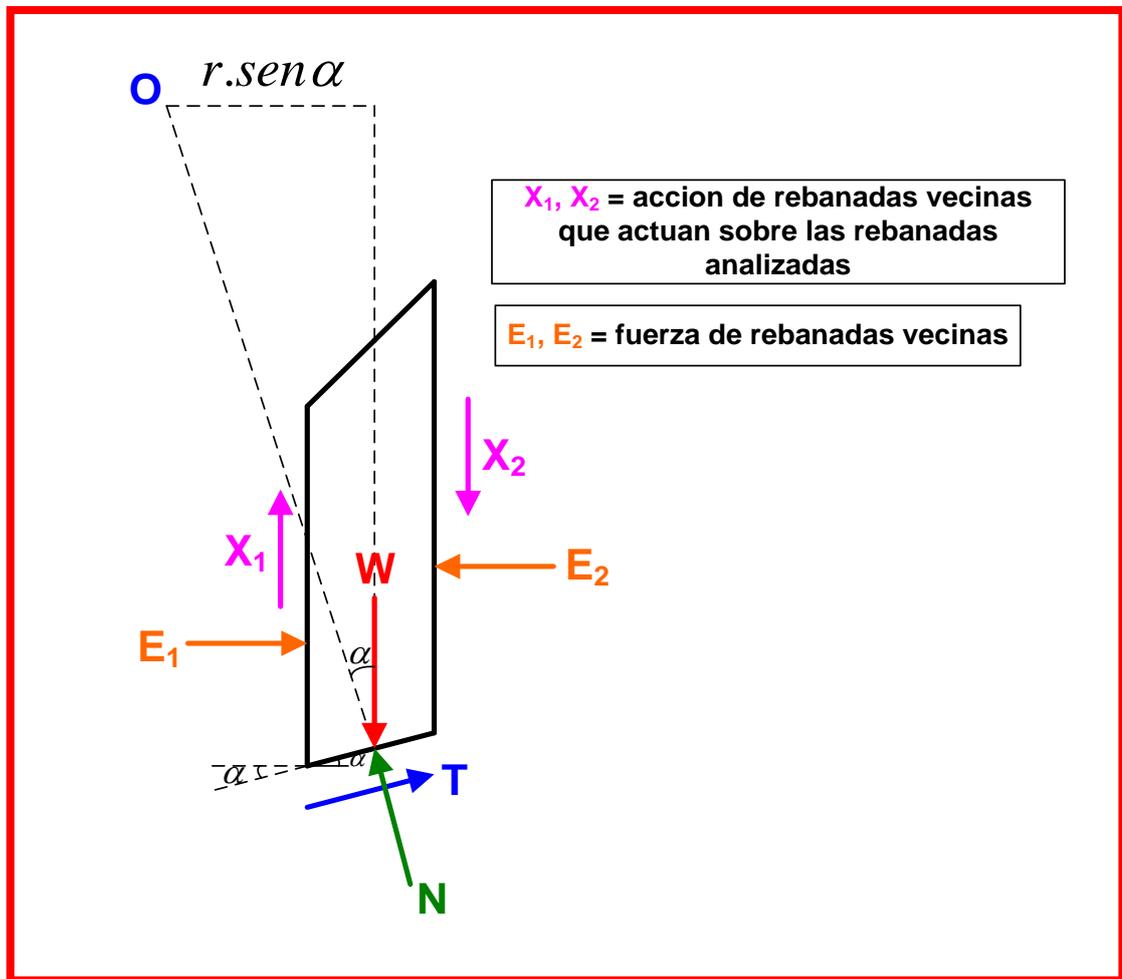
Fuente: CAPECO.

Aislamos una rebanada: (vemos sus características geométricas)



Fuente: CAPECO.

Esfuerzos que actúan en la rebanada:



Fuente: CAPECO.

Peso:

$$W = \gamma.b.h$$

Normal:

$$N = \sigma.l$$

$$N = (\sigma' + u).l$$

$$N = \sigma'.l + u.l$$

$$N = N' + u.l$$

Fuerza cortante:

$$T = \tau_n \cdot l \dots\dots\dots (*)$$

$$F \cdot S = \frac{\tau_p}{\tau_m}$$

$$\tau_m = \frac{\tau_p}{F \cdot S}$$

$$\tau_m = \frac{c' + \sigma' \tan \phi'}{F \cdot S}$$

Reemplazando en (*)

$$T = \frac{(c' + \sigma' \tan \phi') \cdot l}{F \cdot S} = \frac{c' \cdot l + \sigma' \cdot l \cdot \tan \phi'}{F \cdot S}$$

$$\boxed{T = \frac{c' \cdot l + N' \cdot \tan \phi'}{F \cdot S}}$$

Luego la suma de momentos respecto de "O" = 0 para todas las rebanadas:

$$\underline{\sum M_o = 0}$$

$$\sum W(r \cdot \text{sen} \alpha) - \sum T(r) = 0$$

$$\sum W(r \cdot \text{sen} \alpha) = \sum T(r)$$

$$\sum W.\text{sen}\alpha = \sum T$$

$$\sum W.\text{sen}\alpha = \sum \left(\frac{c'l + N'.\tan\phi'}{F.S} \right)$$

Despejando:

$$F.S = \frac{\sum c'l + \tan\phi'.\sum N'}{\sum W.\text{sen}\alpha}$$

3.8.2 MÉTODO DE ANÁLISIS DE JANBÚ

Loor y Pérez (2016), señalan que:

Este método de análisis a diferencia del Metodo de Bishop, donde hay equilibrio de momentos y fuerzas, solo cumple el equilibrio de fuerzas (horizontales) que actúan en una sección de talud en estudio. De este modo el equilibrio de las fuerzas horizontales nos proporciona un Factor de Seguridad de equilibrio de fuerzas sin considerar las fuerzas entre elementos (F_0), es por eso que al cálculo se le aplica un factor de corrección (f_0) de tal manera que el Factor de Seguridad del equilibrio de Fuerzas horizontales (F_f) sea:

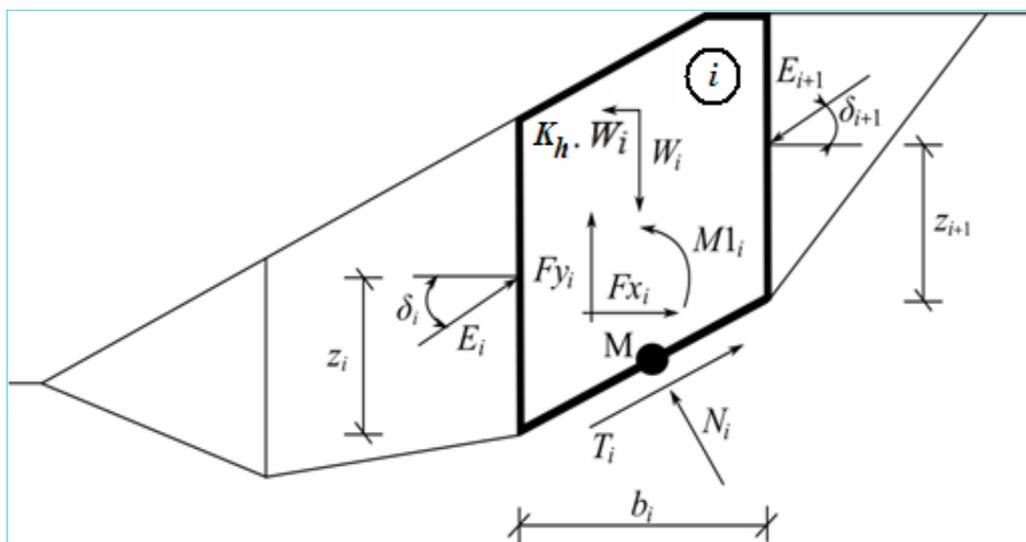
$$F_f = f_0 \cdot F_0$$

Ahora para obtener el factor de corrección (f_0), Janbu comprobó mediante análisis que este factor sólo dependía de la geometría del problema y de las características del suelo, y es por eso que Janbu nos proporciona tablas y figuras.

Loor y Pérez (2016), señalan que:

El cálculo también puede realizarse a mano, siendo muy práctico. En el cálculo del Factor de Seguridad que se determina con el equilibrio de fuerzas (F_f) es más susceptible que cuando se calcula con equilibrio de momentos (F_m).

Es por esta razón, que en esta investigación se hace empleo del Método de Análisis de Spencer que utiliza el equilibrio de momentos para calcular Factor de Seguridad.



Esquema estático – Método Janbu. Fuente: Janbu, 1968.

Cada bloque se asume para contribuir a las siguientes fuerzas:

W_i - Peso del bloque, incluyendo material de sobrecarga que tenga el carácter del peso incluyendo la influencia del coeficiente vertical de sismo K_v .

$K_h \cdot W_i$ - Fuerza de inercia horizontal que representa el efecto del sismo K_h , es el factor de la aceleración horizontal durante el sismo.

N_i - Fuerza normal en la superficie de deslizamiento

T_i - Fuerza de corte en la superficie de deslizamiento

E_i, E_{i+1} - Fuerzas ejercidas por cuerpos vecinos, inclinados desde el plano horizontal por el ángulo δ_i , resp. δ_{i+1} , y yacen a la altura z_i , resp. z_{i+1} , sobre la superficie de deslizamiento.

F_{xi} , F_{yi} - Otras fuerzas horizontales y verticales actuando en el bloque

M_{1i} - Momento desde las fuerzas F_{xi} F_{yi} rotando sobre un punto M , el cuál es el centro del segmento de la superficie i -th

U_i -Presión de poro resultante en el segmento de la superficie i -th

Los siguientes supuestos se introducen en el método Janbu para calcular el límite de equilibrio de las fuerzas y momento de los bloques individuales:

- Los planos divididos entre bloques son siempre verticales
- La línea de acción de peso del bloque W_i pasa por el centro del segmento i -th de la superficie de deslizamiento representada por el punto M
- La fuerza normal N_i actúa en el centro del segmento i -th de la superficie de deslizamiento, en el punto M
- La posición z_i de la fuerza E_i actuando entre bloques, se asume en la superficie de deslizamiento en el punto extremo como $z=0$

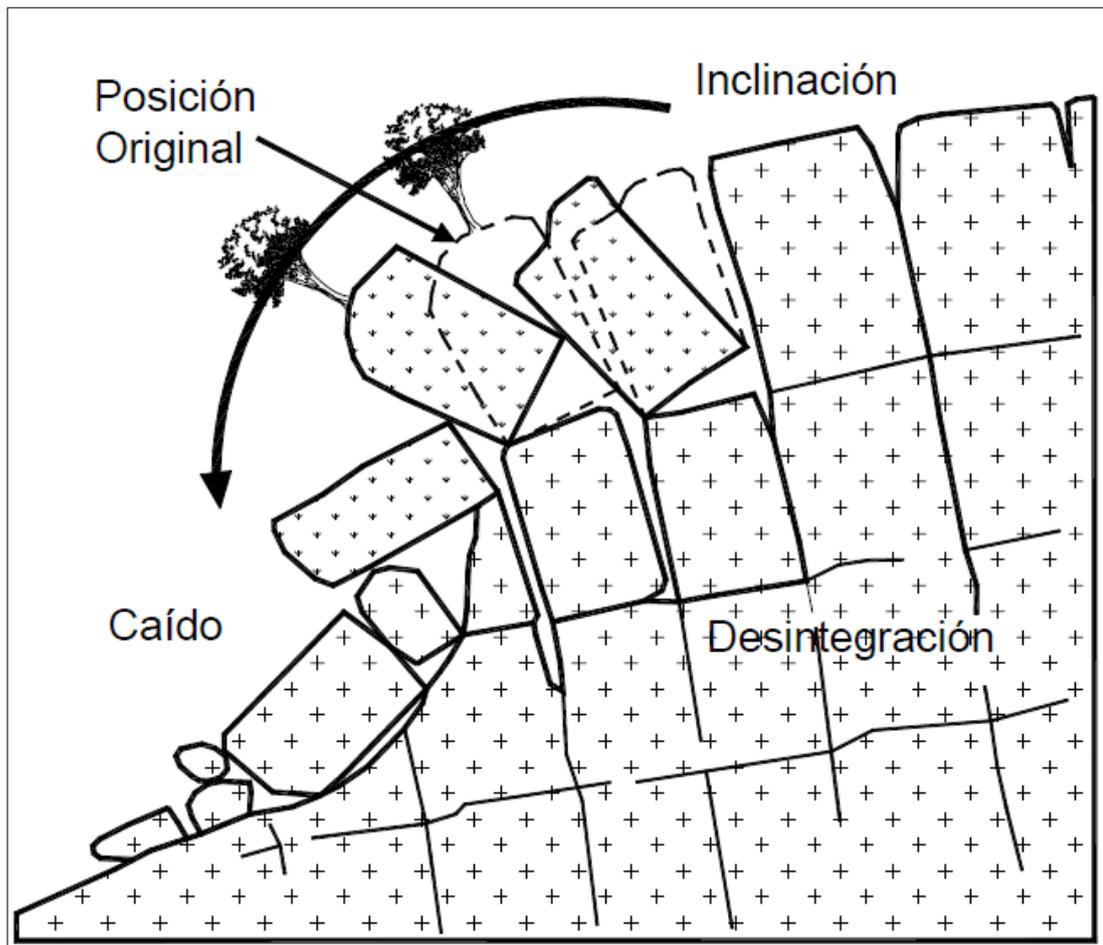
La elección de la posición z_i puede ser una influencia significativa en la convergencia del método. Si se toma una mala suposición de la posición z_i para una superficie dada, puede ser imposible satisfacer las condiciones de equilibrio (el algoritmo puede no converger). Las alturas z_i sobre la superficie de deslizamiento se establecen aproximadamente a un tercio de la altura de la interfaz entre bloques.

3.8.2.1 Efecto del Agua

Suárez (1998), señala que:

El agua es un agente externo muy determinante en la estabilidad o no de un talud o ladera. Se hace necesario mencionar que éste elemento (agua) propicia las fallas temidas en los taludes, pues su efecto es reducir la resistencia del suelo que

compone la estructura del talud o ladera y aumentan a través de cargas los esfuerzos que hay en éste.



Desintegración, inclinación y caídos en un macizo rocoso. Fuente: CAPECO.

Por los antecedentes en las obras y a través de la historia se rescata un aspecto fundamental y trascendental; y es que el agua es un factor determinante cuando se habla de falla o superficie de falla en taludes. Este elemento, el agua, tiene el efecto de aumentar la masa del suelo haciendo que el talud y/o ladera disminuya en cuanto a su resistencia por absorción del mismo. También este elemento produce una erosión interna en el talud, causado por la presión de poros del estrato.

3.8.2.2 Tablas de Janbú

Janbú presentó tablas y/o ábacos que han permitido el estudio y análisis de un suelo o roca en las condiciones geológicas que éste se encuentre.

Estas tablas (ver Anexo N°2) han sido planteadas para dos situaciones o estado de suelos: Tablas para suelos cohesivos y Tablas para suelos friccionantes.

Janbu a través del uso de sus tablas de Análisis nos muestra el objetivo de estas tablas, el cual es: En suelos cohesivos, calcular el Factor de Seguridad que presentan los suelos que componen la estructura de determinado talud o ladera en estudio; y en suelos friccionantes, calcular el Factor de Seguridad y ubicar el círculo crítico que presentan éstos suelos en el análisis del talud en cuestión.

En el Anexo N°2 se detallan paso a paso el proceso de cómo usar las Tablas de Janbu para cada tipo de suelo (cohesivo y friccionante).

3.8.3 MÉTODO DE ANÁLISIS DE SPENCER

Suárez (1998), señala que:

El Método de Spencer a diferencia del Método de Janbu , es un método donde se da el equilibrio tanto de momentos como de esfuerzos. Este método basado en hipótesis más reales para un estricto análisis y cálculo del Factor de Seguridad (F.S.) de un talud, basándose en la Teoría de las rebanadas.

A través de paso del tiempo usando este método, se ha apreciado su precisión y aplicación para casi todo tipo de geometría de talud y perfiles de suelo que se presente en la zona de estudio. Se hace necesario mencionar que el presente método tiene un procedimiento de equilibrio completo tanto de fuerzas como de momentos, facilitando de este modo el cálculo del factor de seguridad.

3.8.3.1 Diferencias con otros métodos

Es un método con más capacidad de análisis y criterios sumamente reales que conlleva a un análisis más exacto y más confiable en ciertos tipos de talud.

3.8.3.2 Análisis para el cálculo del Factor de Seguridad para Estabilidad de Taludes.

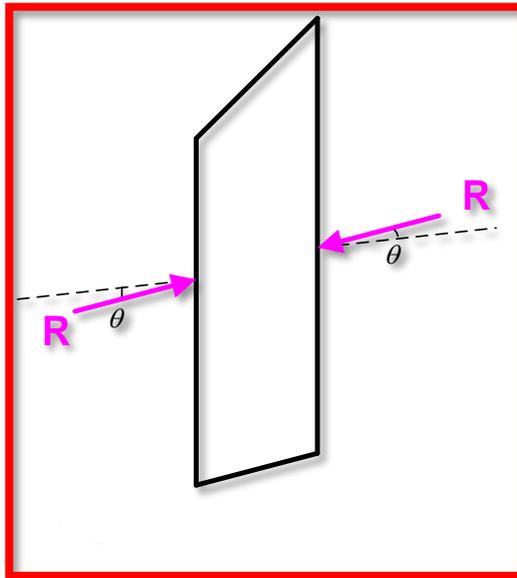
Spencer al igual que los demás estudiosos acerca del tema realizó un análisis específico del F.S., considerando como referencia principal al análisis por rebanadas, es ahí donde aplica sus hipótesis y criterios el cual lo lleva a un cálculo más exacto y más confiable acerca del F.S.

3.8.3.3 Hipótesis básicas que considera Spencer.

Suárez (1998), señala que:

La hipótesis principal que considera Spencer es la interacción de las rebanadas vecinas, para lo cual genera una fuerza de acción con un ángulo de inclinación constante. Ésta inclinación específica de estas fuerzas entre las partículas, es una interrogante y es una de las incógnitas en la solución de las ecuaciones de equilibrio planteadas.

El método Spencer fue planteada para superficies circulares pero puede extenderse con facilidad a superficies no circulares.

