

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. INTRODUCCIÓN

Este trabajo trata de dar respuestas y soluciones a través de una metodología de un análisis comparativo a posibles alternativas de refuerzos para mejorar los problemas de inestabilidad en los taludes tomando en cuenta el aspecto técnico y económico de igual manera recopilando información geológica, geomorfológica y topografía de la zona de estudio, con estos datos poder determinar el Factor de Seguridad. Sin lugar a duda que en el talud constituye una estructura compleja de analizar debido a que en su estudio coinciden los problemas de mecánica de suelos y de rocas, sin olvidar el papel básico que la geología aplicada desempeña en la formulación de cualquier criterio.

Los deslizamientos son uno de los procesos geológicos más destructivos causantes de grandes daños cada año; las perdidas ocasionado por los deslizamientos son evitables si el problema se identifica con anticipación donde se puede tomar medidas de conservación mantenimiento, refuerzo y control.

Un talud es básicamente un terreno que se caracteriza por presentar una inclinación o pendiente, la cual puede ser natural o construido. Si la superficie no es horizontal una componente de la gravedad ocasionara que el suelo se mueva hacia abajo, si la componente de la gravedad es suficientemente grande ocurrirá una falla y se deslizara. Los taludes en las carreteras de nuestro país requieren conservación en forma continua ya que son afectados por factores naturales o antrópicos, que provocan el deterioro de la estructura y afectan la seguridad vial, por lo cual surge la necesidad de efectuar tareas de carácter preventivos para evitar al máximo la ocurrencia de daños en los elementos. Este presente trabajo puede ser utilizado por los profesionales de la misma área o rubro como una opción a soluciones para conocimiento y prevención de inestabilidad en los taludes obteniendo beneficios de seguridad, buen estado en los taludes y menor costo en reparaciones.

1.2. JUSTIFICACIÓN

En las regiones accidentadas o montañosas que se encuentra en equilibrio se ve afectado por la construcción de una obra vial, los que pueden presentar distintas inclinaciones, forma hecha que presentan una potencial amenaza, por lo tanto, es de suma importancia realizar un estudio adecuado para conservar la estabilidad y seguridad de los distintos taludes.

En nuestro país la infraestructura vial es uno de los componentes principales para el desarrollo económico, ya que ayuda a la integración nacional e internacional por tanto se debe contar con buenas carreteras para este fin.

En el tramo vial Pte. Jarcas - Piedra larga presenta zonas con taludes inestables debido a diversos factores como fallas geológicas, periodos de lluvias, factores topográficos y ambientales entre otros.

La factibilidad del presenté proyecto se justifica de acuerdo al equipo utilizado que hará necesario el uso de la estación total para determinar los puntos topográficos y cinta métrica en algunos sectores para determinar la altura de los taludes de la zona el equipo se encuentra en la universidad UAJMS.

Todos los equipos que se utilizara para los ensayos de laboratorio como ser granulometría, límites de Atterberg, peso específico y Corte directo se encuentran en la universidad UAJMS.

Respecto al uso de insumos necesarios se utilizará los programas Microsoft Exel, Microsoft Word, Civil 3D, SLIDE.

1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

1.3.1. Situación Problémica.

En una de las carreteras de la red fundamental perteneciente al departamento de Tarija que se dirige hacia la provincia de Gran Chaco específicamente en el tramo PTE JARCAS - PIEDRA LARGA, presenta problemas de inestabilidad, deslizamientos o derrumbes de taludes, por cuanto su topografía irregular da lugar a que en la construcción de las vías se realicen cortes importantes que están expuestos a condiciones de saturación por las aguas de lluvias y que también se ven afectados por

la combinación de otros factores generales tales como el relieve , la geología, las propiedades de los materiales, la erosión y las actividades antropogénicas a la que ha estado sometida la zona.

Sabiendo que estos taludes son producto en la construcción de la carretera y no están estabilizados, en épocas de lluvia sobre todo aquellas con gran intensidad generan su deslizamiento, ya que la presencia de agua provoca un aumento de peso de la masa de los suelos que los forman, al introducirse agua en las grietas que presenta el talud, originando un incremento de las fuerzas actuantes o aparición de fuerzas de filtración pudiendo provocar la falla del mismo.

La estabilidad de los taludes de este tramo se puede incrementar a través de refuerzos ya que su inestabilidad incrementa el índice de accidentalidad y congestión vehicular, afectando a la economía del departamento puesto que es una de las principales vías de comunicación para el comercio y transporte e incluso llegando a poner en peligro de esta manera a los vehículos y personas.

Por esta razón es necesario buscar alternativas de solución para evitar estos problemas mediante herramientas de investigación, análisis y métodos para el mejoramiento de la estabilidad de taludes en dicha zona de estudio.

1.3.2. Problema

¿Sera que a través de las alternativas de H° LANZADO, HIDROSIEMBRA Y BULONES se puedan solucionar el comportamiento de los taludes y su estabilidad?

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo general.

Analizar los taludes en el tramo PTE JARCAS - PIEDRA LARGA y proponer alternativas de refuerzos como el H° lanzado, hidrosiembra y bulones comparando los resultados de factor de seguridad analizando el proceso técnico y económico para garantizar las condiciones de estabilidad en el tramo indicado.

1.4.2. Objetivos específicos

- Analizar la geometría y los tipos de materiales que constituyen a los taludes de estudio en el tramo

- Determinar los parámetros necesarios para el dimensionamiento de refuerzos en taludes
- Dimensionar cada alternativa de refuerzo de taludes tomando en cuenta los métodos de H° lanzado, hidrosiembra y bulones
- Comparar los resultados de las alternativas estudiadas desde el punto de vista técnico y económico
- Establecer en base a los resultados obtenidos las conclusiones y recomendaciones para el tramo estudiado

1.5. HIPÓTESIS

Si utilizo alternativas de refuerzo en taludes como H° lanzado, hidrosiembra y bulones entonces se podrá conseguir una mayor estabilidad de taludes en el tramo PTE JARCAS –PIEDRA LARGA.

1.5.1. Identificación de variables

1.5.1.1. Variable dependiente

Tipo de Refuerzo en taludes

1.5.1.2. Variable independiente

Estabilidad de taludes en tramos de carretera

Tabla 1. 1 Conceptualización y operacionalización de las variables

Definición operacional				
Variable	Conceptualización	Dimensión	Indicador	Valor
Variable Independiente Estabilidad de taludes en tramos de carretera	Posición estable de la masa del suelo o roca en una inclinación dada en tramos de corte	Según el método de refuerzo para la estabilidad	Mejora o disminuye	Factor de seguridad

Variable dependiente Tipo de refuerzos en taludes	Conjunto de trabajos de construcción de refuerzos con el propósito de evitar el deterioro de inestabilidad prematuro para que mantengan su calidad y brindar seguridad en los taludes de carreteras	Estabilidad del talud	Topografía	Dimensiones
			Tipo de suelo	Clasificación del suelo
			Geología	Clasificación del estrato
	Presencia de agua Erosión	Tipo de fallas	Presencia de agua	Identificación de fallas
			Erosión	
		Tipo de amenazas	Deslizamiento	Identificación de zonas de mayor riesgo
	Factores naturales Factores antrópicos		Derrumbes	
	Nivel de deterioro	Factores naturales	Climatología	
		Factores antrópicos	Geometría del talud	

Fuente: elaboración propia

1.6. DISEÑO MÉTODOLÓGICO

1.6.1. Unidad

Estabilidad de taludes en vía rural

1.6.2. Población

Taludes de la carretera del tramo Pte. Jarcas – Piedra larga

1.6.3. Muestra

Refuerzo en taludes aplicando h° lanzado, hidrosiembra y bulones.

- El **H° Lanzado** se define como “un mortero o concreto que es lanzado a altas velocidades en forma neumática sobre una superficie, utilizando una lanza o manguera, normalmente mediante un compresor de aire.

- La **hidrosiembra** permite el esparcimiento de semillas, sustancias retenedoras de humedad, adherentes y fertilizantes químicos que aplicada sobre los taludes crea una especie de tapizados verdes.
- El **sistema de bulones** sirve como sistema pasivo para la estabilización de taludes, desmontes o rocas y para estabilizar muros excavados con bajas deformaciones. Se diferencia claramente de los anclajes al terreno y de los pilotes de tracción. Los bulones estabilizan y consolidan el terreno, aumentando su capacidad portante.

1.7. MUESTREO

- Se determinará la caracterización de los materiales de los taludes en estudio para clasificar los tipos de suelos realizando la granulometría, límites de atterberg peso específico y corte directo.
- Se sacará 3 muestras de cada talud de la parte de la base, cuerpo y corona de los 10 taludes totales en estudio para el laboratorio.

1.8. MÉTODOS Y TÉCNICAS EMPLEADAS

1.8.1. Método inductivo

El método inductivo es una estrategia de razonamiento que se basa en la inducción, para ello, procede a partir de premisas particulares para generar conclusiones generales. En este sentido, el método inductivo opera realizando generalizaciones amplias apoyándose en observaciones específicas. Esto es así porque en el razonamiento inductivo las premisas son las que proporcionan la evidencia que dota de veracidad una conclusión.

El método inductivo, como tal, sigue una serie de pasos. Inicia por la observación de determinados hechos, los cuales registra, analiza y contrasta. A continuación, clasifica la información obtenida, establece patrones, hace generalizaciones, para inferir, de todo lo anterior, una explicación o teoría.

Aplicado al tema refuerzo en taludes aplicando H° lanzado, hidrosiembra y bulones como solución para estabilización de taludes.