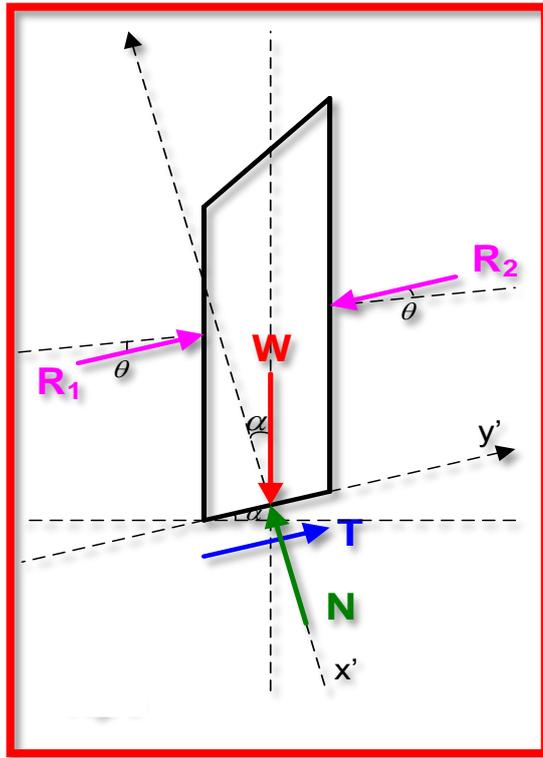


Fuente: Spencer, 1968.

3.8.3.4 Deducción de fórmulas en función a la Hipótesis de Spencer

Suárez (1998), señala que:

Spencer ha planteado ecuaciones tanto para equilibrio de fuerzas como para el equilibrio de momentos. Éstos en su desarrollo calculan los factores de seguridad F y los ángulos de inclinación de las fuerzas existentes entre dovelas, θ .



Fuente: Spencer, 1968.

$$R = (R_2 - R_1)$$

Por deducción tenemos:

$$T = \frac{c'l + N' \cdot \tan \phi'}{F.S} \dots\dots\dots (1)$$

$$N = N' + u = N' + u.l \dots\dots\dots (2)$$

$$\sum F_{x'} = 0$$

$$N - W \cos \alpha + R \sin(\alpha - \theta) = 0 \dots\dots\dots (3)$$

$$\sum F_{y'} = 0$$

$$T - W \sin \alpha - R \cos(\alpha - \theta) = 0 \dots\dots\dots (4)$$

Reemplazamos (2) en (3):

$$N + u - W \cos \alpha + R \sin(\alpha - \theta) = 0 \quad \dots\dots(5)$$

Reemplazamos (1) en (4):

$$\frac{c'l}{F} + \frac{N' \cdot \tan \phi'}{F} - W \sin \alpha - R \cos(\alpha - \theta) = 0 \quad \dots\dots(6)$$

Despejando N' de (5):

$$N' = W \cos \alpha - R \sin(\alpha - \theta) - u \quad \dots\dots(7)$$

Reemplazamos (7) en (6):

$$\frac{c'l}{F} + (W \cos \alpha - R \sin(\alpha - \theta) - u) \cdot \frac{\tan \phi'}{F} - W \sin \alpha - R \cos(\alpha - \theta) = 0$$

$$\frac{c'l}{F} + (W \cos \alpha - u) \frac{\tan \phi'}{F} - R \sin(\alpha - \theta) \frac{\tan \phi'}{F} - W \sin \alpha - R \cos(\alpha - \theta) = 0$$

Factorizando "R", obtenemos la ecuación (8):

$$R \left[\sin(\alpha - \theta) \frac{\tan \phi'}{F} + \cos(\alpha - \theta) \right] = \frac{c'l}{F} + (W \cos \alpha - u) \frac{\tan \phi'}{F} - W \sin \alpha$$

Dividimos (8) por $\cos(\alpha - \theta)$:

$$R \left[\frac{\sin(\alpha - \theta) \left(\frac{\tan \phi'}{F} \right) + \cos(\alpha - \theta)}{\cos(\alpha - \theta)} \right] = \left[\frac{c'l}{F} + (W \cos \alpha - u) \frac{\tan \phi'}{F} - W \sin \alpha \right] \cdot \frac{1}{\cos(\alpha - \theta)}$$

$$R \left[1 + \frac{\tan(\alpha - \theta) \cdot \tan \phi'}{F} \right] = \left[\frac{c'l}{F} + (W \cos \alpha - u) \frac{\tan \phi'}{F} - W \sin \alpha \right] \cdot \frac{1}{\cos(\alpha - \theta)}$$

$$R = \frac{\frac{c'l}{F} + (W \cos \alpha - u) \frac{\tan \phi'}{F} - W \sin \alpha}{\cos(\alpha - \theta) \cdot \left(1 + \frac{\tan(\alpha - \theta) \cdot \tan \phi'}{F} \right)} \quad \dots\dots\dots (9)$$

Reemplazamos (9) en (7):

$$N' = W \cos \alpha - \left[\frac{\frac{c'l}{F} + (W \cos \alpha - u) \frac{\tan \phi'}{F} - W \operatorname{sen} \alpha}{\cos(\alpha - \theta) \left(1 + \frac{\tan(\alpha - \theta) \cdot \tan \phi'}{F} \right)} \right] \operatorname{sen}(\alpha - \theta) - u$$

$$N' = W \cos \alpha - \left(\frac{\frac{c'l}{F.S} + (W \cos \alpha - u) \frac{\tan \phi'}{F.S} - W \operatorname{sen} \alpha}{\frac{1}{\tan(\alpha - \theta)} + \frac{\tan \phi'}{F.S}} \right) - u \quad \dots\dots(10)$$

Ec. General (para F.S.)

$$F.S = \frac{c'.la + \tan \phi'. \sum N'}{\sum W. \operatorname{sen} \alpha}$$

Reemplazamos (10) en la Ec. general:

$$F.S = \frac{c'.la + \tan \phi'. \sum \left[W \cos \alpha - \left(\frac{\frac{c'l}{F.S} + (W \cos \alpha - u) \frac{\tan \phi'}{F.S} - W \operatorname{sen} \alpha}{\frac{1}{\tan(\alpha - \theta)} + \frac{\tan \phi'}{F.S}} \right) - u \right]}{\sum W. \operatorname{sen} \alpha}$$

CAPITULO IV

ESTABILIDAD DE TALUDES EN LA OBRA “AMPLIACIÓN Y ASFALTADO DE LA CARRETERA PAUCARTAMBO – CARHUAMAYO”

Este capítulo contiene datos del expediente técnico de la obra en mención, los cuales son proporcionados por la Municipalidad Distrital de Paucartambo, con permiso del Gobierno Regional de Pasco/ Provias Departamental del MTC.

4.1 ASPECTOS GENERALES

4.1.1 Objetivo

La finalidad del presente estudio es proporcionar información relevante sobre la geología, sobre el comportamiento estructural, geodinámico y geotécnico, del suelo y del sustrato rocoso a lo largo del trazo de la carretera Carhuamayo - Paucartambo, buscando identificar situaciones eventualmente problemáticas bien sea que representen riesgo potencial o que constituyan limitantes técnicos o económicos; dentro de este contexto, este trabajo tiene por objeto proporcionar los parámetros de diseño inherentes.

Con este propósito, se ha estudiado el comportamiento geomecánico del suelo en los puntos críticos identificados a lo largo del trazo, mediante muestras tipo y se ha recopilado información de campo complementaria, la cual ha sido plasmada en los planos.

4.1.2 Ubicación y Acceso

El proyecto se ubica entre las localidades de Carhuamayo y Paucartambo, (progresivas 0+000 - 45+300) las cuales se encuentran comprendidas dentro de la jurisdicción política de las provincias de Carhuamayo, departamento de Junín y de Pasco en el departamento de Pasco, respectivamente.

La ubicación geográfica de las ciudades de Carhuamayo y Paucartambo corresponde a las coordenadas geográficas UTM: 8 792 986 N - 385 320E y 8 807 469 N - 409 625 E, y se encuentran emplazadas a una altitud de 4 169 m.s.n.m. y 3 100 m.s.n.m. respectivamente

El acceso se realiza de acuerdo al itinerario detallado en el cuadro adjunto.

CARRETERA	TRAMO	TIPO	DISTANCIA(Km)
Central	Lima - Carhuamayo	Asfaltada	265.0
Carhuamayo - Paucartambo	Carhuamayo - Paucartambo	Afirmada	48.0
Total			313.0

Fuente: Municipalidad Distrital de Paucartambo(MDP).

4.2 CONTEXTO GEOLÓGICO

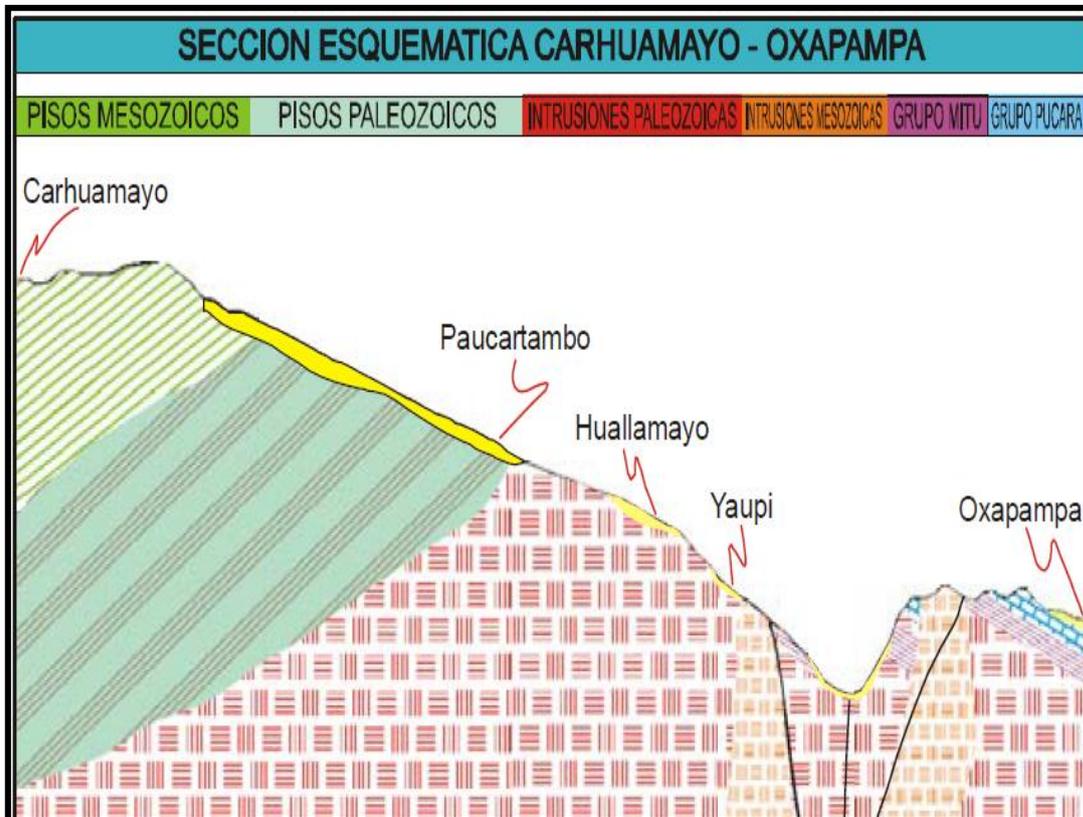
4.2.1 Contexto Geológico Regional

El proyecto se desarrolla entre la altiplanicie cordillerana andina y el valle intra-andino del río Paucartambo, aproximadamente a lo largo de una sección longitudinal de 45 Km, con una variación de cotas de 1069 m, lo cual implica la posibilidad de observar la construcción geológica del núcleo cordillerano a través de un corte vertical significativo.

La exposición de afloramientos a lo largo del proyecto nos permitió construir la respectiva columna estratigráfica regional, la cual está conformada por una pila sedimentaria de edad paleozoica a mesozoica sobreyaciendo y en ocasiones parcialmente intruída por un complejo plutónico constituido por granitoides de edad paleozoica - mesozoica.

En el Tope de la columna se observa una acumulación de sedimentos inconsolidados de edad Pleistocena - Holocena constituido básicamente por

material morrénico y morrenas re trabajadas por acción fluvial, depositados en depresiones intracordilleranas y en los flancos de las artesas glaciares donde afloran como terrazas y remanentes de terrazas colgadas.



Sección total de la red vial de la región. Fuente: IGN.

Infrayaciendo a los sedimentos recientes se observa la secuencia carbonatada estudiada en la región central como Grupo Pucará de edad Triásica superior a Jurásica inferior la cual está básicamente constituida por bancos gruesos de calizas nodulares y fosilíferas emplazadas en afloramientos plegados, potentes y muy típicos, los cuales suelen asociarse a bancos de travertino de origen relativamente reciente derivados de la disolución de la caliza antigua, como puede observarse en las inmediaciones de Oxapampa.

Los horizontes del Grupo Pucará los observamos en las líneas de cumbres en las cercanías de Carhuamayo como afloramientos puntuales, al estar parcialmente cubiertos por material cuaternario.

Debajo del Grupo Pucará se aprecia el afloramiento de horizontes vulcano - sedimentarios constituidos por derrames, brechas de explosión, aglomerados y tufos brechoides de composición predominantemente andesítica y dacítica con intercalaciones esporádicas de capas delgadas de caliza y areniscas grawacas, los cuales afloran con pseudoestratificación y son conocidos regionalmente como Grupo Mitu, correspondiéndoles una edad Pérmica media.

Localizamos al Grupo Mitu en las proximidades de Carhuamayo, a partir de la progresiva 17+000. Siguiendo el patrón geológico - estructural que perfila la arquitectura andina, en la región de alta cordillera, en las proximidades de Carhuamayo, por debajo del Grupo Mitu y desde una perspectiva Regional (7) afloran pisos sedimentarios del Carbonífero y del Devónico.

Los primeros representados por los Grupos Tarma y Ambo, constituidos respectivamente, por estratos intercalados de lutitas y calizas claras y, por capas de areniscas, lutitas carbonosas y ocasionalmente tufos volcánicos; esta litología no es apreciable localmente a lo largo de la carretera por cuanto en este sector los afloramientos se encuentran enmascarados por acumulaciones morrénicas.

COLUMNA ESTRATIGRAFICA AREA HUACHON - HUANCABAMBA				
EDAD	NOMBRE	COLUMNA	DESCRIPCION LITOLOGICA	ROCAS INTRUSIVAS
CUATERNARIO			Acumulaciones Morrénicas, Depósitos Coluviales y Fluviales.	Complejo de granitoides de composición monzogranítica a granodiorítica; rocas holocristalinas inequigranulares, con fenos de Cuarzo, Plagioclasa y Ortosa; la granodiorita es más equigranular y de grano medio; los fenos del monzogranito evidencian deformación cataclástica incipiente. Granodiorita Monzogranito
NEOGENO	FORMACION LANTORACHE		Volcánicos Andesíticos Pseudoestratificados en capas delgadas Interca-lados con lutitas	
TRIASICO - JURASICO	GRUPO PUCARA		Predominantemente calizas clásticas y micríticas, fosilíferas con nódulos de chert gris en bancos gruesos.	
PERMICO	GRUPO MITU		Tufos andesíticos, aglomerados y brechas de explosión.	
MISSISSIPIANO	GRUPO AMBO		Derrames traquiandesíticos y aglomerados hacia la base	
SILURICO - DEVONICO	GRUPO EXCELSIOR		Areniscas arcósicas -cuarzosas intercaladas con horizontes de lutitas grises y ocasionalmente cuarcitas blancas.	
PALEOZOICO Inf. - PRECAMBRIANO	COMPLEJO BASAL METAMORFICO		Esquistos cloríticos - muscovíticos, epizonales con fuerte vetilleo de cuarzo intrafoliar	

Fuente: IGN.

La litología que se emplaza al piso de la pila sedimentaria corresponde a una secuencia lutácea intercalada con areniscas pizarrosas con foliación acentuada y fuerte fracturamiento que en la región central, entre las localidades de Carhuamayo y Paucartambo, se estudia como Grupo Exelsior, asignándosele una edad Silúrica - Devónica, (8) por tanto, constituye la roca sedimentaria más antigua que aflora en la región y solo la podemos reconocer desde un perspectiva macro, puesto que, localmente, a lo largo del trazo de la carretera, los respectivos afloramientos se encuentran cubiertos por material morrénico.

En la base de la columna se observan rocas metamórficas epizonales(9) constituidas por esquistos verdes de muscovita - sericita – clorita con ocasionales porfiroblastos de cuarzo, las cuales se observan intruidas por un complejo plutónico de granitoides de composición monzogranítica a granodiorítica en los que se aprecia de manera muy característica fenocristales de cuarzo, ortosa y plagioclasa en un agregado holocristalino e inequigranular que en algunos sectores presentan fenos de cuarzo con incipiente grado de deformación cataclástica, lo que nos sugiere que se trata de cuerpos intrusivos muy antiguos, consolidados a considerable profundidad, por lo que en nuestra opinión se trata de emplazamientos de edad paleozoica inferior.

Intruyendo a los granitoides descritos en el párrafo anterior, observamos otro episodio intrusivo, obviamente más joven, constituido predominantemente por una granodiorita leucócrata, holocristalina y equigranular, de grano mucho más fino que corta la secuencia del Mitu y por fallamiento se localiza a nivel de las calizas Pucará incluso, por lo que le asignamos una edad Paleozoica superior a Mesozoica inferior.

4.3 GEOLOGÍA DE LA CARRETERA CARHUAMAYO - PAUCARTAMBO

4.3.1 Estratigrafía

La columna estratigráfica evidenciada a lo largo de la carretera, entre las localidades de Carhuamayo y Paucartambo, nos muestra un basamento plutónico antiguo que intruye a rocas finis paleozoicas y que soporta los niveles sedimentarios parcialmente erosionados de rocas mesozoicas; pisos sedimentarios más recientes, de edad cenozoica se encuentran ausentes por erosión, ya que, según se explicó en el capítulo precedente, la región ha experimentado un sollevamiento acelerado durante los episodios finales de la tectónica andina.