- Los taludes de corte, compuesto de materiales que tienden a presentar deslizamientos constantes en épocas de lluvia.
- Como consecuencia de las fallas en los taludes se da los deslizamientos que serán controlados con refuerzos de h° lanzado, hidrosiembra y bulones, capaces de sostener el material deslizado.
- Teniendo en común taludes a reforzar para mayor estabilidad
- Los taludes presentan deslizamientos debido a las fallas internas, serán estabilizados con h° lanzado, hidrosiembra y bulones

1.9. TÉCNICAS

1.9.1. Inventariación de los taludes de estudio

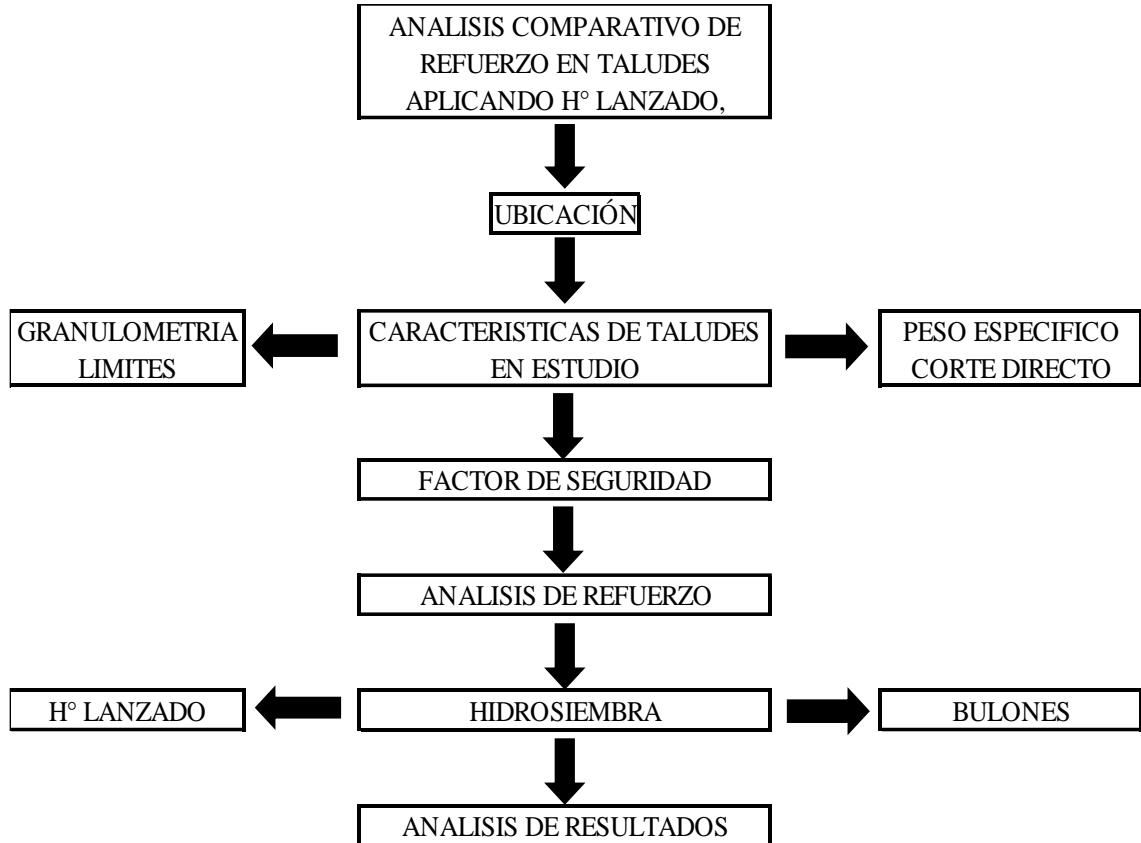
Para este punto se ira a dicho lugar donde están ubicados los taludes a sacar todas las informaciones y muestras necesarias como, dimensiones de ancho y altura como así también que características técnicas presentan de cada talud de estudio para luego realizar el trabajo de laboratorio luego de sus resultados posteriormente realizar los cálculos de estabilidad

1.9.2. Uso del software SLIDE

El software SLIDE es una herramienta informática que se usa para analizar si un talud es estable o si puede deslizarse. Con este programa se pueden dibujar los taludes, colocar los distintos tipos de suelo, añadir su caracterización y propiedades y luego calcular el factor de seguridad (FS) que indica si el talud está en riesgo o no. Otra función importante permite que también se podrá calcular para mejorar la estabilidad añadiendo refuerzos como Bulones, Hidrosiembra, H° Lanzado, etc.

1.10. PROCESO DE APLICACIÓN

Figura 1. 1 Diagrama de flujo



Fuente: Elaboración propia

1.11. ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN

El estudio de Taludes abarca con el objetivo de garantizar la seguridad vial en el tramo carretero de El Puente Jarcas – Piedra Larga donde se llevará a cabo un análisis detallado de los taludes existentes para ello, se realizará una evaluación integral de la zona que incluirá: Ubicación e identificación de los taludes a estudiar, caracterización geotécnica mediante ensayos de laboratorio apropiados para determinar las propiedades del suelo y roca presentes como la clasificación del suelo a través de granulometría, límites de atterberg, peso específico y corte directo para el análisis de estabilidad utilizando el software computacional Slide, con el fin de identificar las

zonas críticas de falla y determinar los factores de seguridad más bajos para el análisis de diseño de soluciones de estabilización, considerando refuerzos como H° lanzado, hidrosiembra y bulones, seleccionados de acuerdo con las características geomecánicas del terreno y la geometría de cada talud. Este estudio contemplará tanto los aspectos técnicos como económicos, buscando optimizar las intervenciones y asegurar la estabilidad de los taludes a largo plazo, contribuyendo así a la seguridad y funcionalidad del tramo vial

CAPÍTULO II

CARACTERÍSTICAS Y

PROPIEDADES DE LOS

TALUDES

CAPÍTULO II

CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES DE LOS TALUDES

2.1. GENERALIDADES

El tránsito es muy frecuentemente perturbado por daños geológicos producto de lluvias fuertes. En particular, las perturbaciones en el tráfico son causadas mayormente por la falla de taludes. La estabilidad de un talud 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 disminución en la resistencia del terreno por infiltración de agua en el terreno o lluvia fuerte, cambios en el balance de gravedad debido a cortes artificiales y rellenos, aumento en la presión de poros debido a lluvia fuerte o movimiento del agua freática. En el tema, las fallas de taludes se clasifican en "Deslizamientos" y "Fallas". Levantamientos y mediciones anteriores son de gran importancia, ya que las áreas donde se esperan fallas frecuentes están determinadas por condiciones geológicas y pueden predecirse topográficamente. Suárez Díaz, G. (1998).

2.2. CARACTERÍSTICAS DE LOS TALUDES

2.2.1. Definición de taludes

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

La inestabilidad de taludes es entendida como la tendencia que tienen todos los taludes a moverse y fallar, originándose un consiguiente movimiento de masa. Este movimiento de masa, es por lo general, el resultado de la falla al corte que se produce en una superficie interna del talud; pudiendo deberse también a la disminución del esfuerzo efectivo existente entre partículas que ocasiona la licuefacción del suelo. La

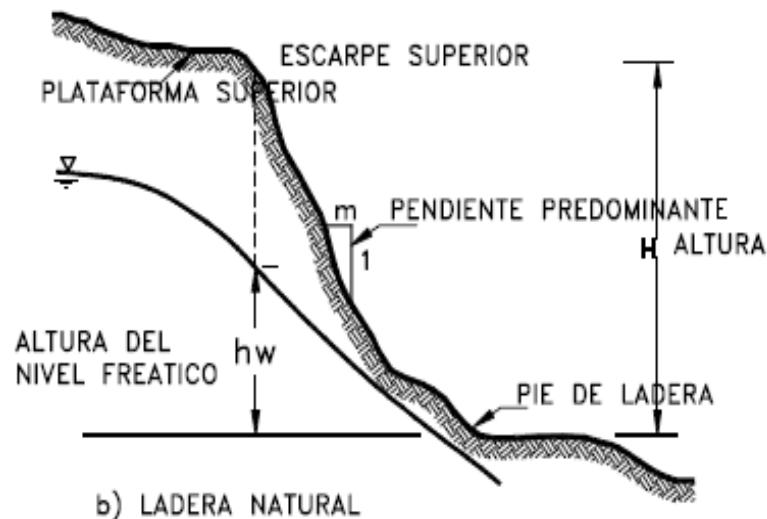
resistencia a la falla en taludes radica principalmente en la resistencia al cortante del suelo mismo y en la geometría del talud.

Hoy en día, debido al incremento de obras de ingeniería relacionadas con cortes y rellenos, la necesidad de entender métodos analíticos, y métodos de estabilización que puedan resolver el problema de estabilidad de taludes ha ido creciendo, es por esta razón que se hace fundamental el entendimiento de la geología, hidrología, y de las propiedades del suelo, de tal modo que estos conceptos básicos sean aplicados de manera correcta al problema de estabilidad de taludes.

Existen dos tipos de clasificaciones de los taludes, que son las siguientes:

- a. **Taludes naturales o laderas.** - Son los que se formaron sin ninguna participación del hombre. Las laderas que han permanecido estables por muchos años pueden fallar en forma imprevista debido muchas veces a los cambios topográficos, sismos, flujos de agua subterránea, cambios en la resistencia del suelo, meteorización, o factores de tipo antrópico o natural que modifiquen su estado natural de estabilidad.

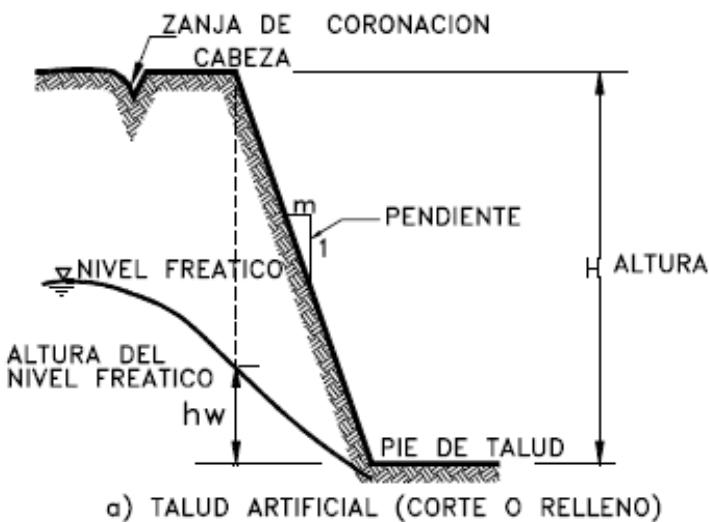
Figura 2. 1 Nomenclatura de taludes y laderas



Fuente: Suárez Díaz. 1998.

- b. Taludes artificiales.** - Cuando los taludes son hechos por el hombre se denominan cortes o taludes artificiales, según sea la génesis de su formación; en el corte, se realiza una excavación en una formación térrea natural (desmontes), en tanto que los taludes artificiales son los lados inclinados de los terraplenes.

Figura 2. 2 Nomenclatura de taludes y laderas



Fuente: Suárez Díaz. 1998.

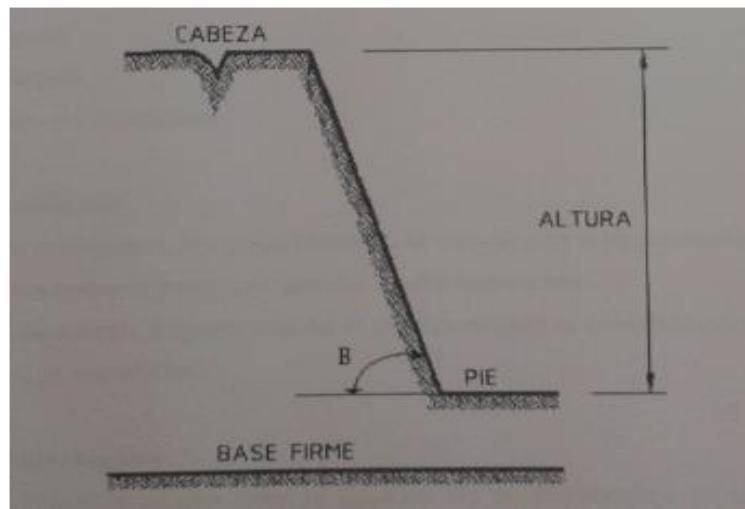
2.2.2. Componentes de un talud

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

- **La altura** - Es la distancia vertical entre el pie y la cabeza, la cual se presenta claramente definida en taludes artificiales, pero es complicada de cuantificar en las laderas debido a que el pie y la cabeza no son accidentes topográficos bien marcados.
- **Pie.** - Corresponde al sitio de cambio brusco de pendiente en la parte inferior.
- **Cabeza o cresta.** - Se refiere al sitio de cambio brusco de pendiente en la parte superior.
- **Altura de nivel freático.** - Distancia vertical desde el pie del talud o ladera hasta el nivel de agua medida debajo de la cabeza.

- **Pendiente.** - Es la medida de la inclinación del talud o ladera. Puede medirse en grados, en porcentaje o en relación $m/1$, en la cual m es la distancia horizontal que corresponde a una unidad de distancia vertical.
- **Base firme.** - Es el estrato con mayor resistencia que el suelo del cuerpo del talud y que no es penetrado por la superficie del deslizamiento.

Figura 2. 3 Componentes de un talud

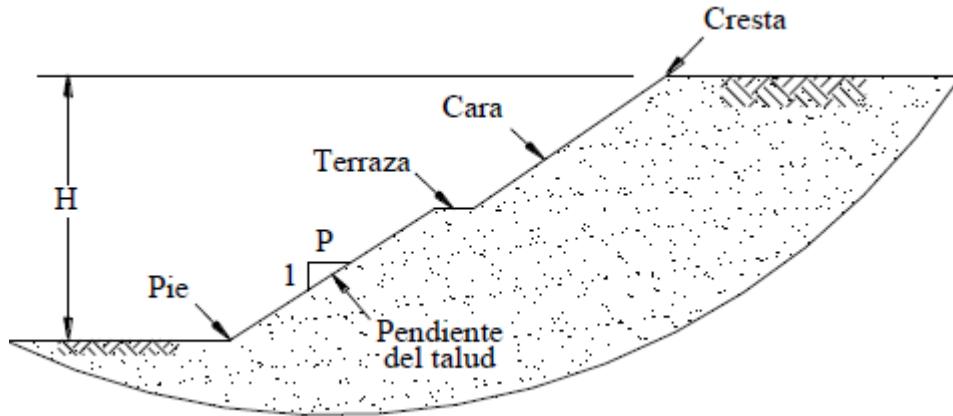


Fuente: Cujar Chamorro, Germán. Estabilidad de taludes. Universidad del Cauca, Instituto de postgrado en Ingeniería Civil, Popayán Colombia

La inclinación (B) de un talud depende de:

- Altura del talud.
 - Condiciones topográficas.
 - Estructuras geológicas.
 - Tipo de suelo o roca.
 - Resistencia al esfuerzo cortante del suelo.
- **La cara del talud.** - Es la superficie del terreno situada entre la cresta y el pie del talud.
 - **La terraza.** - Es un área estrecha ubicada a un cierto nivel del talud con el objeto de facilitar la colocación de superficies de drenaje.

Figura 2. 4 Nomenclatura usada para describir taludes



Fuente: Salinas Pereira. 2005.

2.2.3. Taludes en carreteras

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

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

En cambio, en los cortes el ingeniero está atenido al uso riguroso de los materiales existentes (*in situ*) con toda la heterogeneidad que la naturaleza lo haya dispuesto, por lo tanto, la influencia del constructor es limitada, de tal manera que la influencia del ingeniero debe ser diferente de un caso a otro.

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

- Terraplenes en suelo blando.
- Terraplenes en cañadas de terreno montañoso.

- Terraplenes en laderas inclinadas.
- Accesos a puentes y pasos a desnivel.
- Terraplenes sobre suelos licuables.
- Terraplenes con riesgo de tubificación.

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

- Cortes de gran altura.
- Cortes de laderas inestables.
- Cortes sujetos a flujos de agua.
- Cortes en suelos erosionables.

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

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

- a) Reconocer y clasificar el tipo de falla, definir sus características más sobresalientes Ej.: Causas del deslizamiento, velocidad del movimiento.
- b) Identificar y clasificar los materiales involucrados en el movimiento, definir sus propiedades físicas y mecánicas.
- c) Seleccionar el método para el cálculo de la estabilidad del talud.
- d) Correlacionar las observaciones de campo con los resultados del cálculo.

2.2.4. Propiedades de los taludes

2.2.4.1. Cohesión

La cohesión es una medida de la adherencia entre las partículas de suelo. La cohesión en la mecánica de suelos, es utilizada para representar la resistencia al cortante producida por la cementación entre las partículas, mientras que en la física, este término se utiliza para representar la resistencia a la tensión.

Para el caso de suelos compuestos de partículas con forma granular, la trabazón entre partículas, origina estructuras granulares simples y la fricción que se origina entre ellas contrarresta el deslizamiento de unas respecto a otras. A este comportamiento se lo identifica como la cohesión para el caso de suelos granulares, donde el suelo presenta resistencia contra su disgregación ocasionada por un agente externo.

El grado de cohesión que presentan los suelos granulares, está en función a la textura de las partículas de forma granular. Las partículas con textura angular logran que el suelo tenga cohesión, mientras que las partículas con textura redondeada no contribuyen a la cohesión del suelo.

2.2.4.2. 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.

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 aplicada a dicho plano.

2.2.4.3. Resistencia al corte

La resistencia al corte se define como el máximo valor de esfuerzo cortante que el suelo puede soportar, existen dos tipos de resistencia al cortante utilizados en el análisis de estabilidad, la resistencia no-drenada y la resistencia drenada. La resistencia no-drenada se utiliza en análisis con esfuerzos totales, mientras que la resistencia drenada se utiliza en análisis con esfuerzos efectivos. Suarez Díaz (1998).

2.2.4.4. Permeabilidad

Esta es usada como un parámetro para evaluar la resistencia que ofrecida el suelo al flujo de agua. La permeabilidad hidráulica depende en gran manera de la estructura del suelo, las propiedades que influyen en la conductividad hidráulica son:

- El tamaño de partículas.
- La gradación del suelo.
- El índice de vacíos del suelo.
- La textura y rugosidad de las partículas.
- Temperatura.
- Viscosidad del fluido.

La conductividad hidráulica (K) es medida en unidades similares a la velocidad, su intervalo de variación para el suelo es muy amplio. Se extiende desde un valor insignificante de 10^{-7} cm/s para el caso de arcillas, hasta un máximo de 100 cm/s para el caso de algunas gravas. Salinas Pereira (2005).

2.2.4.5. Presión de poros

La presión de poros consiste en la presión en el agua dentro de los poros del suelo y se identifica con la letra “ μ ”. Ocurre que cuando esa presión llega a cierto valor, el suelo se vuelve inestable, debido a que las partículas pierden cohesión entre sí.

La presión de poros disminuye los esfuerzos normales efectivos entre las partículas, trata de separarlas y disminuye la resistencia a la fricción. Al colocar una carga se puede producir un cambio en la presión de poros que se denomina como $\Delta\mu$ (exceso de presión de poros) o deficiencia de presión de poros inducidos por las condiciones de carga. Suarez Díaz. (1998).

Si el agua en el suelo no está en movimiento, la altura del agua genera un fenómeno de presión hidrostática:

$$\mu = \gamma w \cdot Z w$$

Donde:

γw = Peso unitario del agua.

zw = Profundidad vertical del punto por debajo del nivel de agua freática.

2.2.4.6. Expansividad

Los suelos arcillosos al contacto con el agua expanden su volumen produciéndose movimientos de extensión dentro de la masa del suelo. La expansividad de un suelo se puede medir por medio de ensayos de presión de expansión o expansión libre o por su relación con los límites de plasticidad.

2.2.4.7. Peso específico

El peso específico de un suelo, como relación entre el peso y su volumen, es un valor dependiente de la humedad, de los huecos de aire y del peso específico de las partículas sólidas. Para evitar confusiones, las determinaciones de los ensayos de laboratorio facilitan por un lado el peso específico seco y por otro la humedad. Fijémonos que este término es diferente de la densidad del suelo, que establece una relación entre la masa y el volumen. También suele utilizarse un valor adimensional denominado, peso específico relativo, definido como el cociente entre el peso específico del suelo y el peso específico del agua a una temperatura determinada.