4.3.1.1 Depósitos Morrénicos

Afloran como cobertura entre las progresivas 0+000 y 43+620 y esencialmente consiste en acumulaciones de material inconsolidado de origen criogénico, generado durante la época glacial pleistocénica y depositado en depresiones intracordilleranas como la meseta de Junín sobre la que se emplaza la ciudad de Carhuamayo y, a lo largo de los fondos y de los flancos de los valles altoandinos y consisten de agregados mal clasificados de fragmentos de roca ($> 3'' \text{Ø}$), grava, arena y limo.

Los remanentes morrénicos enmascaran parcialmente el sustrato rocoso a lo largo de los primeros 43 Km del proyecto que comprende el segmento entre la altiplanicie andina sobre los 4 000 m.s.n.m. y aproximadamente la cota 2 800 en el valle del río Paucartambo.

4.3.1.2 Grupo Pucará

Constituye el tope de la columna estratigráfica al nivel de erosión actual, se le observa como afloramientos aislados a lo largo del proyecto, particularmente entre las progresivas 12+700 y 33+300; los afloramientos son relativamente pequeños y se encuentran parcialmente enmascarados por el material cuaternario.

Los horizontes del Pucará corresponden a los niveles inferiores del grupo y consisten de pisos de caliza clástica con horizontes nodulares de chert gris(13) los cuales resultan muy característicos de esta unidad litológica.

El grupo Pucará sobreyace mediante discordancia angular a los estratos paleozoicos del Grupo Mitu y ha sido datado en el periodo comprendido entre el triásico superior y el jurásico inferior, en el mesozoico.

4.3.1.3 Grupo Mitu

La secuencia del Grupo Mitu aflora localizadamente entre las progresivas 16+900 y 35+400 y consiste de una secuencia pseudoestratificada de aglomerados, brechas de explosión y tufos ignimbríticos de composición predominantemente andesítica y de color rojo grisáceo, con intercalaciones locales de capas dacíticas; la fotografía adjunta muestra un afloramiento de tobas ignimbríticas con disyunción columnar que sugiere un proceso deposicional violento y de enfriamiento rápido. Esta unidad litológica aflora subyaciendo al Grupo Pucará y sobreyaciendo al complejo plutónico basal en una relación de contacto no del todo clara; en gran parte de los afloramientos aparentemente sobreyace mediante discordancia erosional, localizadamente se observa una relación de contacto penetrativo con unidades intrusivas más jóvenes. El grupo Mitu ha sido datado al tope de la columna paleozoica y marca la transición entre el Paleozoico y el Mesozoico, específicamente en el Pérmico medio y probablemente abarque hasta el Triásico inferior.

4.3.1.4 Rocas Intrusivas

Conforman el basamento local, a la vez que el núcleo de la Cordillera Andina, se las observan mediante afloramientos aislados, constituyendo un complejo relativamente diferenciado, a partir de la progresiva 27+300. Los afloramientos observados generalmente consisten de una roca intrusiva leucócrata, holocristalina, inequigranular de grano grueso, de composición predominantemente monzogranítica, con variaciones locales a granodiorítica, se caracteriza por presentar grandes fenos de cuarzo, plagioclasa y ortosa, los cuales sugieren que su génesis se relaciona con un cuerpo magmático consolidado a gran profundidad y sometido a un proceso de enfriamiento muy lento, condiciones que se corresponden con intrusiones muy antiguas, sobre todo si esta observación la complementamos con el nivel estratigráfico de su emplazamiento; lo anterior nos permite concluir que su edad de emplazamiento se ubica en el paleozoico medio a inferior.

Adicionalmente hemos podido apreciar que el plutón descrito hospeda intrusiones menores a manera de stocks, emplazadas a niveles más altos, puesto que intruyen niveles estratigráficos post - Pérmicos y que se caracterizan por ser equigranulares, de grano medio a fino y de composición más silícea, las cuales corresponden genéticamente a pulsaciones tardías desarrolladas durante el paleozoico superior y probablemente durante el mesozoico inferior. En gran parte del trayecto, los intrusivos se encuentran meteorizados por procesos químicos dando lugar a un suelo constituido por una arena silícea gruesa, puesto que los feldespatos han sido eliminados por descomposición a arcillas caolínicas que posteriormente han sido movilizadas (lavadas) por agentes atmosféricos.

4.4 ASPECTOS GEODINÁMICOS

El concepto de geodinámica se refiere a todos los procesos de transformación física y química, que operan ininterrumpidamente en la corteza terrestre modificando su morfología y estructura, estos procesos pueden ser de naturaleza endógena o exógena, es decir, pueden relacionarse con fenómenos planetarios internos y con fenómenos claramente perceptibles en su superficie.

Por consiguiente, según el nivel cortical en el cual se originan y desarrollan los fenómenos de geodinámica, podemos discriminar los eventos geodinámicos en procesos externos e internos. Algunos de estos fenómenos operan en periodos a escala geocronológica con pocas o nula probabilidad de afectar el proyecto, mientras que otros pueden acontecer casi inopinadamente incidiendo negativamente en el mismo, por lo que en este capítulo buscamos identificarlos y definir la probabilidad de riesgo. En la zona del proyecto, los procesos de geodinámica son particularmente intensos a lo largo de las vertientes del río Paucartambo a partir de la progresiva 34+000 adquieren diversas características en concordancia con los rasgos climatológicos y estructurales que muestra cada área en particular del proyecto.

4.4.1 Geodinámica Externa

Involucra los procesos geodinámicos que operan en la parte superior o externa de la corteza y que eventualmente pueden incidir en algún aspecto sobre el proyecto; la región donde se emplaza el proyecto presenta un moderado impacto en este sentido, básicamente hemos identificado como fenómenos de riesgo potencial: creep y deslizamientos puntuales debido a falta de cohesión del suelo.

La geodinámica externa se muestra más enérgica en las áreas donde las condiciones climáticas son más rigurosas sobre todo en lo que respecta a volúmenes de precipitación pluviométrica y a amplios rangos de oscilación térmica en la temperatura ambiente, por consiguiente, la zona correspondiente a las partes intermedias (cotas 2000 - 3000) del valle del río Paucartambo, constituye un lugar donde los efectos son más perceptibles.

4.4.1.1 Creep

Fenómeno también conocido como reptación de laderas, se refiere al movimiento descendente del suelo debido a las fuerzas gravitacionales, las cuales actúan sobre cada partícula durante los movimientos de recuperación que experimenta esta luego de ser afectada por procesos físicos de carácter cíclico, como por ejemplo la humectación y desecación o la dilatación y contracción por efecto térmico que eventualmente pueden tener una recurrencia de una o más veces por día; bajo estas circunstancias las fuerzas gravitacionales desvían los movimientos condicionando una resultante de desplazamiento del suelo ladera abajo; una vez que el efecto que condiciona el movimiento inicial de las partículas cesa, el suelo adquiere condiciones de asentamiento relativamente estables. La reptación de laderas se observa de manera perceptiblemente intensa, como puede apreciarse en las fotografías adjuntas, a partir de la progresiva 36+300 en ambos flancos del valle del río Paucartambo.

Por definición, el creep es un fenómeno de lenta evolución e inevitable y que eventualmente podría incidir sobre la estabilidad de la plataforma de rodadura entre las progresivas 36+400 y 43+600 pero cuyos efectos también pueden mantenerse bajo cierto control mediante la forestación de laderas con especies arbóreas de raíces profundas como el eucalipto que ha mostrado grandes condiciones de adaptabilidad a la zona y, mediante las medidas que se proponen más adelante.



Fuente: MDP.

4.4.1.2 Deslizamientos

Representan un riesgo potencial y localizado; se relacionan genéticamente con masas de suelo de baja cohesión sobresaturada y gravitacionalmente inestable; constituyen fenómenos muy dinámicos y altamente destructivos donde el elemento

detonante se relaciona con la alteración de las condiciones de equilibrio por los cortes de carretera y por efectos de sobresaturación ya que el agua contenida en los intersticios del suelo modifica el factor de cohesión proporcionándole al suelo características plásticas o incluso, en caso extremo, lo induce a adoptar un comportamiento líquido ante la influencia de la gravedad, en tales circunstancias se genera un fenómeno conocido como soliflucción. El sector que muestra cierta susceptibilidad a sufrir los efectos de este tipo de fenómenos es coincidente con la zona donde se verifica el proceso de reptación de ladera, entre las progresivas 36+300 y 45+300; a la altura de la progresiva 37+280, hemos investigado la sensibilidad del talud al deslizamiento; los resultados se exponen en el acápite pertinente a la geotecnia del proyecto.

4.5 GEOTECNIA DEL PROYECTO

4.5.1 Tipología de Suelos

Los procesos de intemperismo que alteran y disgregan la roca para finalmente convertirla en el agregado clástico residual que identificamos como suelo consisten de una acción combinada de fenómenos de disgregación mecánica y química, estas condiciones de meteorización se encuentran fuertemente influenciadas por los dominios morfoclimáticos, por tanto, dan lugar a distintos tipos de suelos dependiendo del ambiente en el que evolucionan y del tipo e intensidad de la interacción de los agentes vinculados a los distintos eventos geodinámicos que inducen al transporte de dicho material, de esta manera, el contexto edafológico del proyecto podemos segmentarlo según la clasificación SUCS, de la siguiente manera:

- **Grava - Limo - Arena (GM-GS):** - Guardan relación genética con los depósitos morrénicos, incluyen contenido subordinado de arcilla glaciar (till) y fragmentos de roca subangulares a subredondeados, heterométricos, multimodales y polimícticos, se emplazan predominantemente entre las progresivas 0+000 y 40+000.

- **Grava - Arena (G-GS):** - Se relacionan genéticamente con terrazas aluviales y conos fluvio - aluvionales y consisten de un agregado mal a incipientemente clasificado de bloques y fragmentos de roca subredondeados a redondeados, heterométricos y polimícticos con frecuencias multimodales, en una matriz de arena gruesa a fina con contenido subordinado de limo; se observa este tipo de suelo característicamente en la localidad de Paucartambo, a partir de la progresiva 43+200.

- **Arena (S):**- Este tipo de suelo constituye el producto residual de la meteorización química de los granitoides monzograníticos - granodioríticos, se emplaza como coluvio y eluvión en las laderas de fuerte pendiente, en condiciones de acentuada inestabilidad o estabilidad precaria y consiste de una arena silíceo gruesa originada por alteración a arcilla caolínica de los feldespatos potásico y sódico (ortosa y plagioclasa, respectivamente) con lo que se liberan los fenocristales de cuarzo inicialmente contenidos en la roca madre, los cuales son básicamente inalterables por los fenómenos de intemperismo químico, dando lugar a un agregado granular de partículas de cuarzo del diámetro de la arena que en los casos en los que constituye material eluvial se acompañan por una matriz arcillosa, mientras que cuando el material adquiere un carácter coluvial la arcilla se muestra muy disminuida o casi ausente por el arrastre a causa de la escorrentía; este tipo de suelo se observa a partir de la progresiva 36+300, donde puede generar problemas de estabilidad de taludes.

4.5.2 Estabilidad de Taludes

A lo largo del proyecto hemos identificado algunos puntos críticos que eventualmente pueden presentar problemas de estabilidad de taludes, la cual guarda relación de causalidad con los siguientes factores:

- Suelos poco cohesivos.
- Suelos sobresaturados.

En general la estabilidad de cualquier talud está condicionada a una no alteración de las condiciones de equilibrio límite, básicamente relacionadas con los parámetros de cohesión, fricción interna y densidad, los cuales a su vez están en función de un conjunto de factores de tipo geológico, geomorfológico, hidrológico y edafológico.

A efectos de estudiar las condiciones de estabilidad así como los ángulos de corte óptimos, procedimos a investigar las condiciones geomecánicas de los suelo tipo mediante 2 muestras de suelos granulares, rotuladas como: MT1-C y T1-280, las mismas que se remitieron al laboratorio de geomecánica, obteniéndose los resultados reportados en el anexo N°2, los cuales nos han servido para elaborar un modelo de estado de equilibrio límite de la masa de terreno potencialmente inestable que nos ocupa, a partir de las leyes de la estática y según el método de cálculo de Janbú, con ayuda del software Geo-Slope, con cuyo soporte hemos procedido al respectivo análisis.

Nuestro objetivo es lograr cuantificar el grado de estabilidad que muestra el talud a través de un factor de seguridad (**FS**) que se genera a partir del cociente entre la resistencia al corte en la superficie de deslizamiento y la resistencia necesaria para mantener en equilibrio la masa eventualmente deslizante; como la superficie de rotura potencial nos resulta desconocida, para fundamento del análisis asumimos planos de falla hipotéticos basados en el conocimiento empírico y en el fundamento teórico ampliamente documentado, por consiguiente, el método permite un cierto nivel probabilístico en el intento de aproximación a la superficie de falla más crítica, por lo que corremos el programa informático con los parámetros de las superficies de rotura hipotéticas, simulando condiciones pseudoestáticas (influencia de fuerzas sísmicas) para el nuevo perfil luego del corte de carretera.

El resultado de nuestra simulación nos permite obtener el respectivo factor de seguridad (**FS**) para la superficie de falla más crítica (menor valor de **FS**); los resultados obtenidos pueden observarse en las figuras N° 8, N° 9 y N° 10, donde los muros de retención esquematizados solo tienen un valor ilustrativo.

Los casos estudiados son los siguientes:

- **Progresiva 15+010:** En este sector elegimos una sección representativa donde el talud consiste en un suelo de naturaleza criogénica, formado por un agregado de fragmentos subangulares de roca en una matriz de grava y limo, con fracción areno - arcillosa en contenido subordinado; el material lo clasificamos como GM (Clasificación SUCS); las propiedades geomecánicas correspondientes a este tipo de material se investigaron a partir de una muestra de suelo que fue remitida al laboratorio de mecánica de suelos rotulada como MT1-C; los resultados reportados por el laboratorio así como los obtenidos luego de nuestra simulación de las condiciones de estabilidad del talud,(21) pueden observarse en el cuadro adjunto:

Densidad γ	Cohesión C	Rozamiento ϕ	FS Estático	FS Pseudoestático	FS Estático Proyectado	FS Pseudoestático Proyectado
1.60	0.00 Kg/cm ²	26.5°	0.75	0.67	1.80	1.53

Fuente: MDP

Del análisis del cuadro anterior y de la figura N° 8 concluimos que el talud de corte de este sector con una razón 4:1, sobre material morrénico, con las características geométricas que presenta el perfil topográfico, deviene en inestable, sobretodo bajo condiciones de sismicidad moderada; la simulación de las condiciones de estabilidad del talud luego de incluir un muro de retención del tipo gavión de caja al pie del talud, logra indicadores de estabilidad dentro de un rango aceptable (**FS** Proyectado).

Progresiva 21+640: El talud en este punto consiste de material morrénico conformado por un agregado de fragmentos subangulares de roca en una matriz de grava y limo, con fracción areno - arcillosa en contenido subordinado; el material lo clasificamos como GM (Clasificación SUCS); sus propiedades geomecánicas conjuntamente con los factores de seguridad calculados luego de simular las condiciones de estabilidad del talud, los reseñamos en el cuadro siguiente:

Densidad γ	Cohesión C	Rozamiento Φ	FS Estático	FS Pseudoestático	FS Estático Proyectado	FS Pseudoestático Proyectado
1.60	0.00 Kg/cm ²	26.5°	0.34	0.29	1.23	1.01

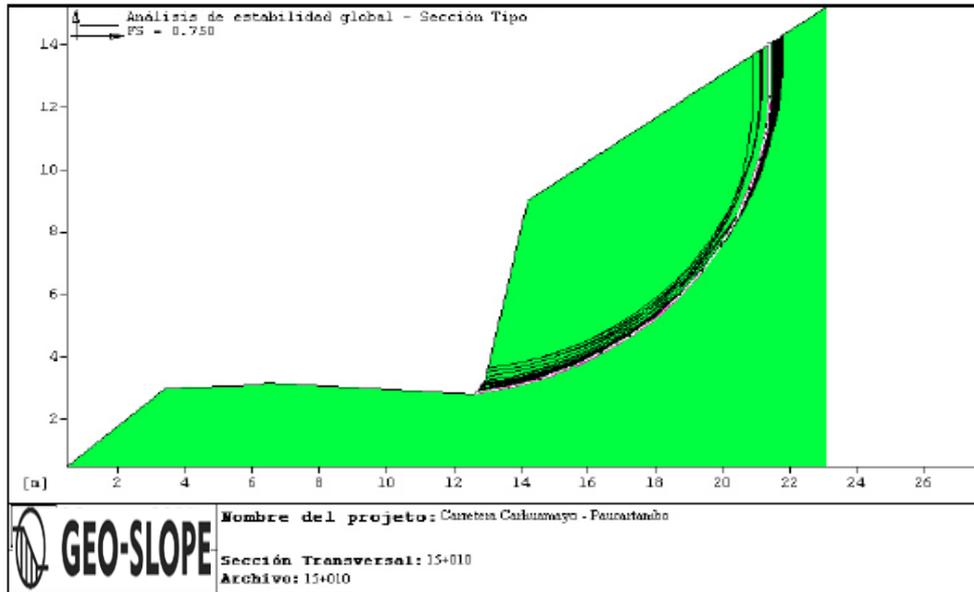
Fuente: MDP.

A partir de lo expuesto en el cuadro anterior y de la figura N° 9, concluimos que la geometría de la sección tal como ha sido proyectada a priori, es altamente inestable; el problema es reversible si se proyecta una estructura de retención al pie del talud del tipo gavión y se amplía el ancho de la plataforma de la banqueta al menos a 3.8 m, como sugiere la figura simulada, resultado que proporciona indicadores de seguridad dentro del rango aceptable (**FS Proyectado**).