El peso específico de los sólidos de arena, que está compuesta principalmente de cuarzo, se puede estimar en alrededor de 2.65 para suelos arcillosos y limosos, pudiendo variar desde 2.6 hasta 2.9. Braja Das. (2013).

2.3. ESTABILIDAD DE LOS TALUDES

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

Convencionalmente la teoría divide a los taludes en estables o inestables.

- **Taludes estables**, que son los que no se han caído, tienen un factor de seguridad superior a 1.

- **Taludes inestables**, que son los que se han caído total o parcialmente, tienen un factor de seguridad inferior a 1.

Además, los taludes pueden tener inestabilidades locales, aunque sean estables en conjunto. Es más práctico clasificar los taludes en 5 categorías atendiendo al grado de estabilidad Romana, (1993,1995):

- **Talud totalmente estable.** - Sin ninguna inestabilidad local.
- **Talud estable.** - Con alguna inestabilidad local; puede requerir algunos sostenimientos locales o protecciones.
- **Talud parcialmente estable.** - Con bastantes inestabilidades locales; requiere sostenimientos locales o protecciones.
- **Talud inestable.** - Con muchas inestabilidades locales y riesgo de inestabilidad total; requiere un tratamiento general de estabilización.
- **Talud totalmente inestable.** - Con inestabilidad total; no se puede excavar sin un sostenimiento completo y/o necesita re excavación.

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

Sin embargo, no todos los factores que afectan la estabilidad de un talud se pueden cuantificar para incluirlos en un modelo matemático. Por lo tanto, hay situaciones en las cuales un enfoque matemático no produce resultados satisfactorios. A pesar de las debilidades de un determinado modelo, determinar el factor de seguridad asumiendo superficies probables de falla, permite al ingeniero tener una herramienta muy útil para la toma de decisiones.

Se pueden estudiar superficies planas, circulares, logarítmicas, parabólicas y combinaciones de ellas. La mayoría de los trabajos que aparecen en la literatura sobre

el tema asumen que el suelo es un material isotrópico y han desarrollado métodos de análisis de superficies circulares o aproximadamente circulares principalmente.

2.3.1. Estabilidad de taludes en la Carretera al Chaco

La estabilidad de taludes en la carretera al Chaco hace referencia a la capacidad de los cortes y rellenos en los taludes laterales de esta vía para mantenerse en equilibrio estructural frente a la acción de cargas naturales (gravedad, lluvias, sismos) y antrópicas (tránsito vehicular, intervenciones humanas), sin sufrir procesos de deslizamiento, deformación o colapso que afecten la seguridad y funcionalidad de la infraestructura vial.

Este tramo carretero, que conecta las regiones del valle central de Tarija con la zona del Chaco boliviano, atraviesa una geografía altamente accidentada y con condiciones geotécnicas complejas, caracterizada por pendientes pronunciadas, suelos erosionables, formaciones geológicas heterogéneas y una alta incidencia de precipitaciones en época de lluvias. Estas condiciones generan un alto riesgo de inestabilidad de taludes, tanto en cortes como en terraplenes, que puede derivar en obstrucciones viales, pérdida de plataformas, daños estructurales y accidentes.

Según la Administradora Boliviana de Carreteras (ABC), este corredor es uno de los más críticos del país en cuanto a mantenimiento por fenómenos geodinámicos, como deslizamientos activos, caída de rocas, saturación de taludes y erosión superficial.

2.4. FACTOR DE SEGURIDAD

El análisis de los movimientos de los taludes o laderas durante muchos años se ha realizado utilizando las técnicas del equilibrio límite. Este tipo de análisis requiere información sobre la resistencia del suelo, pero no se requiere sobre la relación esfuerzo-deformación.

Es el factor de amenaza calculado para que el talud falle en las peores condiciones de comportamiento para el cual se diseña. Se define como la relación entre la fuerza total disponible para resistir el deslizamiento y la fuerza total que tiende a inducir el deslizamiento; es decir:

$$FS = \frac{\text{Fuerza resistente}}{\text{Fuerza actuante}}$$

El factor de seguridad es empleado por los ingenieros para conocer cuál es el factor de amenaza de que el talud falle en las peores condiciones de comportamiento para el cual se diseña. La mayoría de los sistemas de análisis asumen un criterio de “equilibrio límite” donde el criterio de falla es satisfecho a lo largo de una determinada superficie.

$$FS = \frac{\text{Momento resiste disponible}}{\text{Momento actuante}}$$

La condición de equilibrio límite existe cuando el FS es igual a 1. Cuando el talud es estable, las fuerzas resistentes serán mayores que las fuerzas actuantes y cuando el talud es inestable ocurrirá el caso contrario. Por lo tanto, el FS es un índice que define la estabilidad o inestabilidad de un talud.

Tabla 2. 1 Métodos de análisis de estabilidad de taludes

Método	Superficies de falla	Equilibrio	Características
Ordinario de Fellenius (Fellenius 1927)	Circulares	De fuerzas	Este método es muy utilizado por su procedimiento simple. Muy impreciso para taludes planos con alta presión de poros. Los factores de seguridad son bajos.
Bishop simplificado (Bishop 1955)	Circulares	De momentos	Asume que todas las fuerzas de cortante entre dovelas son cero. Reduciendo el número de incógnitas. La solución es sobre determinada debido a que no se establecen condiciones de equilibrio para una dovela.

Janbú Simplifica do(Janbú 1968)	Cualquier forma de superficie defalla.	De fuerzas	Al igual que Bishop asume que no hay fuerza de cortante entre dovelas. La solución es sobredeterminada que no satisface completamente las condiciones de equilibrio de momentos. Los factores de seguridad son bajos.
Spencer (1967)	Cualquier forma de superficie defalla.	Momento s y fuerzas	Asume que la inclinación de las fuerzas laterales son las mismas para cada tajada. Rigurosamente satisface el equilibrio estático asumiendo que la fuerza resultante entre tajadas tiene una inclinación constante pero desconocida.
Morgenster n yPrice (1965)	Cualquier forma de superficie defalla.	Momento s y fuerzas	Asume que las fuerzas laterales siguen un sistema predeterminado. El método es muy similar al método Spencer con la diferencia que la inclinación de la resultante de las fuerzas entre dovelas se asume que varía de acuerdo a una función arbitraria.

Fuente: Suarez Diaz.1998

2.5. NORMAS Y GUÍAS INTERNACIONALES DE ESTABILIDAD EN TALUDES

➤ Estados Unidos

- **US Army Corps of Engineers (USACE) – EM 1110-2-1902**
 - “Slope Stability” (2003): guía completa sobre métodos de análisis de estabilidad.
- **ASTM Standards**
 - ASTM D653 – Terminología sobre geotecnia.
 - ASTM D3080 – Ensayo de corte directo para suelos.
 - ASTM D5333 – Ensayo de tracción en rocas.

➤ **Normas Eurocode**

- **Eurocódigo 7: Diseño Geotécnico (EN 1997-1)**
 - Introduce el método de estados límites y factores parciales de seguridad.
 - Aplicación común en Europa para diseño geotécnico y estabilidad de taludes.

2.5.1. Métodos clásicos de análisis (referencias técnicas estándar)

Aunque no son “normas” pero, estos métodos son ampliamente aceptados y utilizados.

Tabla 2. 2 Métodos dentro del LEM

Método	Precisión	Características
Morgenstern-Price	Alta	Considera fuerzas intersegmentales y cumple condiciones de equilibrio completo.
Spencer	Muy alta	Asume fuerza intersegmental constante, equilibrio total. Muy preciso.
Bishop simplificado	Media-Alta	Solo equilibrio de momentos. Rápido y aceptable para taludes suaves en suelos.
Janbu generalizado	Media-Alta	Considera equilibrio de fuerzas. Útil para geometrías irregulares.
Fellenius (círculo de Swedish)	Básico	Método antiguo, conservador, no tan preciso.

Fuente: "Slope Stability and Stabilization Methods" – Abramson et al. (2002)

2.5.2. Normativas en América Latina (Ejemplos relevantes)

a) Bolivia

Según la Norma Boliviana NB-1225001 (Estabilidad de Taludes) y los lineamientos de la Administradora Boliviana de Carreteras (ABC), los valores recomendados del Factor de Seguridad (FS) varían según las condiciones de carga, el tipo de material y la importancia de la obra

Tabla 2. 3 Valores de FS en Bolivia

Condición de análisis	Tipo de material	FS mínimo recomendado:
Condición estática (normal)	Suelo	1.5
	Roca	1.3
Condición crítica (ej. saturado)	Suelo o Roca	1.2 – 1.3
Condición sísmica	Suelo o Roca	1.1
Obras permanentes (carreteras, estructuras)	General	≥ 1.5
Obras temporales (ej. excavación provisional)	General	≥ 1.3

Fuente: NB-1225001 (Estabilidad de Taludes) y ABC

2.5.3. Normativa de diseño de estabilidad de taludes en condición sísmica.

¿Por qué no siempre se considera el diseño sismorresistente en la estabilidad de taludes?

2.5.3.1. Evaluación del nivel de amenaza sísmica

Muchas normativas, incluida la Norma Boliviana NB-1225001 (Diseño Geotécnico para Obras Viales), establecen que el análisis sísmico solo se aplica si el proyecto se encuentra en una zona de amenaza sísmica significativa. En zonas con baja sismicidad (como partes del altiplano o los valles), el diseño bajo condiciones normales (estáticas) suele ser suficiente.

2.5.3.2. Tipo y categoría de la obra

- Para carreteras secundarias o terciarias, o en obras temporales o de bajo riesgo, muchas veces no se justifica un diseño sísmico.
- El diseño sismorresistente sí es obligatorio en obras críticas como presas, túneles, hospitales, y carreteras principales en zonas de alta sismicidad.

2.5.3.3. Criterios económicos y de factibilidad

El diseño sísmico generalmente implica

- Mayor grado de seguridad (FS mínimo de 1.1 a 1.2).
- Refuerzos adicionales y obras más costosas.

Si el riesgo sísmico es bajo, **los costos del refuerzo sismorresistente no se justifican técnicamente ni económicoamente.**

2.5.3.4. Análisis por pseudopresión sísmica (cuando sí se aplica)

Cuando se considera el diseño sísmico, se usa un modelo pseudodinámico, como el método de Newmark o la pseudopresión horizontal (Mononobe–Okabe). El análisis incluye una fuerza sísmica horizontal equivalente:

$$FS = kh \cdot W$$

Donde:

kh: coeficiente sísmico horizontal (0.05–0.15, según la norma sísmica boliviana)

W: peso del bloque o masa deslizable

➤ **Manual de Carreteras del MTC (Perú)**

Contiene especificaciones claras sobre análisis de estabilidad de taludes y FS mínimos.

- FS ≥ 1.5 para condiciones normales
- FS ≥ 1.3 para casos críticos o sísmicos

➤ **Manual de Carreteras del MOP (Chile)**

Define procedimientos para estabilidad de laderas y estructuras de contención.

Tabla 2. 4 Factores de seguridad típicos según condición en Chile

Condición del talud	FS mínimo recomendado
Talud en condición estática	1.5
Talud temporal	1.2 - 1.3
Condición sísmica	1.1 - 1.2
Taludes en roca	Según continuidad y resistencia

Fuente: MOP (Chile)

2.6. PARÁMETROS QUE INFLUYEN EN LA ESTABILIDAD DE UN TALUD

Los deslizamientos en un talud son principalmente el resultado de la disminución gradual de la resistencia del esfuerzo cortante del suelo y del incremento de las fuerzas gravitacionales y la influencia de muchos otros parámetros que determinan la estabilidad, entre los cuales se pueden mencionar los siguientes:

Geológicos, hidrológicos e hidrogeológicos, geométricos, ambientales y antrópicos
Sobrecargas, etc.

2.6.1. Parámetros geológicos

Las estructuras geológicas, los plegamientos, la inclinación o buzamiento de las capas tienen influencia sobre el principio general de deslizamiento.

Así como son de mucha importancia en el deslizamiento la constitución mineralógica y espesores de los materiales.

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

Los elementos geológicos principales a estudiar son los siguientes:

2.6.1.1. Formación geológica

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

2.6.1.2. Estructura y discontinuidades

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

2.6.1.3. Meteorización

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

2.6.2. Parámetros hidrológicos e hidrogeológicos

Se sabe de la importancia que tiene el agua en los deslizamientos, ya que los cuales pueden ocurrir a causa del agua superficial o de escorrentía como también a causa del agua subterránea que actúan como detonadores de movimientos en las laderas o taludes y estos se encuentran generalmente, relacionados con las lluvias y la hidrología superficial.

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

2.6.2.1. Características de las lluvias

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

2.6.2.2. Agua superficial o de escorrentía

El agua de la lluvia y el agua producida por el deshielo penetran en las grietas de un suelo produciendo presión hidrostática, también la presión de poros aumenta y por consiguiente la resistencia al corte de los suelos disminuye.

2.6.2.3. Agua subterránea

El flujo de aguas subterráneas ejerce presión sobre las partículas de suelo formando cavidades dentro del talud afectando a su estabilidad. Los cambios bruscos del nivel del agua provocan presión de poros en el talud y esto conlleva a una disminución de la resistencia al esfuerzo cortante.

La infiltración al suelo por las lluvias a través de grietas o fisuras tiende a aumentar flujos sub superficiales y subterráneos, además aumenta la saturación de materiales.

2.6.3. Parámetros geométricos

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

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

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

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

2.6.3.1. Pendiente

Los cambios en la pendiente de un talud pueden ser causados por la intervención natural o artificial ya sea por erosión o por excavación del pie del talud. El aumento en la pendiente de los taludes produce un cambio en los esfuerzos internos de la masa y las condiciones de equilibrio son alteradas por los incrementos en los esfuerzos cortantes.

Mientras algunos suelos residuales de origen ígneo permiten ángulos del talud superiores a 45° , en lutitas meteorizadas saturadas éste no debe exceder los 20° y hasta valores de la mitad del ángulo de fricción.

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

2.6.3.2. Curvatura

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

2.6.3.3. Largo - ancho

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

2.6.3.4. Áreas de infiltración arriba del talud

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

2.6.4. Parámetros ambientales y antrópicos

El clima ejerce una influencia en la tasa de meteorización. Según Blight las reacciones químicas se duplican con cada 10°C de aumento de la temperatura. Factores tales como: evaporación, fuerzas sísmicas, vegetación y modificaciones causadas por el hombre, pueden producir alteración del talud lo cual afecta su inestabilidad.

La vegetación, en general, protege al suelo contra la erosión, aísla al material de agentes atmosféricos, evitando contracciones, cambios de humedad y de temperatura, ayudando a la estabilidad del talud.

Las raíces de los árboles contribuyen a secar los taludes absorbiendo parte de las aguas subterráneas.

Las vibraciones producidas por movimientos sísmicos, explosiones de gran magnitud y vibraciones de máquinas, afectan al equilibrio de los taludes, provocando cambios de esfuerzos temporales debido a oscilaciones de diferente frecuencia.

2.6.5. Sobrecargas

Si sobre la cabeza de un talud o ladera natural se construye un terraplén, edificaciones y otras sobrecargas como la acumulación de materiales por caídos o deslizamientos, éstos originan un incremento en el esfuerzo cortante y en la presión de poros que pueden igualar o rebasar la resistencia al esfuerzo cortante del suelo causando inestabilidad.

2.7. TIPOS DE DESLIZAMIENTOS EN TALUDES

Se denominan deslizamientos, a la ruptura y desplazamiento pendiente abajo, de una masa de suelo, roca o mezcla de ambos en forma lenta o rápida, generalmente de gran magnitud producido por varios factores que influyen en la estabilidad de un talud que fueron mencionados anteriormente.

La mecánica del deslizamiento, origina un movimiento hacia abajo y hacia afuera de toda masa y presenta las siguientes características generales: La parte superior del área denominada zona de arranque o raíz, la cual va precedida de grietas tensionales y asentamientos; la parte central constituida por la superficie de deslizamiento, donde se desplaza todo tipo de material; y la parte inferior, llamada zona de acumulación o lengua, la cual se levanta con grietas radicales.

Teniendo en cuenta una amplia gama de factores que influyen en un deslizamiento o movimiento de masa, es poco probable que exista una rigurosa clasificación, pero puede citarse la siguiente forma que tiene una amplia aceptación:

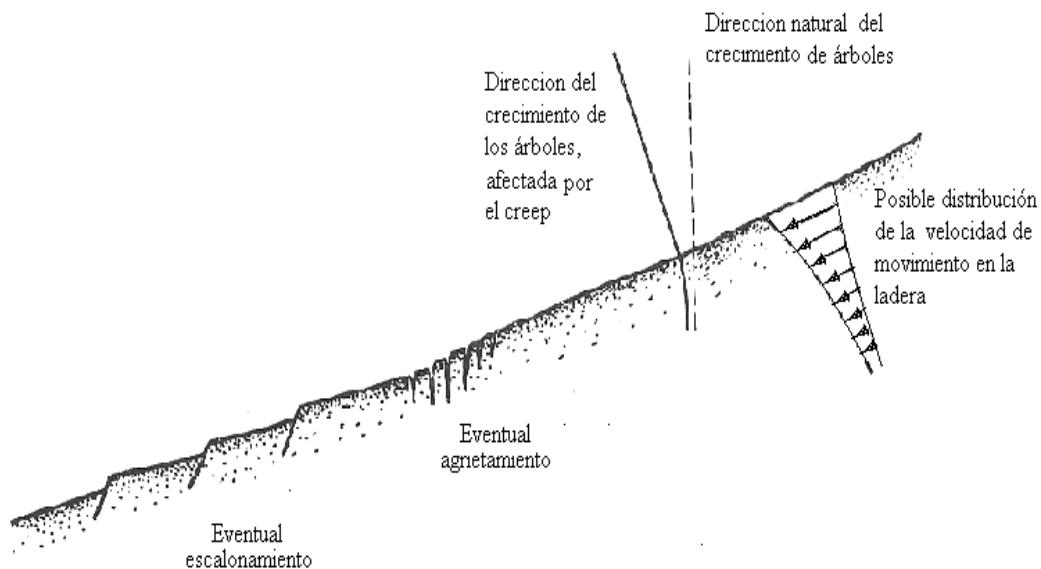
- Deslizamientos ligados a la estabilidad de las laderas naturales.
- Deslizamientos relacionados a la estabilidad de taludes artificiales.
- Derrumbes y caídas.
- Deslizamientos no directamente asociados a la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos.
-

2.7.1. Deslizamientos ligados a la estabilidad de las laderas naturales

2.7.1.1. Deslizamiento superficial (Creep)

Este deslizamiento se refiere a un proceso más o menos continuo y por lo general lento de masas superficiales que se deslizan ladera abajo en algunas laderas naturales. El Creep suele afectar a grandes áreas y el movimiento superficial se produce sin una transición brusca entre la parte superficial móvil y las masas inmóviles más profundas.

Figura 2. 5 Signos de deslizamiento superficial o Creep

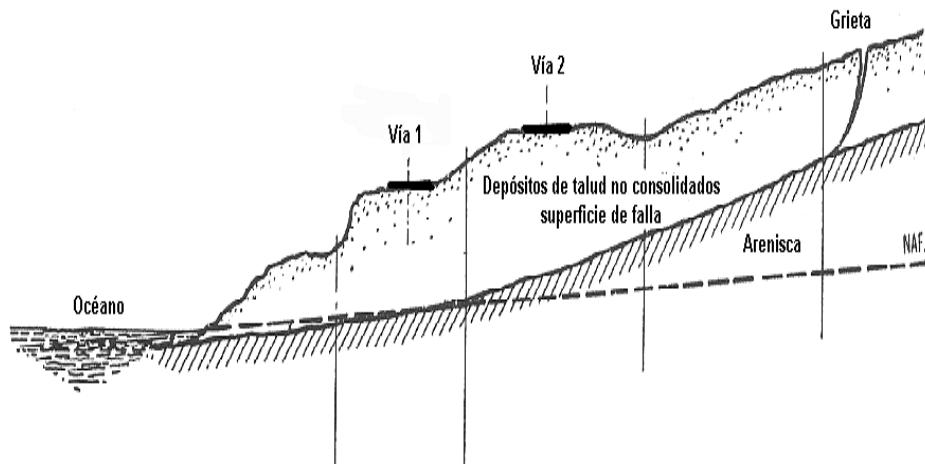


Fuente: Cujar Chamorro. 2008.