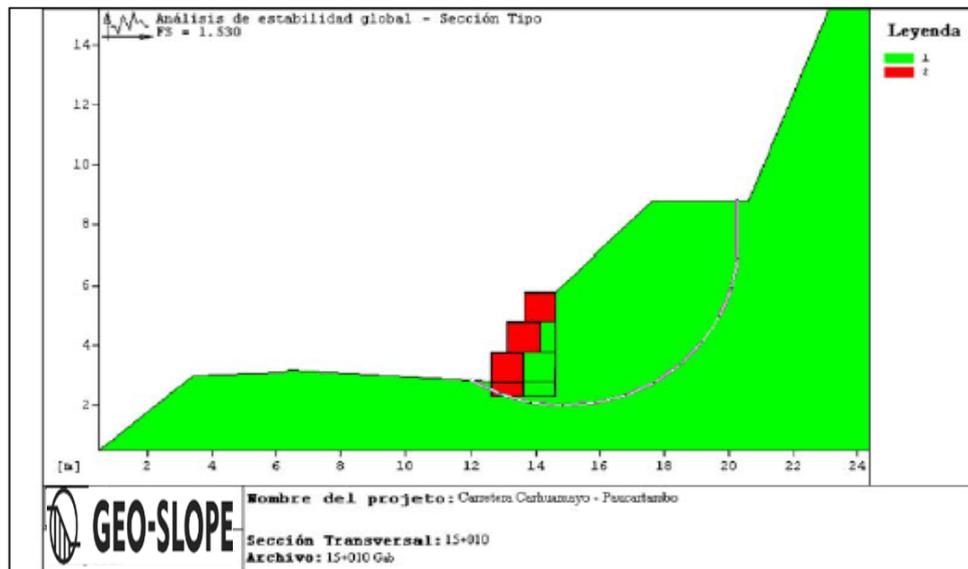
Basado en lo anterior, recomendamos modificar la premisa geométrica del diseño del talud entre las progresivas 21+630 y 21+660, y diseñar un muro de retención según la geometría de terreno.

Figura N° 8

Parámetros Geomecánicos				
Cohesión C	Fricción Interna	Peso Específico γ	FS Estático	FS Pseudoestático
0.00 Kg/cm ²	26.5°	1.6	0.75	0.67



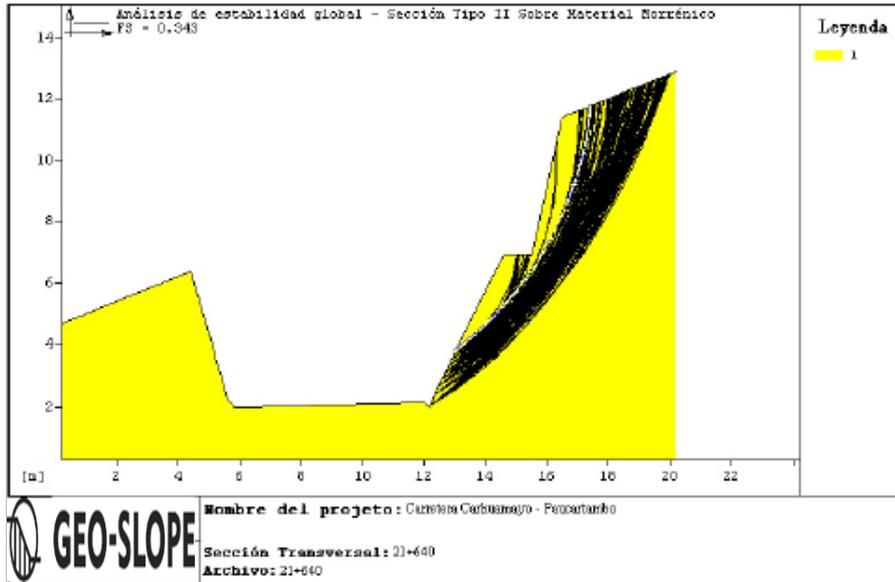
Talud estabilizado con Gaviones	
FS Estático	FS Pseudoestático
1.80	1.53



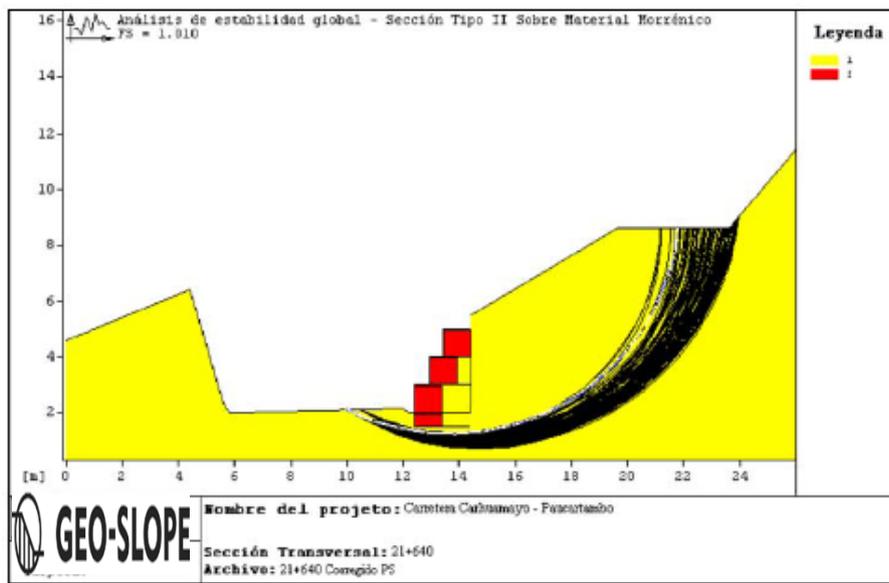
Fuente: GEO - SLOPE

Figura N° 9

Parámetros Geomecánicos				
Cohesión C	Fricción Interna	Peso Específico γ	FS Estático	FS Pseudoestático
0.00 Kg/cm ²	26.5°	1.6	0.34	0.29



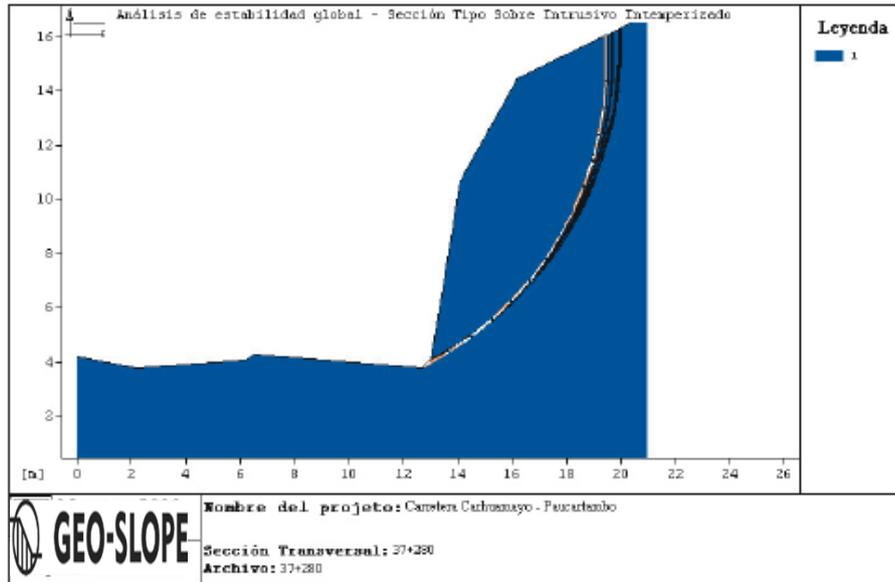
Talud estabilizado con Gaviones	
FS Estático	FS Pseudoestático
1.23	1.01



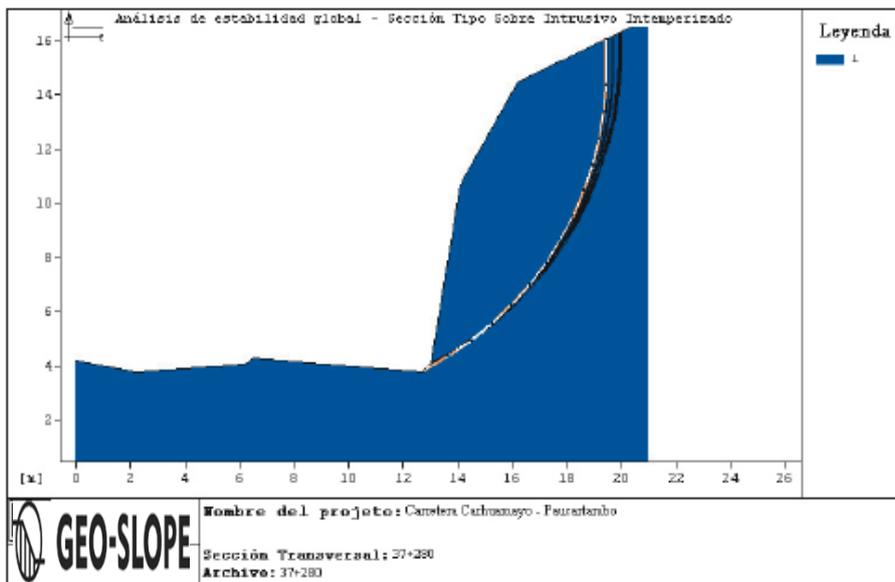
Fuente: GEO - SLOPE.

Figura N° 10

Parámetros Geomecánicos				
Cohesión C	Fricción Interna	Peso Específico γ	FS Estático	FS Pseudoestático
0.00 Kg/cm ²	24.0°	1.66	0.42	0.38



Parámetros Geomecánicos Empíricos				
Cohesión C	Fricción Interna	Peso Específico γ	FS Estático	FS Pseudoestático
0.10 Kg/cm ²	33.0°	1.66	0.91	0.82



Fuente: GEO – SLOPE.

Progresiva 37+280: Esta sección tipo corresponde a un suelo que representa un caso particular respecto a su comportamiento geomecánico puesto que se trata de un suelo en formación, de naturaleza eluvional, por tanto se muestra en distintas etapas transicionales entre el macizo rocoso que consiste en un intrusivo holocristalino de grano medio a grueso, monzogranítico a granodiorítico y un suelo granular, no cohesivo de grano grueso y naturaleza arenosa, de tal forma que, en algunos afloramientos se muestra estable en taludes con una razón de corte de $V=10$, $H=1$ y en otros constituye un agregado granular de material colapsado con una pendiente estable de alrededor de 33° ($<1:1$).

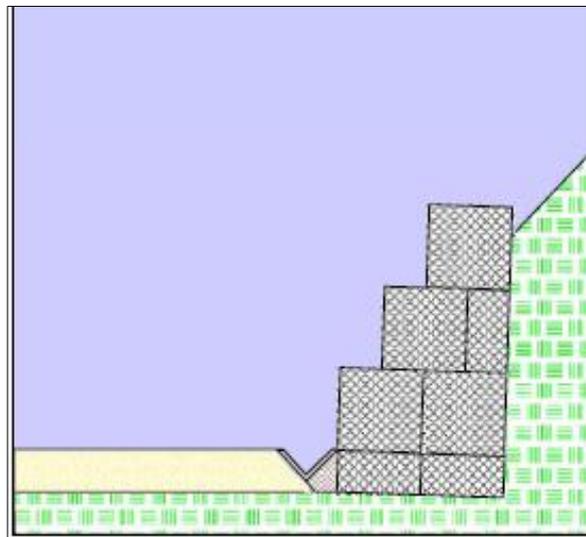
Para entender mejor la razón de este comportamiento nos referiremos al proceso de descomposición de este tipo de roca, dado que básicamente consiste de fenocristales de cuarzo (mineral muy resistente al intemperismo(22) químico, básicamente estable, solo susceptible a degradarse mecánicamente), rodeados de fenocristales de feldespatos del tipo plagioclasa y ortosa (aluminosilicatos de sodio y potasio, respectivamente), los cuales son susceptibles a descomponerse químicamente en presencia de agua con PH ligeramente ácido (debido a la acidificación por ácido húmico de procedencia orgánica o a la presencia de CO_2 atmosférico).

La descomposición de los feldespatos da lugar a arcillas caolínicas que a medida que progresa la degradación del suelo tienden a ser eliminadas por arrastre hídrico, generando un suelo residual conformado por partículas de cuarzo del tamaño de la arena; por esta razón, según el grado de intemperismo que experimente la roca podemos observar, por un extremo, un suelo con un elevado coeficiente de rozamiento, significativo peso específico y cohesionado por un mayor o menor contenido de arcilla de alteración y por el otro, un suelo granular con cohesión $C=0$.

En definitiva, el resultado final a escala geocronológica, es un suelo granular, no cohesivo, arenoso y altamente inestable pero, mientras el proceso de degradación no termine, solo la observación y el criterio de campo aconsejarán el tipo de medida a considerar para proteger la superficie de rodadura; en la figura N° 10, se muestran los parámetros y resultados de la simulación de las condiciones de estabilidad de este tipo de taludes efectuadas para situaciones extremas; nuestro análisis nos permite concluir que en cualquier caso este tipo de suelo tiende a desestabilizarse bajo condiciones de sismicidad moderada.

4.6 ESTRUCTURAS DE RETENCIÓN

Tienen por finalidad evitar el colapso de los taludes de material suelto; por la facilidad constructiva, por su efectividad como muros de retención y por considerandos económicos se sugieren estructuras tipo gavión caja.



Fuente: GEO - SLOPE

Los parámetros para el diseño de los muros de retención se han determinado con ayuda del soporte informático Gawacwin que nos ha permitido simular su comportamiento mecánico bajo condiciones de sismicidad moderada, para taludes sobre morrena del orden de 10 m y para casos singulares como el del tramo de la progresiva 21+630 - 21+660, se sugiere adoptar el diseño geométrico propuesto en la figura N° 10; para taludes menores a 10 m, sobre suelo morrénico; los parámetros y los factores de seguridad para estos diseños se encuentran reseñados en los cuadros N° 1 y 2, mientras que el detalle de los cálculos e información adicional sobre las cargas se pueden apreciar en el anexo N° 4.

PARAMETRO	H = 10 m
Altura Total	3.5 m
Altura de Camada	1 m
Número de Camadas	4
Profundidad de Fundación	0.5 m
Ancho Base	2.0 m
Ancho 2 ^{da} Camada	2.0 m
Ancho 3 ^{ra} Camada	1.5 m
Ancho 4 ^{ta} Camada	1 m

Cuadro N° 1. Fuente: MDP.

Sección Tipo	Coef. De Seg. Contra Deslizamiento	Coef. De Seg. Contra Vuelco	Coef. De Seg. Contra Rotura Global
H _{max} 7 m	1.85	2.29	1.01

Cuadro N° 2. Fuente: MDP.

CAPÍTULO V

ASPECTOS COMPUTACIONALES

5.1 INTRODUCCIÓN

Actualmente, existe una infinidad de herramientas computacionales para el análisis de estabilidad de taludes. Para tal propósito en esta investigación se ha trabajado con el programa o software SLOPE/W distribuido por la empresa Geo Slope.

El programa calcula los factores de seguridad para distintas geometrías, dibujadas por el propio usuario o importadas desde algún programa de dibujo. Se pueden analizar tanto suelos como rocas, por ello, el software incluye los criterios de rotura: Mohr-Coulomb; Hoek y Brown (1 980); Hoek y Brown generalizado (1 995); Barton y Brandis. Por otro lado, incorpora las funciones de anisotropía y otras variaciones como condiciones de sobrecarga, estructuras de contención, suelo grampeado y geotextiles.

Por otro lado, se puede seleccionar entre diversos métodos de análisis, tales como: Fellenius, Bishop simplificado, Janbu generalizado y corregido, Spencer, Morgentern-Price, entre otros. Además, se pueden realizar análisis estadísticos de sensibilidad y probabilísticos.

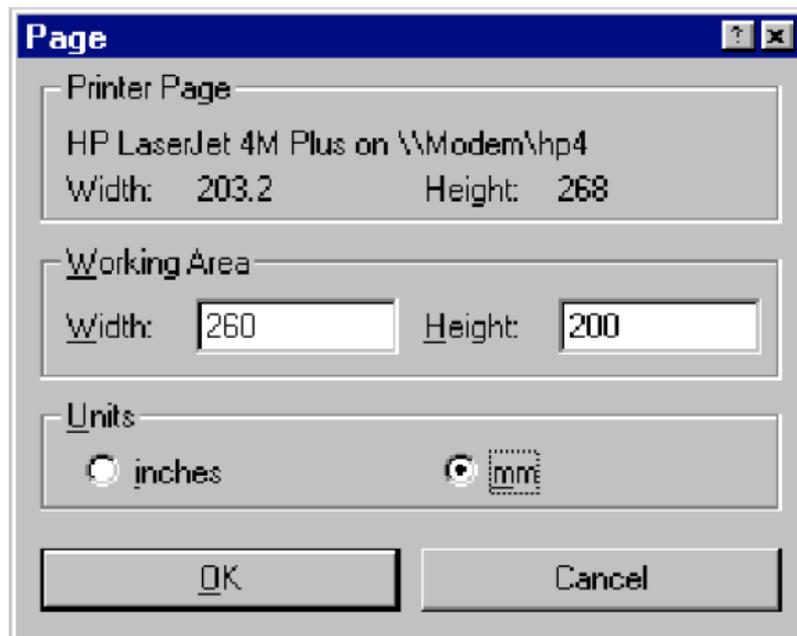
Slope/w tiene 2 subprogramas: Slope Compute y el Slope Interpret. El primero se utiliza para calcular el factor de seguridad una vez que se ingresaron todos los datos de entrada. Mientras que el segundo permite identificar la superficie de falla crítica y el centro de giro (Manual Slope/w).

5.2 EXPLICACIÓN DEL PROGRAMA GEO-SLOPE/W

Este capítulo en su desarrollo se orienta al cómo usar el programa SLOPE/W con indicaciones a proceder para la identificación y resolución de problemas de estabilidad de taludes. Para los objetivos de la presente investigación se hizo uso del Programa SLOPE/W en versión estudiantil.