2.7.1.2. Deslizamientos asociados a procesos de deformación acumulativa

Se refiere al tipo de deslizamientos que se producen en las laderas naturales como consecuencia de procesos de deformación acumulativa, por la tendencia de grandes masas a moverse ladera abajo. Este tipo de deslizamiento quizás es típico de laderas naturales en depósitos de talud formadas por materiales bastante heterogéneos, no consolidados y bajo la acción casi exclusiva de las fuerzas gravitacionales.

Figura 2. 6 Falla descrita en una ladera natural



Fuente: Suárez Díaz. 1998.

2.7.1.3. Flujos

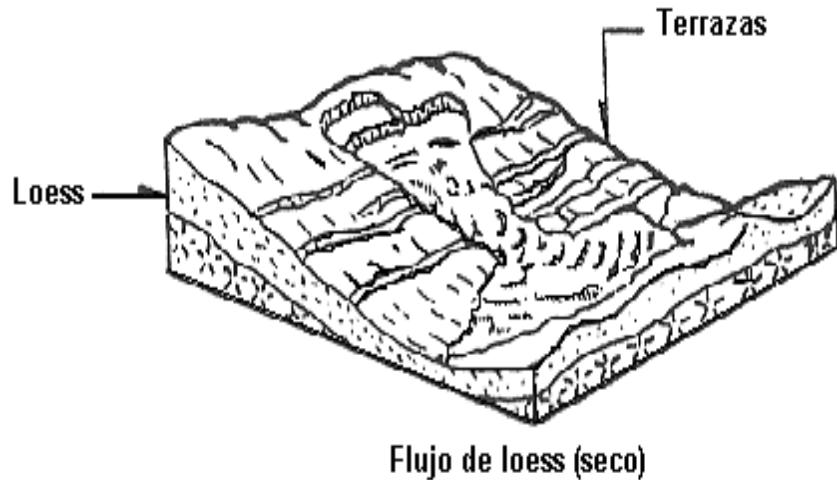
Se refiere este tipo de deslizamiento a movimientos más o menos rápidos de una parte de la ladera natural, de tal manera que el movimiento en sí y la distribución aparente de velocidades y desplazamientos recuerda el comportamiento de un líquido viscoso.

El material susceptible de fluir puede ser cualquier formación no consolidada, y así el fenómeno puede presentarse en fragmentos de roca, depósitos de talud, suelos granulares finos o arcillas francas, son frecuentes los flujos de lodo.

➤ Flujo en materiales relativamente secos (Flujo de tierra).

En este grupo quedan comprendidos, en primer lugar, los flujos de fragmentos de roca, desde los muy rápidos (avalanchas) hasta los que ocurren lentamente. Estos movimientos pueden explicarse en términos de la falla plástica de los contactos profundos entre los fragmentos de roca.

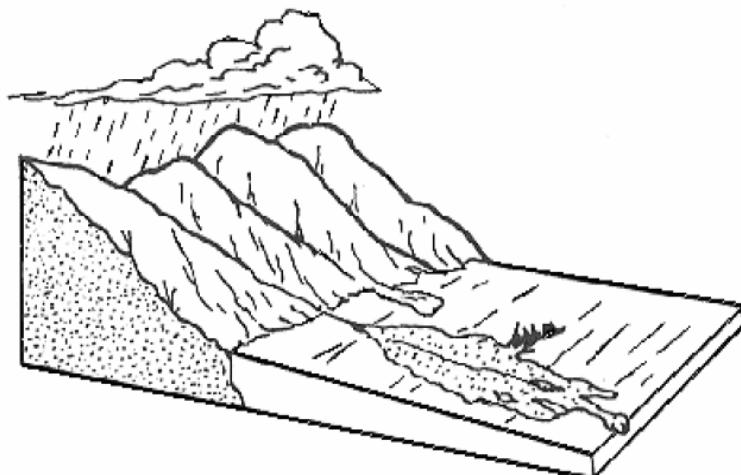
Figura 2. 7 Flujo en materiales secos



Fuente: Suárez Díaz. 1998.

- **Flujo en materiales húmedos (Flujos de lodos).** Son flujos que requieren una proporción apreciable de agua contenida en el suelo, la cual desempeña un papel en la génesis y naturaleza de la falla, existe amplia graduación en la cantidad de agua que pueden contener los materiales, así como en el papel que ésta llega a tener en el desarrollo de la falla.

Figura 2. 8 Flujo en materiales húmedos



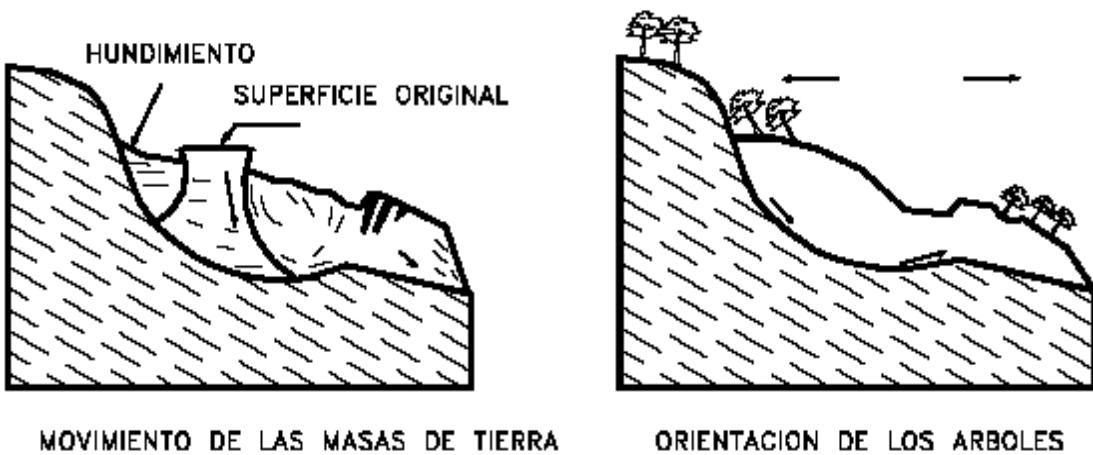
Fuente: Suárez Díaz. 1998

2.7.2. Deslizamientos relacionados a la estabilidad de taludes artificiales

2.7.2.1. Deslizamiento rotacional

El deslizamiento de tipo rotacional puede producirse a lo largo de superficies de fallas identificables con superficies cilíndricas o conoidales cuya traza con el plano del papel sea un arco de circunferencia o pueden adoptar formas algo diferentes por el perfil estratigráfico y la naturaleza de los materiales. Desde luego los deslizamientos rotacionales de forma circular ocurren por lo común en materiales arcillosos homogéneos, en general, afectan a zonas relativamente profundas del talud, siendo esta profundidad mayor cuánto más escarpado sea aquél.

Figura 2. 9 Deslizamiento rotacional típico



Fuente: Suárez Díaz. 1998.

2.7.2.2. Deslizamiento translacional

Estos deslizamientos, por lo general, consisten en movimientos translacionales importantes del cuerpo del talud sobre superficies de falla básicamente planas, asociadas a la presencia de estratos poco resistentes localizados a poca profundidad bajo el talud.

Los estratos débiles que fomentan estos deslizamientos son, por lo común, de arcillas blandas o de arenas finas o limos no plásticos sueltos. La debilidad del estrato está ligada a elevadas presiones de poro en el agua contenida en las arcillas o a fenómenos de elevación de presión de agua.

Figura 2. 10 Deslizamiento translacional



Fuente: Cujar Chamorro. 2008.

2.7.3. Derrumbes y caídas

Estos deslizamientos consisten en desprendimientos locales de no muy grande volumen, aunque naturalmente existen desprendimientos de grandes masas fragmentadas que se deben clasificar como derrumbes.

En estos deslizamientos no puede hablarse de una superficie de deslizamiento, y el desprendimiento suele estar predeterminado por las discontinuidades y fisuras preexistentes.

2.7.4. Deslizamientos no directamente asociados a la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos

Se mencionará a los principales temas de estudio, las fallas por erosión, tan frecuentes y perjudiciales en los terraplenes y cortes en las vías terrestres. Se trata del resultado del ataque superficial de los agentes erosivos sobre los materiales que componen el talud (el viento y el agua). La falla se manifiesta en irregularidades, socavones y canalizaciones en el plano del talud, originalmente regular, pasado un tiempo si no se detienen estos efectos podrán progresar hasta la eventual destrucción del talud.

En segundo lugar, conviene mencionar las fallas por tubificación, comienza cuando hay arrastre de partículas de suelo en el interior de la masa por efecto de las fuerzas erosivas generadas por el flujo de agua. Una vez que las partículas empiecen a ser removidas van quedando en el suelo pequeños canales, por los que el agua circula a mayor velocidad, de manera que el fenómeno de tubificación tiende a crecer continuamente una vez que comienza. Un factor que contribuye mucho a la tubificación es la insuficiencia de compactación en el terraplén.

En tercer lugar, se debe hacer referencia a las fallas por agrietamiento pudiendo ser éstos tanto en el sentido transversal como en el longitudinal. Los primeros ocurrirán por asentamiento diferencial a lo largo del eje del camino y solo serán de consideración en el caso de terraplenes construidos sobre suelos blandos. El agrietamiento longitudinal ocurre sobre todo por movimientos diferenciales de los hombros del terraplén y su parte central.

2.8. TIPOS DE ESTABILIZACIÓN

Actualmente, se puede encontrar distintas medidas correctivas o tipos de estabilización de suelos; cada estabilización requiere un análisis y diseño teniendo en cuenta la topografía del área afectada, propiedades de los suelos y rocas, patrón de drenaje natural, modo de falla y un respectivo análisis de estabilidad además de la hidrología, vegetación, clima, entre otros. (UGALDE MADRIGAL , 2015, pág. 5)

2.8.1 Modificación de geometría

El cambio de la geometría de un determinado talud puede realizarse mediante soluciones tales como la disminución de la pendiente a un ángulo menor, la reducción de la altura (especialmente en suelos con comportamiento cohesivo) y la colocación de material en la base o pie del talud (construcción de una berma); en esta última solución es común usar material de las partes superiores del talud

La consecuencia directa de realizar un cambio favorable en la geometría de un talud es disminuir los esfuerzos que causan la inestabilidad y, en el caso de la implantación de una berma, el aumento de la fuerza resistente. Es importante destacar que la

construcción de una berma al pie de un talud debe tomar en cuenta la posibilidad de causar inestabilidad en los taludes que se encuentren debajo, además, se deben tomar las previsiones para drenar el agua que pueda almacenarse dentro de la berma, ya que es probable que pueda haber un aumento de la presión de los poros en los sectores inferiores de la superficie de falla, lo que acrecienta la inestabilidad.

2.8.1.1. La eliminación del terreno.

Consiste en remover material de tal forma que se logre la estabilidad modificando la geometría por lo general se logra disminuyendo la pendiente del talud o con la creación de terrazas. Para taludes de relleno con problemas de asentamiento o estabilidad se utiliza la sustitución, donde se remueve el terreno y se remplaza con material en condiciones mejores a las del terreno existente; no obstante, es un proceso largo dependiendo del área a manipular, ya que se debe realizar un proceso de compactación entre capa y capa de suelo.

2.8.1.2. El descabezamiento.

Radica en retirar material de la corona o cabeza del talud, ya que por lo general [...] es en la zona donde el peso del material contribuye más al deslizamiento y menos a la resistencia del mismo, dado que en la parte superior de la superficie de deslizamiento es donde esta tiene su máxima inclinación. Por ello, la eliminación de escasas cantidades de material produce aumentos importantes del factor de seguridad. (Ayala Carcedo, 2006). No se debe remover el material deslizado (que se encuentra en el pie del talud), ya que el peso del material colocado en el pie del talud.

2.8.1.3. Las bermas.

Son cortes en la cara del talud en forma de “escalera”. Dividiendo el talud en múltiples taludes de dimensiones y tamaño controlables, además se recomienda el uso de drenajes transversales para el control de las aguas “La presencia de bermas en taludes da origen a dos tipos de taludes básicos, el talud de banco que oscila entre 75° y 90° y talud global o de corta entre 10° y 50°”

2.9. PROTECCIÓN DE TALUDES

2.9.1. Definición de protección de taludes

En la mayoría de los proyectos de infraestructura vial es preciso efectuar desmontes importantes, teniendo en cuenta la orografía. Durante las excavaciones se aplican distintos métodos de arranque, según las características geo-mecánicas de los macizos más competentes, desde el arranque directo con excavadoras, tractores de oruga o incluso motoraílas en terrenos más blandos.

Desde hace varios años se viene aplicando diversos métodos de clasificación geomecánica para evaluar la inestabilidad real o potencial de los taludes y las técnicas de corrección necesaria en cada caso. Este es un campo en el que se ha progresado significativamente, llegándose a una mejor comprensión de los procesos de inestabilidad y a una valoración cuantitativa de los mismos.

En la apertura de vías de comunicación la mayoría de los taludes quedan expuestos durante mucho tiempo a los agentes atmosféricos y a otros fenómenos, induciéndose en ellos una degradación progresiva, que muy rara vez se contempla durante la etapa de diseño en la elaboración de los proyectos y que exige, en determinados momentos, tanto trabajos de mantenimiento, como de protección para evitar daños o riesgos innecesarios.

El proceso por el que se modifican las estructuras y la composición tanto de los taludes como de los macizos rocosos en general, debido a su exposición, se conoce como meteorización, y afecta a las propiedades físicas y químicas de los materiales de los que se componen. En nuestro país, debido a sus características climáticas y geográficas la erosión superficial de taludes desempeña un papel importante a la hora de hablar de alteraciones naturales del terreno. La erosión superficial es provocada principalmente por escorrentíos de agua y por la acción del viento. Los materiales arrastrados de los taludes por la erosión ocasionan diversos problemas a las vías de comunicación, como su obstrucción a causa de los deslizamientos.

2.9.2. Tipos de obras de protección

Tan pronto se comprueba que hay un riesgo de inestabilidad de un determinado talud, se debe buscar la mejor solución de protección y considerar aspectos de costo, naturaleza de las obras afectadas (tanto en cresta como en el pie del talud), tiempo estimado en que se puede presentar el problema, disponibilidad de materiales, etc.

Cada caso de problemas de estabilidad en taludes tiene una solución particular de protección de refuerzo, la cual está en función de: el tipo de terreno, el tipo de obra, las limitaciones de espacio, el costo de la obra, el tiempo de ejecución.

Entre los principales procedimientos para proteger y reforzar a los taludes contra la erosión superficial están:

- Hormigón lanzado.
- Mallas de acero de alta resistencia.
- Vegetación.
- Estructuras ancladas (Bulones)
- Geomantas para el control de erosión

2.9.2.2. Hormigón lanzado

➤ Definición

El hormigón lanzado es un mortero cuyo tamaño máximo de áridos no excederá de 8 mm, y que se proyecta a gran velocidad sobre una superficie, mediante el empleo de maquinaria especializada, utilizando los medios necesarios para alcanzar las alturas deseadas.

Partiendo de numerosas experiencias se ha llegado a comprobar que el hormigón lanzado es una de las mejores soluciones para estabilizar taludes que por su altura y o características geológicas, pueden llegar a fallar con el tiempo.

Se trata de una solución integral ya que permite controlar la erosión y al mismo tiempo evitar el deterioro del talud. Este tipo de hormigón tiene una alta resistencia

a la compresión y también al cortante, siendo este último parámetro muy importante para lograr la estabilidad final del talud.

Tabla 2. 5 Características hormigón lanzado.

Tratamiento	Función	Aplicaciones
Hormigón lanzado	Contención de tierras	Taludes rocosos y de material no cohesivo

Fuente: Desnivel obras. 2012

➤ Usos generales del hormigón lanzado

El hormigón lanzado ofrece ventajas sobre el hormigón convencional en muchos tipos de trabajos de construcción y reparación.

El hormigón lanzado es frecuentemente más económico que el hormigón convencional, debido a que necesita menos trabajo de cimbra y requiere solamente una pequeña planta portátil para mezclado y colocación en las áreas más inaccesibles.

Una propiedad importante del hormigón lanzado es su facilidad para formar una excelente adherencia con varios materiales. Tiene características impermeables aun en secciones delgadas, y se pueden usar aditivos para asegurar su impermeabilidad.

El hormigón lanzado puede ser usado en:

- a) Estructuras nuevas (especialmente secciones plegadas o curvas), Por ejemplo: techos, paredes, tanques pres forzados, recipientes, albercas, taludes, túneles y alcantarillas de aguas negras.
- b) Recubrimientos de mamposterías de ladrillo, concreto, piedra o acero para protección o presentación.
- c) Recubrimiento de taludes en carreteras.
- d) Recubrimiento de estructura de concreto, losas, muros de concreto y mampostería, bóvedas de ladrillo y mampostería.

- e) Reparación de estructuras de concreto dañadas, tales como puentes, revestimientos de tanques, presas, túneles, chimeneas y estructuras marítimas.
- f) Reparaciones generales de concreto descascarado en edificios antiguos de concreto reforzado.
- g) Reparaciones de estructuras de concreto y mamposterías dañadas por sismos o incendios.

➤ Propiedades

El hormigón lanzado aplicado correctamente es un material estructural versátil, que posee gran durabilidad y una excelente adherencia con el hormigón, mampostería, acero, madera y otros materiales. Estas propiedades favorables del hormigón lanzado dependen de una correcta planeación y supervisión, de la habilidad y atención continua del equipo de hormigón lanzado. Son necesarias técnicas de prueba especializadas y se recomienda que éstas se efectúen en la obra.

Generalmente se recomienda dosificar los materiales en peso. La curva de composición deberá tener una granulometría máxima de 8 mm. Como primera aproximación, la dosificación de cemento será 400 kg/m³. Para la vía húmeda, la relación A/C (agua/cemento) estará comprendida generalmente entre 0,40 y 0,50.

➤ Materiales

- a) **Cemento.** - El cemento portland a usarse en el hormigón lanzado debe cumplir los requisitos de calidad respectivos. Si el hormigón lanzado está expuesto a suelo o agua freática que contengan elevadas concentraciones de sulfatos disueltos, deberán usarse cementos resistentes a los sulfatos. Cuando las exigencias estructurales requieran alta resistencia rápida, se preferirá el empleo de un cemento portland de endurecimiento rápido. Se pueden utilizar para elaborar los hormigones lanzados todos los cementos portland existentes en el país que cumplan con las exigencias de las normas.
- b) **Agregados.** - Los agregados deberán ser uniformes y sin presencia de impurezas. La arena para el hormigón lanzado deberá satisfacer los requisitos

de la norma para los agregados finos. Generalmente, deberá especificarse un graduado de 5 mm a fino, pero puede usarse también arena más gruesa.

Puede usarse arena que no cumpla con la granulometría anterior, si las pruebas preliminares establecen que proporciona buenos resultados. Así mismo, la arena empleada para acabados, recubrimientos rápidos y ciertos usos especiales, puede ser más fina que la de esa granulometría. Sin embargo, debe tenerse en cuenta, que las arenas más finas generalmente originan una contracción mayor por secado, las arenas más gruesas dan más rebote.

Para secciones de varios centímetros de espesor, puede ser ventajosa la incorporación de agregados más gruesos en la mezcla, siempre que se disponga de un equipo adecuado para lanzarlo.

Cuando se usen los agregados más gruesos, deberán satisfacer los requisitos especificados en la norma. Deberán rechazarse el sobre-tamaño o los de forma alargada cribándolos, ya que es posible que ocasionen taponamientos de la manguera.