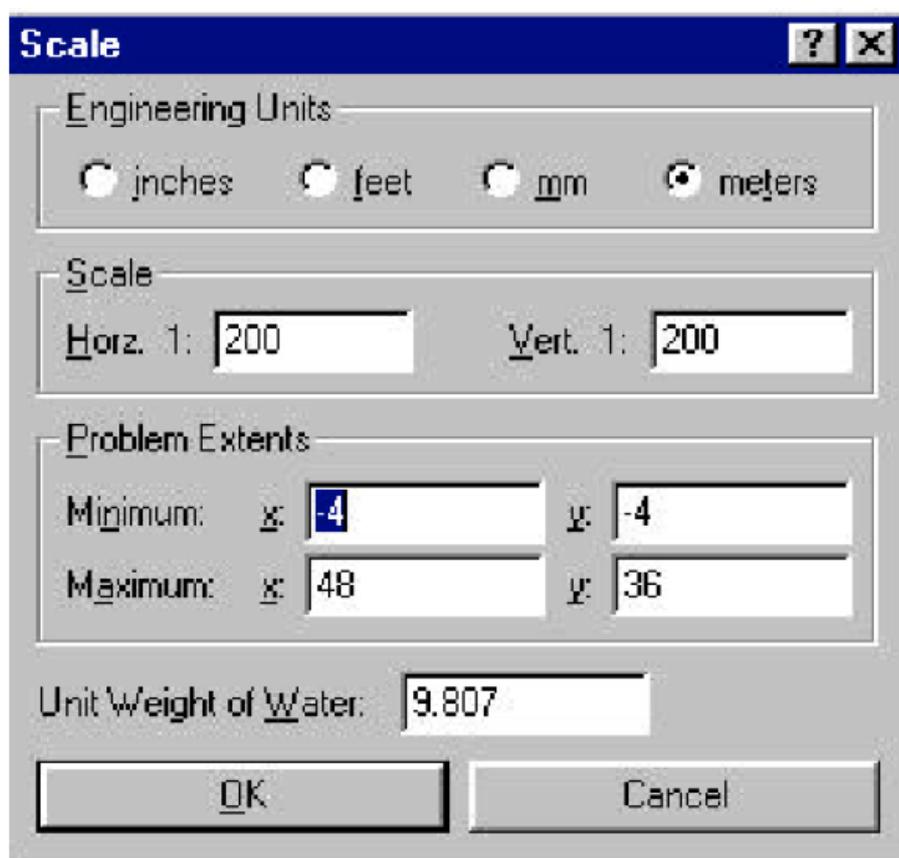
Para crear un probable evento, primero se debe ejecutar la función DEFINE desde el menú de inicio de Windows bajo SLOPE/W.

Si se quiere realizar la impresión de los análisis, y principalmente de las modelaciones que se hicieron, esta deberá ser establecida a una escala conveniente. La opción que permite modificar el área de trabajo se encuentra en el menú Set la opción Page.



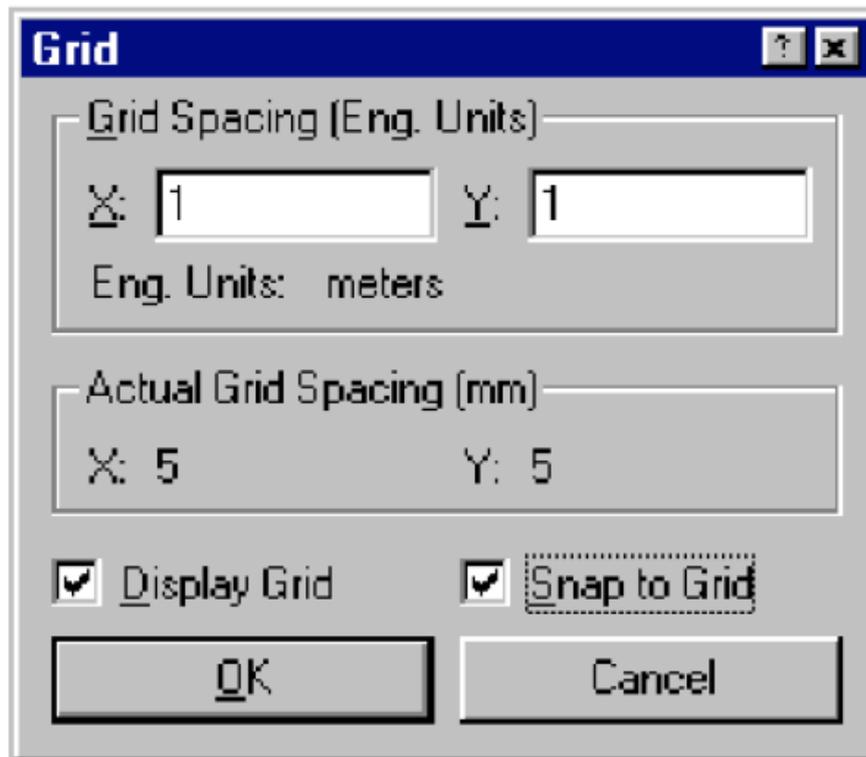
Fuente: SLOPE/W

La unidad de medida de este programa está definido en Metros. Una escala que se aconseja para los fines antes mencionados es 1:200, de esta manera se tiene márgenes apropiados, dejando su espacio respectivo al modelamiento realizado. El Geo-Slope/W te da la opción de establecer la escala de dibujo, y automáticamente te define el área de trabajo; o de modo viceversa. Para esto nos dirigimos en Scale, bajo el menú Set.



Fuente: SLOPE/W

Para definir nuestro problema con coordenadas precisas, hay una función llamada GRID, parecido al que se emplea en el programa AutoCAD. Ir al menú SET en la opción GRID.

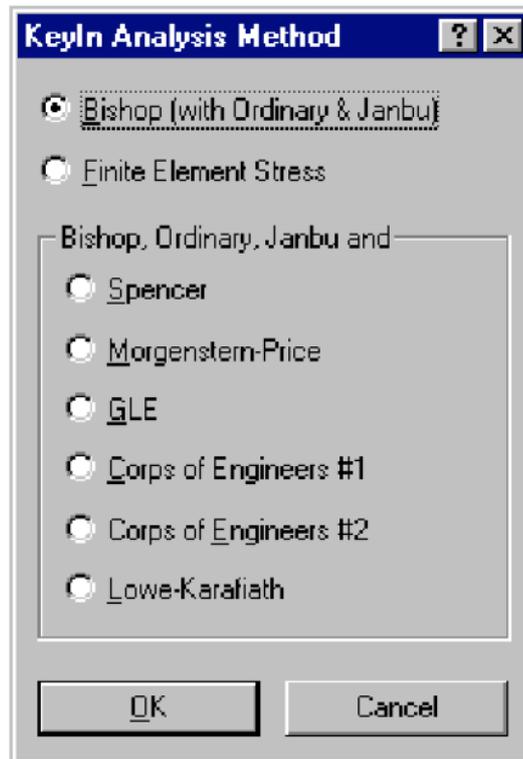


Fuente: SLOPE/W

El programa da posibilidad de trabajar con varios métodos de Análisis, los mismos que se eligen en el menú KEYLN – ANALYSIS METHOD y eligiendo la opción “Bishop (with Ordinary & Janbu)”.

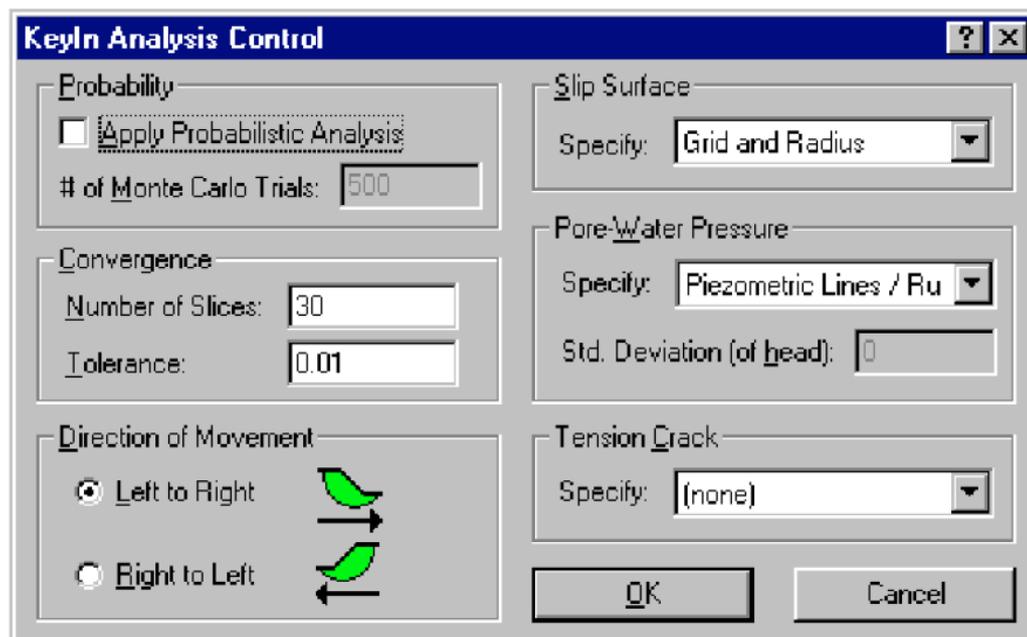
Los métodos mencionados llevan cada cual, distintas hipótesis para su partida; Ordinary asume a las fuerzas de corte y normales entre las fajas como nulas, mientras que Bishop asume cero a las fuerzas de corte; entre tanto Janbu asume que todas las fuerzas son no nulas.

Hay un manual de instrucciones previas al uso del programa, el cual ayudará a llevar a cabo un desarrollo de trabajo eficiente.



Fuente: SLOPE/W

Al ingresar a “Analysis Control” en el menú KEYLN, se desprende el siguiente cuadro:

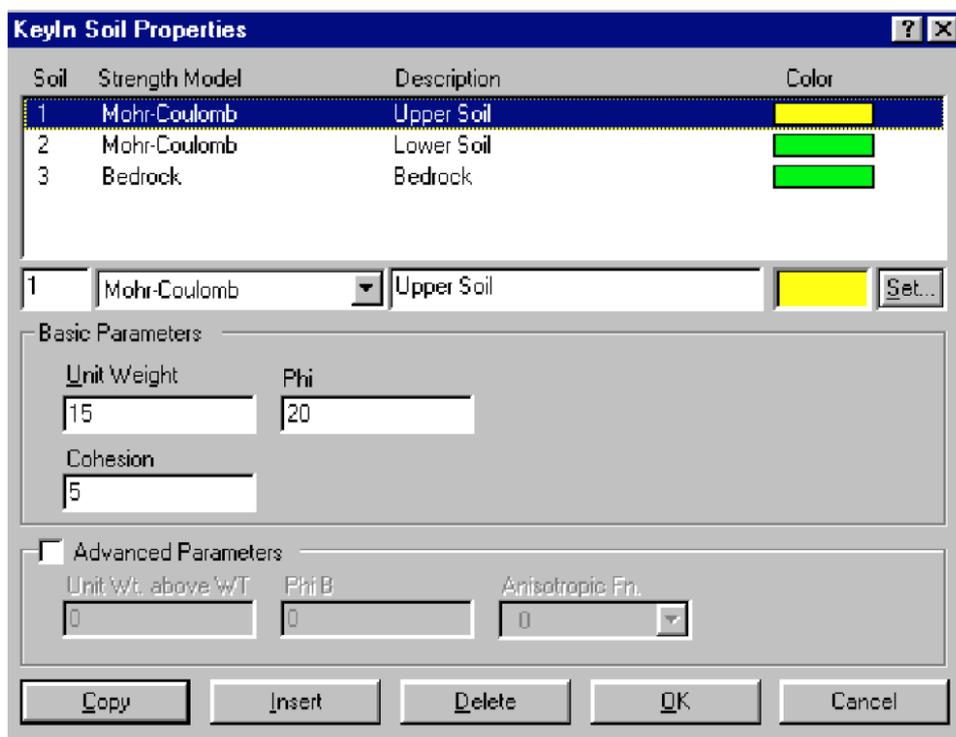


Fuente: SLOPE/W

En el desarrollo de análisis de los problemas, la pantalla deberá seguir del modo siguiente, ya que esto permitirá hacer cambios por características de diseño en la dirección del talud o ladera en cuestión.

En la versión del programa estudiantil es posible trabajar solo con tres tipos de suelos, de los cuales dos los propone el proyectista/usuario y el tercero es del tipo Bedrock (base de roca).

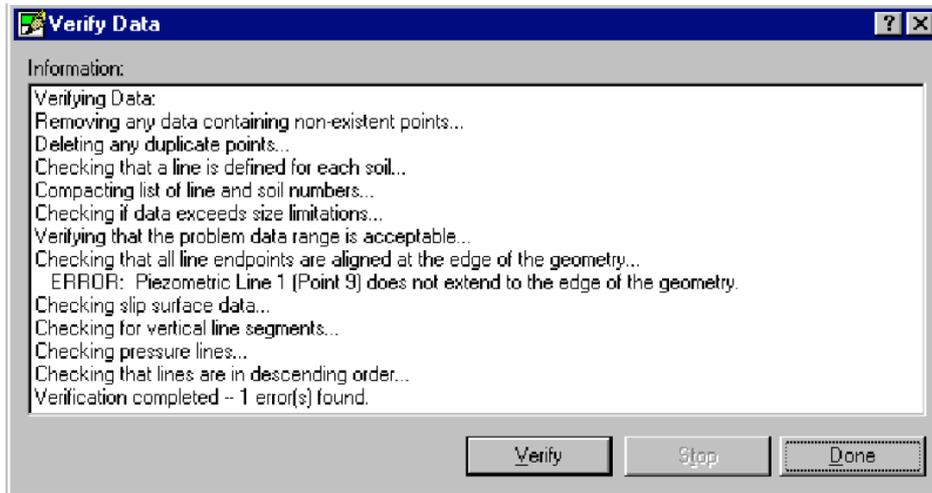
Si uno quiere entrar a ver las propiedades de cada suelo se debe ingresar en "Soil Properties" en el menú KEYLN, aquí se debe ingresar los valores característicos de cada suelo y hacer click en "Copy" para introducirlo al programa.



Fuente: SLOPE/W

Cuando se trabaja determinado Proyecto en éste Programa y se va llegando a la parte final y antes de llevar a que el programa efectúe el Análisis, es necesario hacer una verificación de todos los datos ingresados a fin de corroborar que sean los correctos.

Para esto vamos a la opción TOOLS y elegimos “Verify”



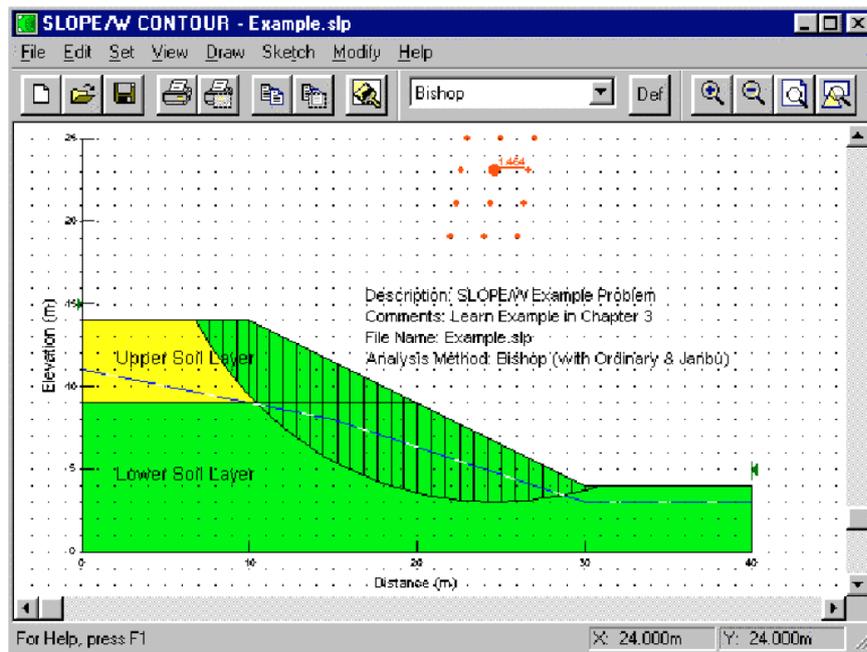
Fuente: SLOPE/W.

Ahora sí, cuando es el momento de efectuar el Análisis del problema, debemos ejecutar el subprograma SOLVE, ubicada en el menú TOOLS. Aquí lo único que se debe hacer es click en START y se iniciarán con el ansiado análisis.



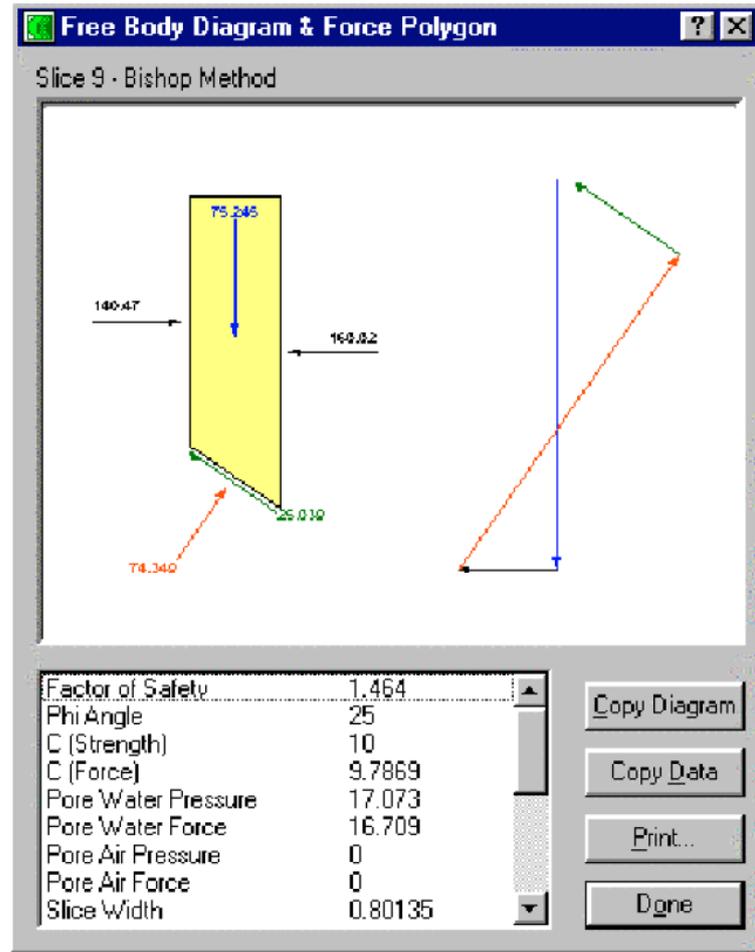
Fuente: SLOPE/W

Los resultados obtenidos serán vistos en el subprograma CONTOUR en el menú TOOLS.



Fuente: SLOPE/W.

Este subprograma CONTOUR resulta ser interesante ya que posibilita ver los diagramas de cuerpo libre de cada tramo o faja del talud analizado, para ello recurrir al menú VIEW, opción SLICE FORCES.



Fuente: SLOPE/W.

CAPÍTULO VI

SISTEMAS DE ESTABILIZACIÓN

6.1 INTRODUCCIÓN

Luego de haber realizado un estudio minucioso del terreno a través de los métodos de análisis y haber obtenido el factor de seguridad que nos indica el grado de estabilidad del lugar, el objetivo principal de un estudio de estabilidad de taludes o laderas, es diseñar medidas de prevención, control, remediación y/o estabilización para reducir los niveles de amenaza y riesgo. Es decir, ahora con datos y con la seguridad de saber con qué tipo de terreno estamos tratando, se procede a ver qué tipo de sistema habremos de emplear con el fin de estabilizar los taludes y/o laderas en cuestión.

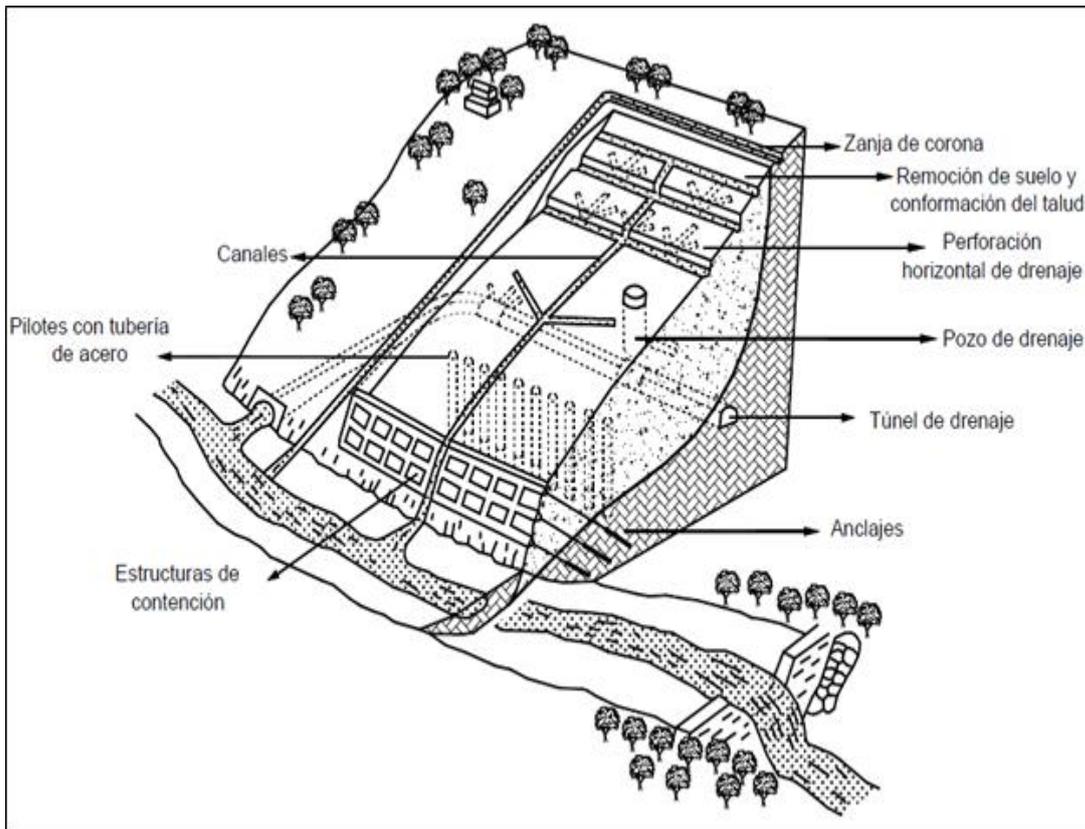
Se han desarrollado gran cantidad de técnicas probadas para el manejo de los taludes inestables o los deslizamientos.

Loor y Pérez (2016), señalan que:

Por lo general, una de las cosas más significativas para la reducción de riesgos y amenazas son las medidas de prevención que se deben tomar en la ejecución de todo proyecto. Es aquí donde también entra a tallar el Estado a través de sus políticas, y del mismo modo la colaboración en medidas, que contribuyan con el desarrollo de la obra, por parte de las comunidades beneficiarias.

La estabilización ante los deslizamientos en zonas propensas a ésta, representa llevar a cabo un estudio minucioso y a detalle que requiere de metodologías especializadas de diseño y construcción. Cada sistema tiene su base teórica y sus procedimientos constructivos.

En el presente capítulo se indican algunos de los sistemas de remediación que se han utilizado en el mundo, pero en especial nos centramos en el empleo de un Sistema Flexible de alta resistencia, el cual se explica con mayor detalle.



Fuente: Schuster & Kockelman, 1996.

6.2 CRITERIOS A TENER EN CUENTA

Siempre que sea posible, y como paso previo a la aplicación de otras técnicas, se diseñarán actuaciones de remodelación de la geometría de los taludes, que permitan la disminución de la pendiente y/o de la longitud de ladera, tales como:

- Descabezado de taludes.
- Retirada de materiales inestables.
- Tendido o reperfilado de taludes.
- Banqueo de los taludes.

El siguiente paso a la remodelación geométrica será la utilización de técnicas blandas propias de la bioingeniería (mantas y redes vegetadas, hidrosembras, fajinas, plantaciones de cobertura, etc.), que deberán primar, siempre que sea posible, sobre tratamientos duros basados en estructuras (de hormigón, mampostería, gaviones, etc.), o técnicas mixtas, donde se mezclan estructuras con plantaciones.

En todo caso, dadas las características intrínsecas de los proyectos y obras que nos ocupan, los elementos de protección y contención deberán estar integrados en el paisaje, formados por materiales de la zona, ser duraderos y de bajos costes de ejecución y mantenimiento.

Asimismo, la elección de la solución dependerá de ciertas condiciones asociadas al proyecto, como esfuerzos previsibles, espacio disponible, plazo de ejecución, impacto ambiental, etc.

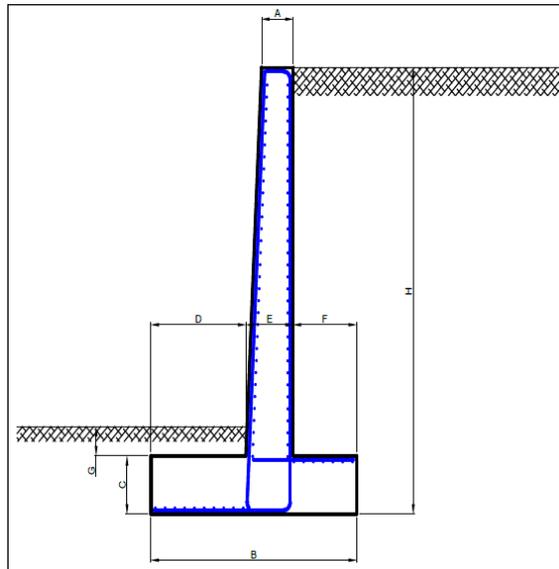
Los diferentes sistemas de protección y contención a aplicar en cada caso, dependerán del tipo de talud o ladera, de los materiales que lo forman y de los factores que afectan a la estabilidad de los mismos.

6.3 SOLUCIONES DE TIPO ESTRUCTURAL

Según lo expuesto anteriormente, las soluciones de tipo estructural consistirían básicamente en:

- Muros de hormigón en masa y armado.
- Muros de escollera.
- Muros de gaviones.

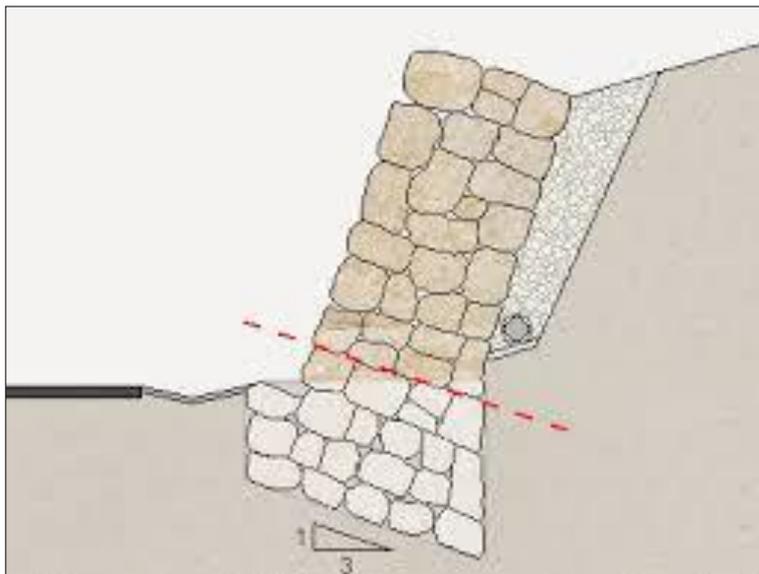
A. Muros de hormigón en masa y armado



Fuente: Elaboración Propia.

B. Muros de escollera

El encachado consiste en la colocación de bloques de piedras naturales sanas, compactas y resistentes. Se utilizan para dar suficiente peso cerca del pie de un talud inestable, y de esta manera, prevenir el movimiento.

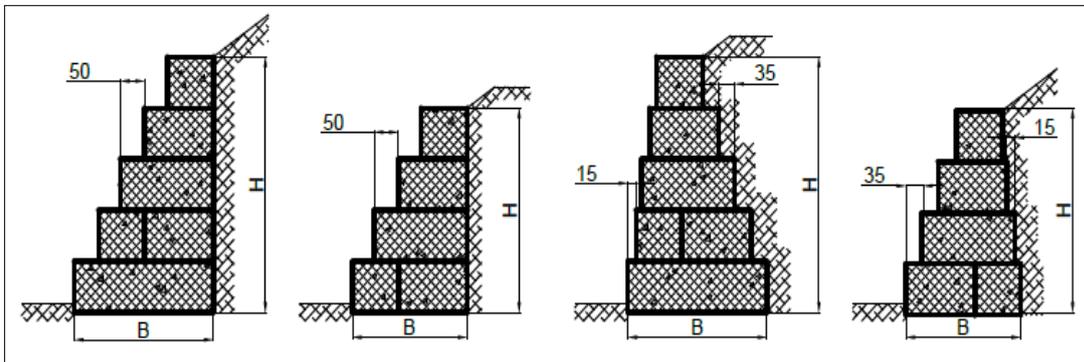


Fuente: CAPECO.

C. Muros de gaviones

La mampostería gavionada consiste en una estructura paralelepípedica elaborada con mallas metálicas de alambre galvanizado de triple torsión y rellenas con las piedras más próximas a la obra.

Los muros de gaviones suelen ser de una altura no superior a 6 metros.



Fuente: CAPECO.

6.4 SOLUCIONES DE BIOINGENIERÍA

Las técnicas de bioingeniería se basan en la utilización de plantas vivas como elemento constructivo, conjuntamente o no con material inerte (material leñoso, piedras, mallas metálicas, geotextiles o productos sintéticos).

Estas técnicas se pueden dividir en tres grandes grupos:

A. Técnicas de recubrimiento

Son técnicas destinadas a evitar la erosión superficial. Dentro de este grupo se distinguen:

- Siembras de diversos tipos, con o sin acolchados.
- Hidrosiembras tanto de especies herbáceas como especies leñosas.
- Mantas y redes orgánicas.

B. Técnicas de estabilización

Estas técnicas permiten estabilizar el terreno hasta dos metros de profundidad y se basan en la disposición de plantas leñosas obtenidas por reproducción vegetativa colocadas en filas horizontales.

Las plantas tienen que tener la capacidad de emitir raíces adventicias de manera que formen un entramado que permita la sujeción del terreno. Dentro de estas técnicas se pueden enumerar:

- Fajinas vivas.
- Paquetes de matorral.
- Estaquillados de sauces.
- Lechos de ramaje.
- Esteras de ramas.
- Empalizada.

C. Técnicas mixtas

Estas técnicas conjugan la utilización de elementos vegetales con materiales inertes tales como: madera, acero galvanizado, piedra, hormigón, etc. El material inerte actúa como estabilizador hasta que las plantas sean capaces de realizar esta función. Dentro de estas técnicas se encuentran:

- Fajinas mixtas.
- Gaviones revegetados.

6.5 SISTEMA FLEXIBLE DE ALTA RESISTENCIA

Es un tipo de solución de bioingeniería que consta de mallas flexibles de alta resistencia y pernos anclados al terreno, con función de retener la capa de superficie del talud con fuerzas que conllevan a soportar cargas, de este modo sea segura la estabilidad superficial del talud, que tiende al deslizamiento por acción propia debido a su peso o por factores externos y naturales que se producen en determinada zona.

Los sistemas flexibles de alta resistencia generalmente se consideran activos, es decir, que son capaces de prevenir deslizamientos. Supuestamente son capaces de ejercer una cierta presión sobre el terreno mediante una pretensión inicial sobre la membrana flexible que envuelve a la zona inestable. Para definir las características generales comunes de estos sistemas se han analizado un total de doce productos fabricados por siete compañías distintas.

La investigación continúa con el análisis de la estabilización superficial de taludes y/o laderas que forman parte del proyecto u obra denominado “Ampliación y asfaltado de la carretera Paucartambo – Carhuamayo, regiones Pasco y Junín respectivamente” donde se plantea el uso de sistemas flexibles para estabilizar taludes. Del mismo modo, el estudio ha necesitado el desarrollo de pruebas en terreno y extracción de muestras de suelo para el análisis geotécnico pertinente.

Emplear en una obra un sistema flexible, se presenta como una alternativa ante la construcción de muros contención (de concreto, netamente), tomando como ventaja su flexibilidad en mallas o material requerido. Además desde el punto de vista estético encaja con el entorno de la naturaleza ya que facilita la revegetación, convirtiendo la zona en paisaje de vista agradable con un bajo impacto ambiental.

6.5.1 SISTEMAS FLEXIBLES DE ESTABILIZACIÓN TDM GRUPO

Uno de los modelos de Sistemas de estabilización a través de mallas aceradas, que se han hecho en varios países del continente americano, ha sido desarrollado por la empresa TDM Grupo. Este sistema TDM para estabilización de taludes fabrica mallas a base de alambres de acero de alta resistencia ante la tensión al cual el talud puede someterse, estas mallas deben ser sujetadas a través de anclajes que van en los suelos y también en rocas, en fin en el material que componga el relieve del talud en cuestión. Una vez instalada y anclada la malla, este sistema puede ser sometido a un proceso de post-tensado sobre el mismo talud en conjunto con placas que sirven de fijación.

En superficies de relieves irregulares este sistema instalado necesitará anclajes pequeños adicionales para mejor fijación, adaptabilidad y estabilidad. Estos anclajes extras también es recomendable que vayan instalados a los extremos de la malla instalada y anclada.

6.5.2 GAMA DE SISTEMAS FLEXIBLES DE ESTABILIZACIÓN DE TALUDES

A. Sistema TDM Puntual. - Concebido para la estabilización de movimientos superficiales de terreno en taludes con pendiente moderada y paredes rocosas globalmente estables con importante fracturación superficial.



Rango de soporte: Hasta 12 kN/m². Fuente: Propia.

B. Sistema TDM Ligero. - Ideado para ser instalado en taludes de suelos y material rocoso alterado con pendiente media y requerimiento de soporte medio-bajo.



Rango de soporte: Hasta 15 kN/m². Fuente: Propia.

C. Sistema TDM Reforzado. - Recomendado para la estabilización de taludes de cualquier tipo de terreno y pendiente, con inestabilidades y movimientos importantes con requerimientos de soporte medio-altos.



Rango de soporte: De 15 a 60 kN/m². Fuente: Propia.

En la obra, que nos ayuda a realizar este informe de investigación, “Ampliación y asfaltado de la carretera Paucartambo – Carhuamayo, regiones Pasco y Junín respectivamente” se ha empleado para la estabilización de algunas laderas y/o taludes el sistema TDM ligero y en el resto de taludes se han empleado muros de gaviones, así como muros de contención, también.

CONCLUSIONES

- ✓ Los métodos de análisis o de cálculo son determinantes en el sentido de definir la estabilidad de terreno y se rige por la determinación de la resistencia al corte de los suelos que ya tuvieron antecedentes de deslizamiento y determinar el coeficiente o factor de seguridad que define la estabilidad del talud.
- ✓ Uno de los factores más importantes en el análisis de la estabilidad de pendientes es el efecto de la infiltración del agua. Este proceso genera un cambio en el estado tensorial en la pendiente que debe equilibrarse, al mismo tiempo, este nuevo estado tensorial modifica las propiedades del suelo, especialmente la permeabilidad cambiando las propiedades del flujo del agua en el suelo. Métodos eficientes, como el Janbú, para tratar este tipo de interacción son necesarios. Si bien, la teoría y técnicas numéricas para este tipo de análisis existen, la determinación de la estabilidad de las pendientes bajo estas condiciones no ha sido aún investigada.
- ✓ Actualmente, para el análisis de la estabilidad de pendientes existen diferentes métodos, pero el realizar el estudio de terreno con la combinación de dos métodos de análisis (Janbú y Spencer) hace que los resultados sean de mayor confiabilidad, dado que se abordan casi todos los factores causantes de inestabilidad.
- ✓ Además de que el presente trabajo también tiene como finalidad el servir como material de consulta en futuros proyectos que impliquen el tratamiento de la estabilización de taludes. El tema de estabilidad de taludes también nos permite establecer los criterios económicos vitales en las obras de infraestructura, pues al conocer y determinar la ubicación correcta para el corte de taludes también estamos determinando el éxito financiero de nuestra obra ya que en caso de error las consecuencias en costo y operación pueden ocasionar la pérdida completa de la obra civil.

RECOMENDACIONES

- ✓ Se hace indispensable el estudio y análisis del terreno o zona por donde se planea realizar una obra, a través de los métodos de análisis de estabilidad a fin de determinar el grado de estabilidad de dicho lugar, antes del empleo de un sistema de estabilización (muros gaviones, muros de contención, mallas estabilizadoras, etc.).
- ✓ Han de aplicarse, en la construcción de obras civiles en las cuales hay taludes, el Modelo de Gestión de Taludes.
- ✓ Se debe contar siempre con un especialista en estos trabajos de geotecnia cuando estemos en campo.
- ✓ En campo durante la ejecución de obra debe existir un departamento de geotecnia o un especialista permanente que deberá proporcionar los datos geoestructurales y efectuar las inspecciones diarias.
- ✓ Se debe tomar en cuenta que cada talud constituye un caso particular. Ello debido a que cada uno de ellos ha de depender de las condiciones geológicas y geotécnicas existentes en el lugar.
- ✓ Para lograr disminuir el agua existente en los poros de los estratos, se recomienda hacer uso de drenes subhorizontales.

BIBLIOGRAFÍA

Castañón, P. (2018). *Estabilidad de taludes*. Ciudad de México, México: Universidad Nacional Autónoma de México.

Chen, Z. & Shao, C. (1988). *Evaluation of minimum factor of safety in slope stability analysis*. Canada: Canadian Geotechnical Journal.

Heredia, J. & Salazar, A. (2017). *Influencia de la granulometría en la estabilidad de los taludes de la gravera Shudal, Cajamarca, 2017* (Tesis de Pregrado). Universidad Privada del Norte, Cajamarca, Perú.

Janbu, N. (1968), *Slope Stability Computations, Soil Mechanics and Foundations Engineering Report*. Trondheim, Noruega: The Technical University of Norway.

Loor, M. & Pérez, L. (2016). *Estabilidad de taludes para un diseño de un relleno sanitario manual para una población de 5000 habitantes* (Proyecto de Investigación), Universidad Estatal Península de Santa Elena, La Libertad, Ecuador.

Ludeña, L. (2014). *Influencia de bermas y canales en la estabilidad de Pilas de Lixiviación* (Tesis de Pregrado). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.

Morales, D. (2000). *Análisis y Diseño de Taludes Mediante Métodos Computacionales* (Tesis de Postgrado). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.

Ortuño, L. (2003): *Estabilidad de Taludes en Suelos. Diseño y Cálculo. Curso sobre Taludes en Obras Lineales*. Madrid, España: INTEVIA.

Resolución ministerial N° 03-2013-MTC/14, *Manual de Carreteras “Especificaciones Técnicas Generales Para Construcción”* Eg - 2013., Lima, Perú, febrero del 2013.

Romero, M. (2011). *Propuesta metodológica para la evaluación de estabilización de taludes y terraplenes en proyectos de carreteras* (Tesis de Posgrado), Universidad de San Carlos de Guatemala, Ciudad de Guatemala, Guatemala.

Scribd. (2018). *Factores Que Influyen en La Estabilidad de Taludes*. [online] Recuperado de: <https://es.scribd.com/doc/190822254/Factores-Que-Influyen-en-La-Estabilidad-de-Taludes>

Slideshare.net. (2018). *Librodeslizamientosti cap4 (1)*. [online] Recuperado de: <https://www.slideshare.net/jesusbuscador/librodeslizamientosti-cap4-1>

Spencer, E. (1967). *A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel inter-slice forces*. England: Géotechnique London.

Suarez, J. (1998). *Deslizamiento: Análisis Geotécnico. Capítulo 2 – Mecanismos de Falla*. Bucaramanga, Colombia: Editorial de la Universidad Industrial de Santander.

Suarez, J. (1998). *Deslizamiento: Análisis Geotécnico. Capítulo 4 – Análisis de Estabilidad*. Bucaramanga, Colombia: Editorial de la Universidad Industrial de Santander.

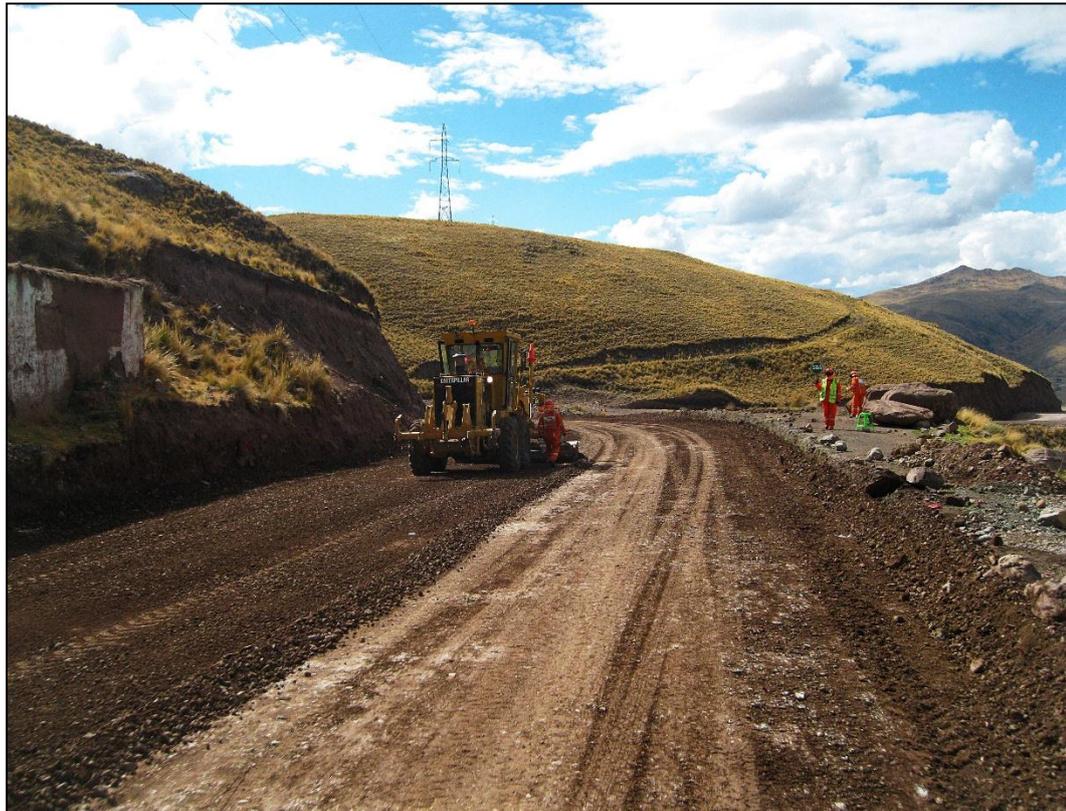
Terzagui, K. & Peck, R. (1973). *Mecánica de Suelos en la Ingeniería Práctica*. España: Editorial El Ateneo.

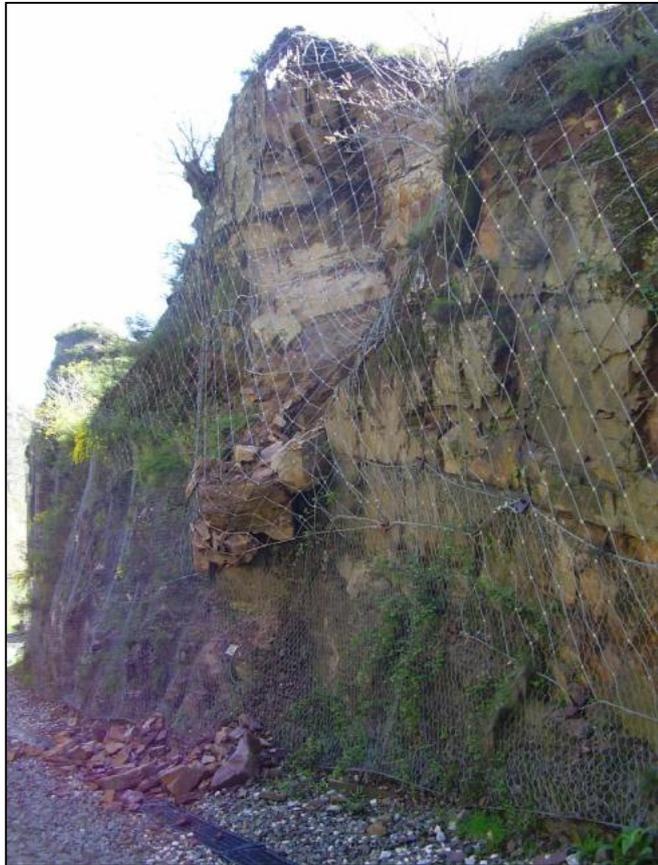
ANEXOS

✓ **ANEXO N° 1.- FOTOGRAFÍAS DE LOS TRABAJOS DE OBRA**
("Ampliación y asfaltado de la carretera Paucartambo –
Carhuamayo", regiones Pasco - Junín)









✓ ANEXO N° 2.- TABLAS/ÁBACOS DE JANBU

❖ Tablas para suelos cohesivos

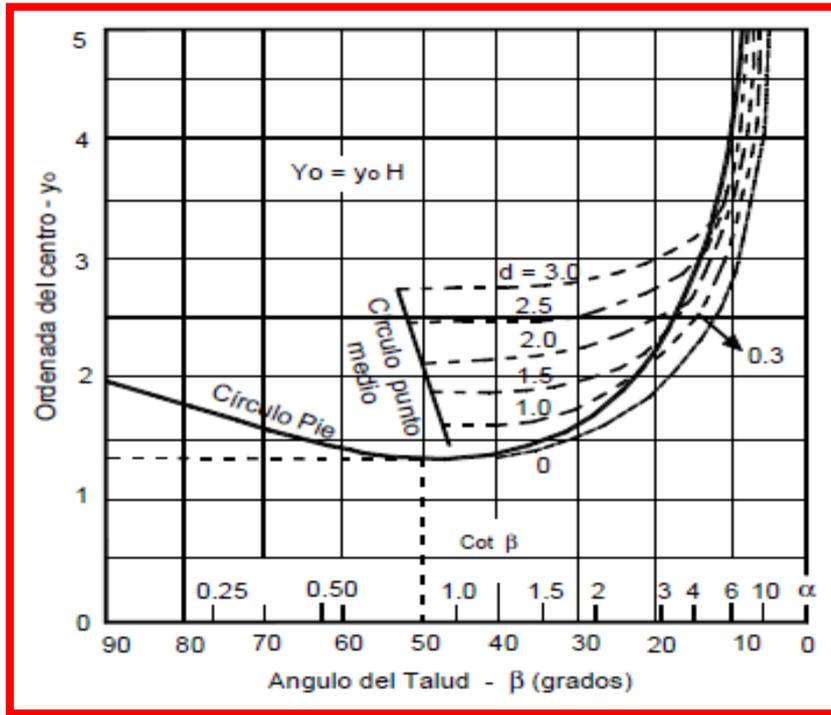
Paso 1. En el análisis hay que tomar en cuenta ciertos parámetros: Altura de cada suelo H (metros); Pendiente del talud β (grados); Cohesión del suelo C_u (KN/m²); Altura del nivel freático H_w (m); Peso específico del suelo γ (KN/m³); Perfil geotécnico incluyendo todos los mantos del suelo; Profundidad hasta el manto de suelo duro impenetrable D (Metros).

Paso 2. Cálculo del factor de profundidad d

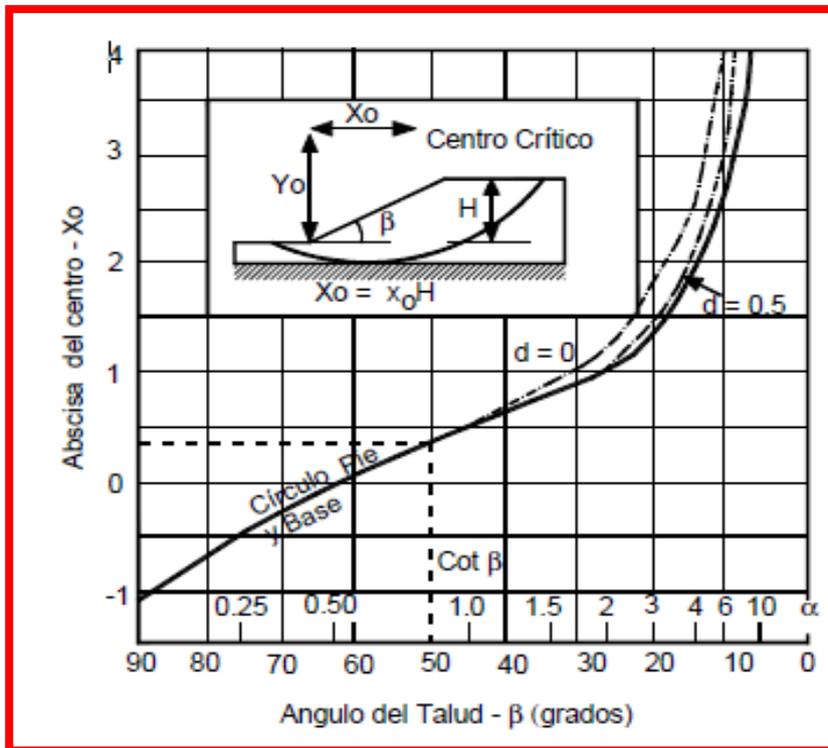
$$d = \frac{H_w}{H}$$

Dónde: H_w = Altura del nivel freático y H = Profundidad de la base del talud al punto del círculo de falla más bajo.

Paso 3 Hallar la localización del círculo crítico (X_o , Y_o).



Coordenada X_0 . Fuente: Capeco.



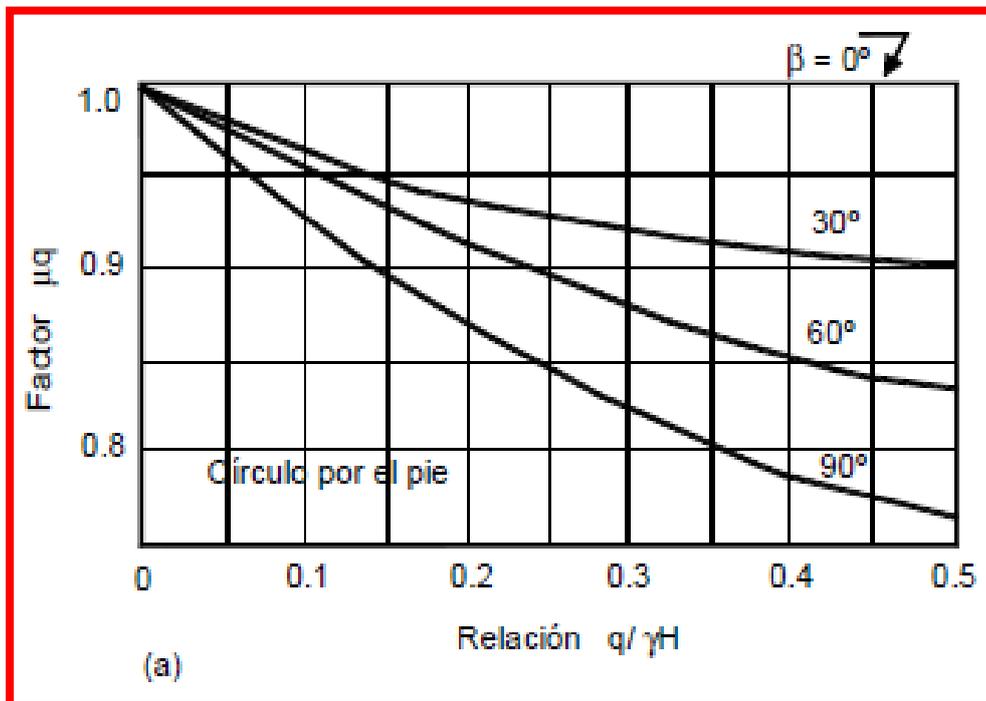
Coordenada Y_0 . Fuente: Capeco.

Paso 4. Calculamos C promedio

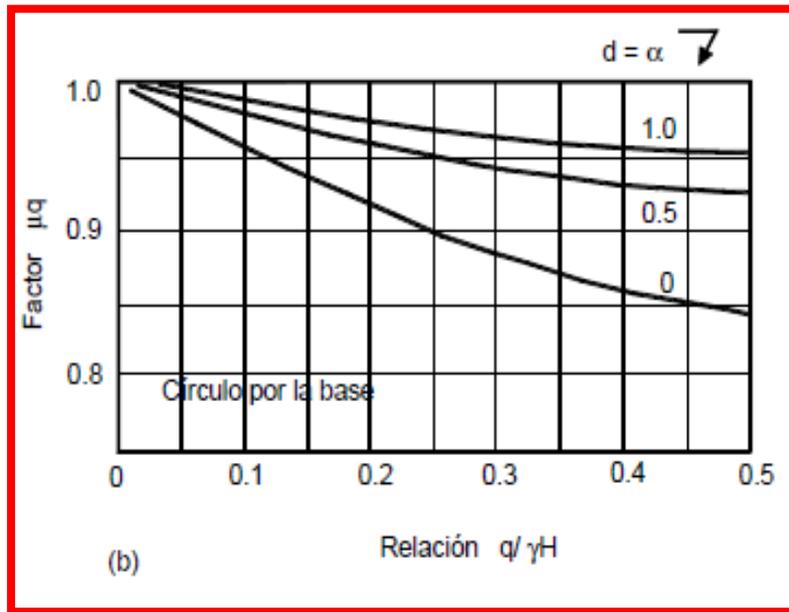
Al usar como guía el círculo estimado, se determina el valor promedio de la resistencia, C. Esto se realiza calculando el promedio ponderado de las resistencias a lo largo del arco de falla, con el número de grados interceptado por cada tipo de suelo como factor de ponderación.

Paso 5. Calculamos el factor de reducción

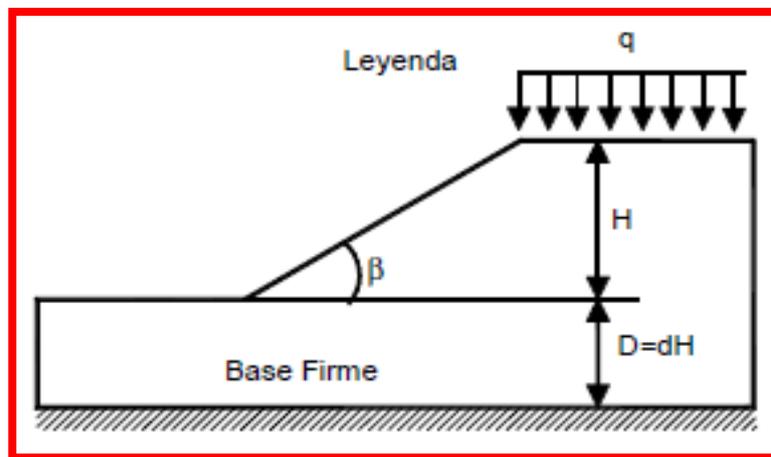
Podemos encontrar el factor de reducción por: carga adicional, sumergencia e infiltración, grieta de tracción sin presión hidrostática en la grieta, grieta de tracción con presión hidrostática en dicha grieta.



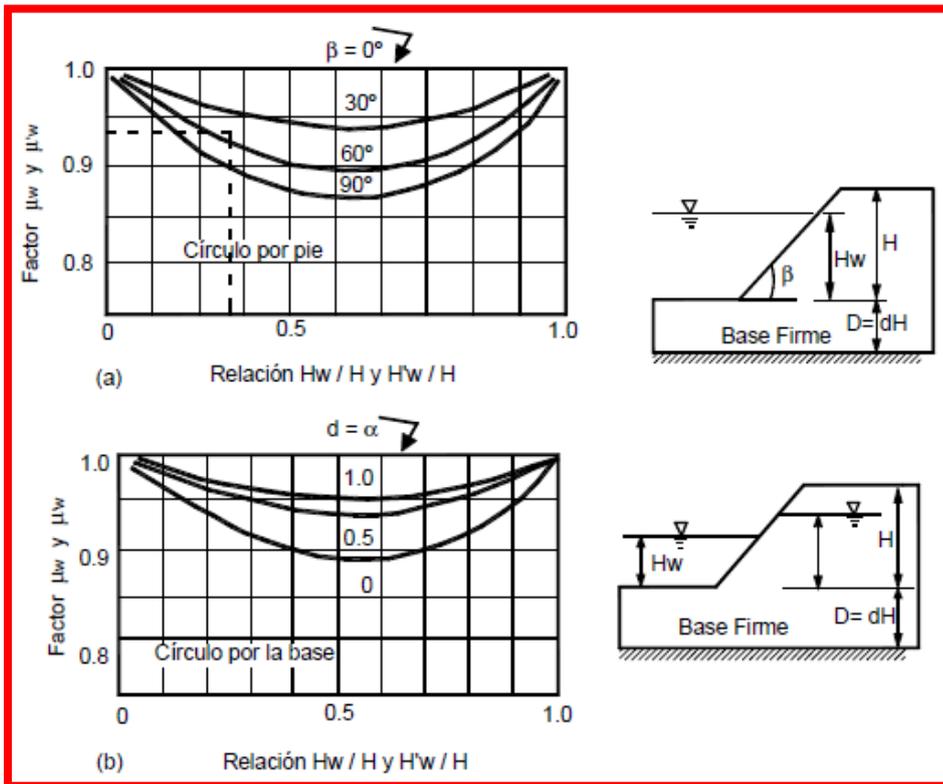
Fuente: Janbu, 1968.



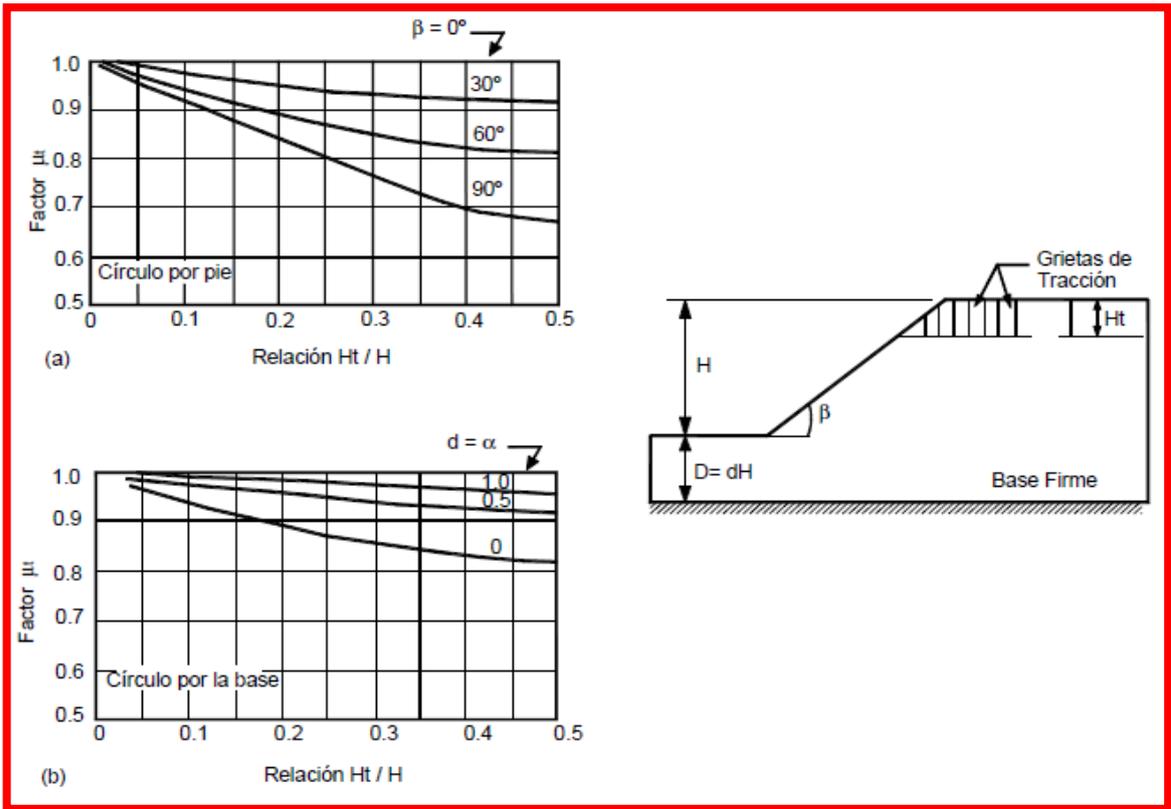
Fuente: Janbu, 1968.



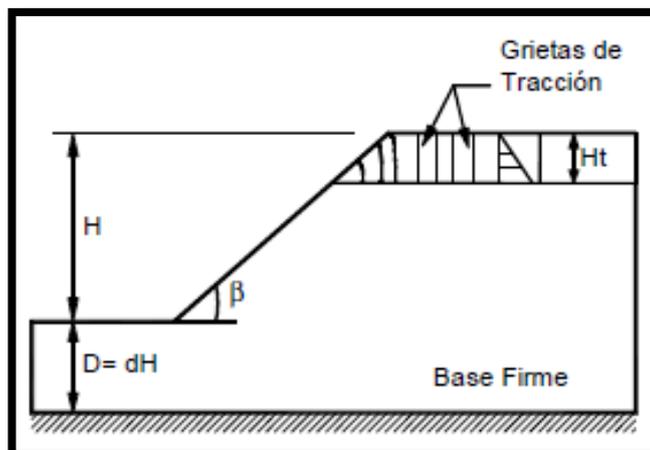
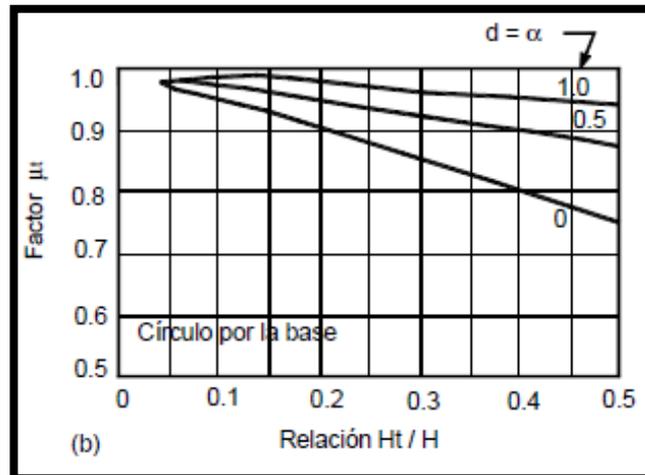
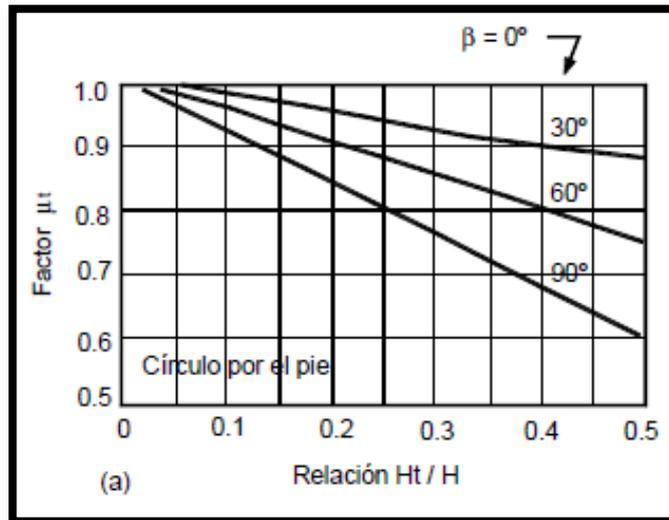
Fuente: Janbu, 1968.



Fuente: Janbu.



Fuente: Janbú, 1968.



Fuente: Janbu, 1968.

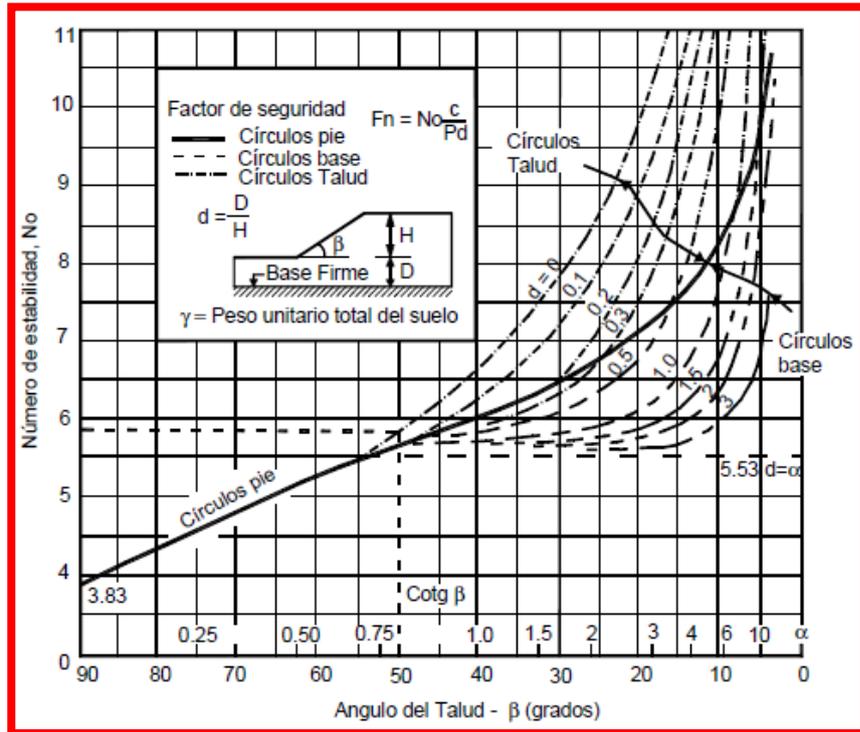
Paso 6. Cálculo de Pd.

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

Dónde: γ = peso unitario promedio del suelo; H = altura del talud
q = sobrecarga; γ_w = peso unitario del agua; H_w = altura de agua fuera del talud; μ_q = factor de reducción por sobrecarga; μ_w = factor de reducción por sumergencia; μ_t = factor de reducción por grieta de tensión. Si no hay sobrecarga, $\mu_q = 1$; si no hay sumergencia, $\mu_w = 1$ y si no hay grieta de tensión, $\mu_t = 1$. En la fórmula de Pd se toma q = 0, $\mu_q = 1$ para la condición no consolidada.

Paso 7. Calculamos el número de estabilidad Ne

Del siguiente cuadro, se determina Ne, que es dependiente del ángulo del talud.



Número de estabilidad. Fuente: Janbu, 1968.

Paso 8. Calculamos la cohesión

Se calcula despejando C_{req} de la fórmula del número de estabilidad N_e .

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

Paso 9. Factor de Seguridad

Se utiliza la expresión:

$$F.S. = \frac{N_o * C_{req}}{P_d}$$

❖ Tablas para suelos friccionantes

Paso 1 al Paso 6: Similiar que para suelos cohesivos.

Paso 7. Calculamos P_e .

$$P_e = \frac{(\gamma * H) + q - (\gamma_w * H'_w)}{\mu_q * \mu'_w}$$

Donde:

H'_w = altura del agua dentro del talud y μ'_w = factor de reducción por infiltración. Si no hay tiempo para que los suelos se consoliden por la aplicación de sobrecarga, se toma $q=0$ y $\mu_q = 1$ en la fórmula de P_e . Si no existe sobrecarga, $\mu_q = 1$, y si no existe infiltración, $\mu'_w = 1$.

Paso 8. Calculamos el parámetro adimensional $\lambda C\phi$.

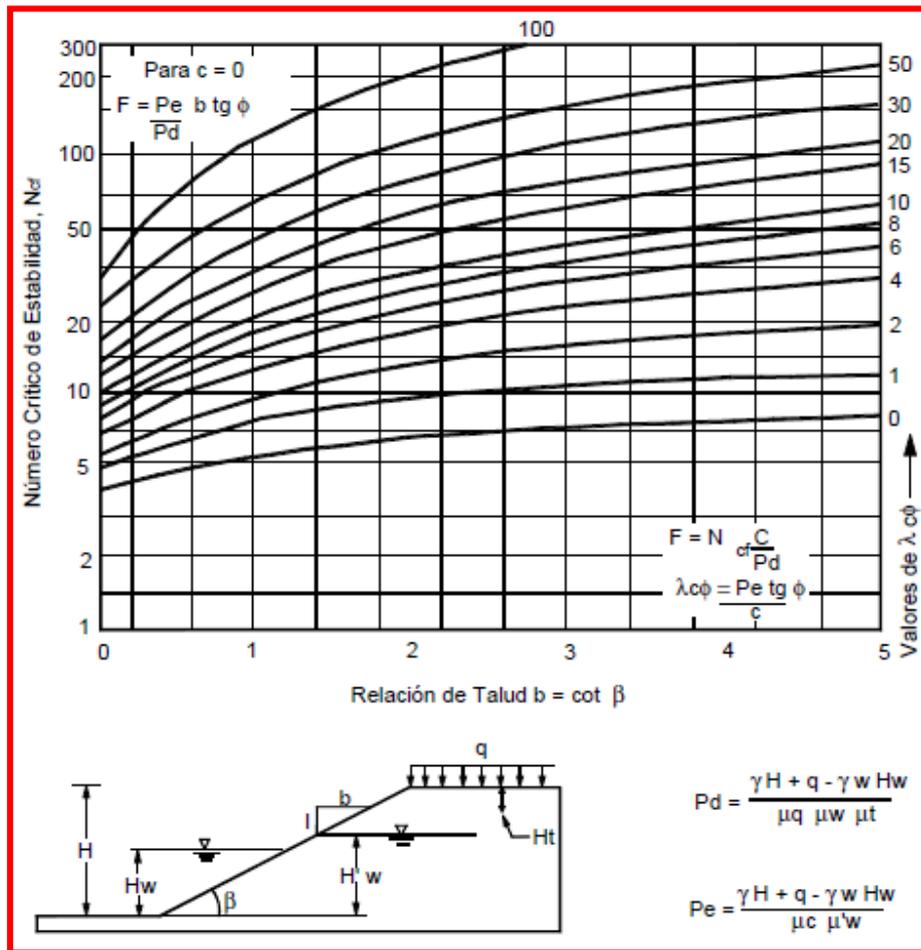
$$\lambda C\phi = \frac{P_e * \tan \phi}{C}$$

Donde:

$\tan \phi$ = valor promedio de $\tan \phi$.

C = valor promedio de las cohesiones

Paso 9. Estabilidad friccionante N_{cf} .

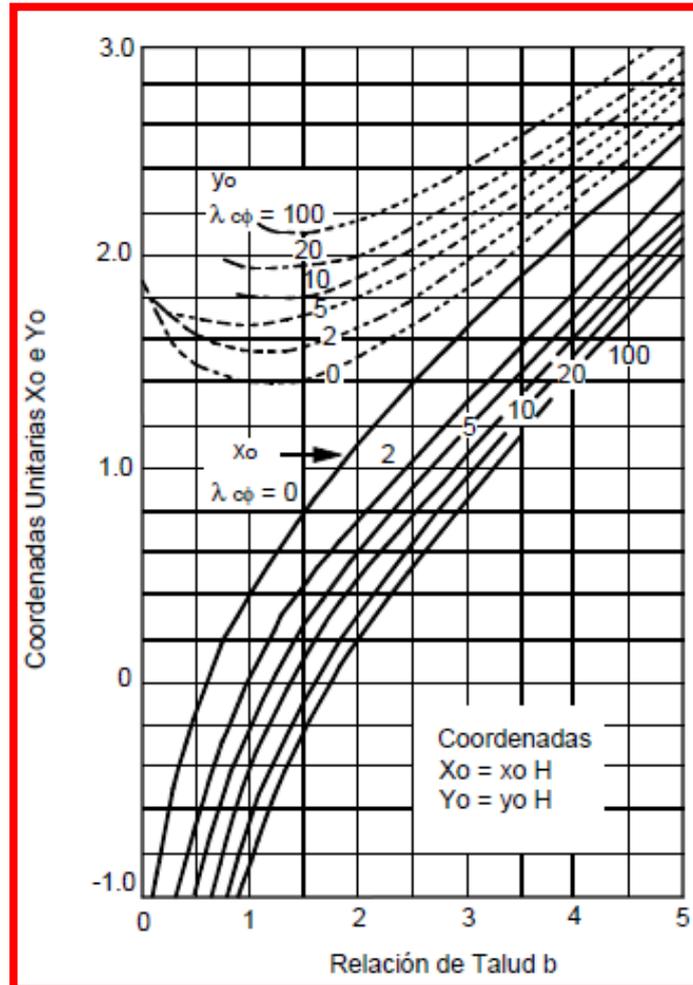


Número de estabilidad N_{cf} . Fuente: Janbu, 1968.

Paso 10. Factor de seguridad

$$F.S. = \frac{N_{cf} * C}{P_d}$$

Paso 11. Ubicar el círculo crítico, para obtener sus coordenadas se emplea la tabla siguiente: Se calcula $b = \cot \beta$



Coordenadas del centro del círculo crítico (suelos con $\Phi > 0$). Fuente: Janbu, 1968.