- c) **Agua.** - El agua para el mezclado y curado deberá ser limpia y libre de sustancias que puedan ser dañinas al hormigón. Se considera como satisfactorias las aguas clasificadas como potables, con PH entre 5,8 a 8,0 y que atiendan las exigencias de la norma.
- d) Cuando la apariencia sea un factor importante, el agua para curar también deberá estar libre de elementos que puedan ocasionar manchas.
- e) **Aditivos.** - Puede ser deseable incluir aditivos en el hormigón lanzado para usos y condiciones de colocación especiales. Empleando con cuidado los aditivos que pueden producir resultados muy satisfactorios, pero algunos aditivos que han sido satisfactorios en el hormigón normal, pueden no ser útiles en el hormigón lanzado.

Los aditivos solubles deberán disolverse en agua antes de agregarse a la mezcla. Los aditivos, generalmente, se mezclan en un tambor o tanque con agua y la solución se bombea a la boquilla. Los polvos insolubles se mezclan con el cemento antes que éste se mezcle con el agregado.

Tabla 2. 6 Ventajas y desventajas del hormigón lanzado

Ventajas	Desventajas
Brinda estabilización inmediata del talud.	Alto costo de ejecución (equipos y personal especializado).
Protege contra la erosión superficial y la caída de rocas.	No proporciona resistencia estructural interna al talud si se usa solo.
Se puede aplicar en superficies irregulares o verticales .	Puede crear una superficie impermeable, aumentando presión de agua si no hay drenaje.
Compatible con otros refuerzos (mallas, bulones).	Puede sufrir fisuración si no se controla la retracción o curado.

Fuente: Suárez Díaz. 1998.

2.9.2.2. Protección con mallas de acero

➤ Definición

La protección con mallas de acero de alta resistencia es un tratamiento superficial resistente, el procedimiento consiste en cubrir el talud con una malla, debidamente fijada al terreno. La malla no permite que los pequeños derrumbes o caídos, invadan la superficie de rodamiento de la vía terrestre. Los derrumbes o caídos son conducidos por detrás de la malla para que no puedan llegar a caer al trazado de la vía.

Por su naturaleza, permite un rápido drenaje del agua que satura el terreno y ayuda a la reforestación más fácilmente. Es un hecho que el aspecto de los taludes debe ser lo más

natural e integrado posible con el medio circundante. De esta forma las mallas de acero de alta resistencia establecen un efectivo y económico sistema de protección del suelo en taludes contra la erosión.

Es necesario proteger los taludes de carretera con malla metálica de triple torsión porque se tratan de mallas de alta resistencia y ofrecen seguridad al usuario para evitar el desprendimiento de material suelto en el talud y de una gran cantidad de derrumbes, que además son un peligro continuo para los vehículos y evitando así que se obstruya las vías de comunicación ya que es uno de los problemas más graves que presentan las carreteras.

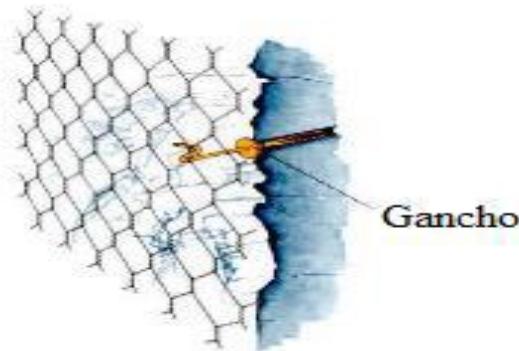
➤ **Usos generales de mallas de acero de alta resistencia**

Son varias las aplicaciones con mallas de acero de alta resistencia, generalmente, es empleada para la fabricación de gaviones, colchones para revestimiento y entre otros para la estabilización de taludes de cortes y terraplenes de carreteras.

Las mallas de acero de alta resistencia por su facilidad de colocación, generalmente, el uso que se le da es para estabilizar taludes:

- a) Cuando existen rocas sueltas con tamaños menores de 0,6 – 1 m hay la posibilidad de reforzar la superficie del talud usando malla hexagonal anclada, sirve como refuerzo de la superficie.
- b) En el caso de rocas compactas, para poder prevenir que estas tengan rupturas, se puede usar la malla de triple torsión simplemente enganchada a la superficie (**figura 2.11**).
- c) En los casos de roca fracturada o en presencia de tierra y piedras sueltas, la red puede ser sujetada a través de barras de acero clavadas en el talud. En estas situaciones el revestimiento con red en malla hexagonal de triple torsión permite el rápido crecimiento de la vegetación. A través de las mallas pueden, inclusive crecer árboles, de tal manera que en poco tiempo el talud revestido tendrá la apariencia de una ladera natural.

Figura 2. 11 Estabilización usando ganchos en la malla.



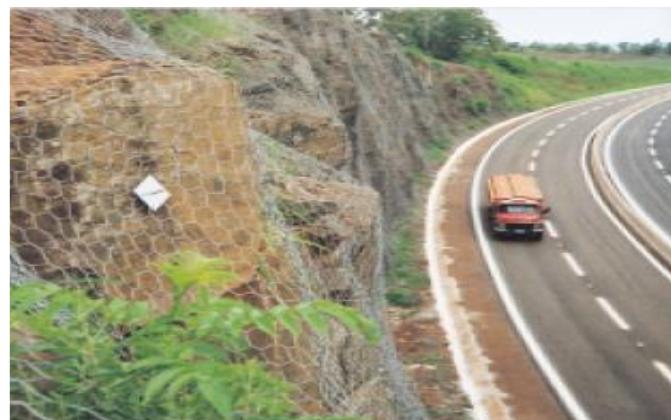
Fuente: Folleto Maccaferri

➤ **Características y ventajas**

En las intervenciones para la sustentación de rocas es necesario el máximo nivel de seguridad, siendo que cualquier desprendimiento puede afectar seriamente bienes y personas. En estos casos se exigen materiales de alta resistencia y que al mismo tiempo sean flexibles, para que puedan acompañar y adherir a la superficie del talud. Estas son las características de las redes de alta resistencia que por ser de acero, tienen alta resistencia a la tracción y al punzonamiento.

Su configuración geométrica (hexagonal de triple torsión) impide, en caso de ruptura, que los alambres se deshilen y, por ser tejida (no soldada) acompaña fácilmente la conformación de la superficie del talud (fotografía 2.3).

Figura 2. 12 Protección con malla.



Fuente: Folleto Maccaferri

2.9.2.3. Vegetación (HIDROSIEMBRA)

➤ Definición de hidrosiembra

La hidrosiembra es la aplicación mediante presión de una mezcla que contiene:

- Semillas (especies nativas o adaptadas)
- Fertilizantes
- Fijadores (pegantes)
- Mulch (fibras vegetales, celulosa, paja molida)
- Agua

Tabla 2. 7 Especies vegetales recomendadas en Bolivia

SEGÚN EL ALTIPLANO O VALLE	
REGION	ESPECIES RECOMENDADAS
Altiplano	Festuca orthophylla (ichu), Trifolium repens
Valles	Lolium perenne, Trifolium pratense, Avena sativa
Tropico	Brachiaria brizantha, Panicum maximum

Fuente: UMSA – "Guía Técnica de Bioingeniería para Control de Erosión", 2021

➤ Efecto de la vegetación sobre el talud

El tipo de vegetación tanto en el talud como en el área arriba del talud es un parámetro importante para su estabilidad. La vegetación cumple dos funciones principales: en primer lugar, tiende a determinar el contenido de agua en la superficie y además da consistencia por el entramado mecánico de sus raíces.

Como controlador de infiltraciones tiene efecto directo sobre el régimen de aguas subterráneas y actúa posteriormente como secador del suelo al tomar el agua que requiere para vivir.

➤ Factores más importantes

- Intercepta la lluvia.
- Aumenta la capacidad de infiltración.
- Extrae la humedad del suelo.
- Grietas por desecación.

- Raíces refuerzan el suelo, aumentando resistencia al cortante.
- Ancla el suelo superficial a mantos más profundos.
- Aumentan el peso sobre el talud.
- Transmiten al suelo fuerza del viento.
- Retienen las partículas del suelo, disminuyendo susceptibilidad a la erosión.
- Disminuyen las tensiones capilares de la humedad superficial.
- Se elimina el factor de refuerzo de las raíces.
- Se facilita la infiltración masiva de agua.

➤ Acción de refuerzo de las raíces

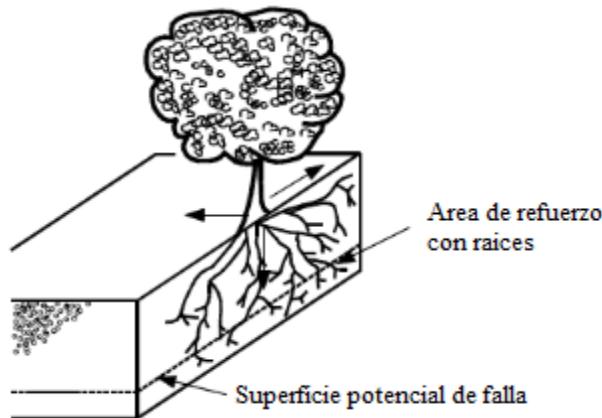
Las raíces refuerzan la estructura del suelo y pueden actuar como anclajes en las discontinuidades. Sidle (1985) explica el efecto de las raíces sobre la resistencia del suelo en tres formas:

Unir materiales de los suelos inestables a mantos más estables. Este efecto es más pronunciado donde la superficie crítica de falla se encuentra en la zona de raíces.

Formar una red densa entretejida en los primeros 30 a 50 centímetros de suelo, y esta red forma una membrana lateral que tiende a reforzar la masa de suelo más superficial y sostenerla en el sitio.

Las raíces individuales actúan como anclajes que estabilizan los arcos de suelo que se extienden a través del talud. Las raíces actúan como pilas de refuerzo.

Figura 2. 13 Refuerzo de superficie de falla por las raíces de los árboles.



Fuente: Suárez Díaz. 1998.

Una clasificación del refuerzo de taludes con las raíces de los árboles fue propuesta por Tsukamoto and Kusakabe (1984).

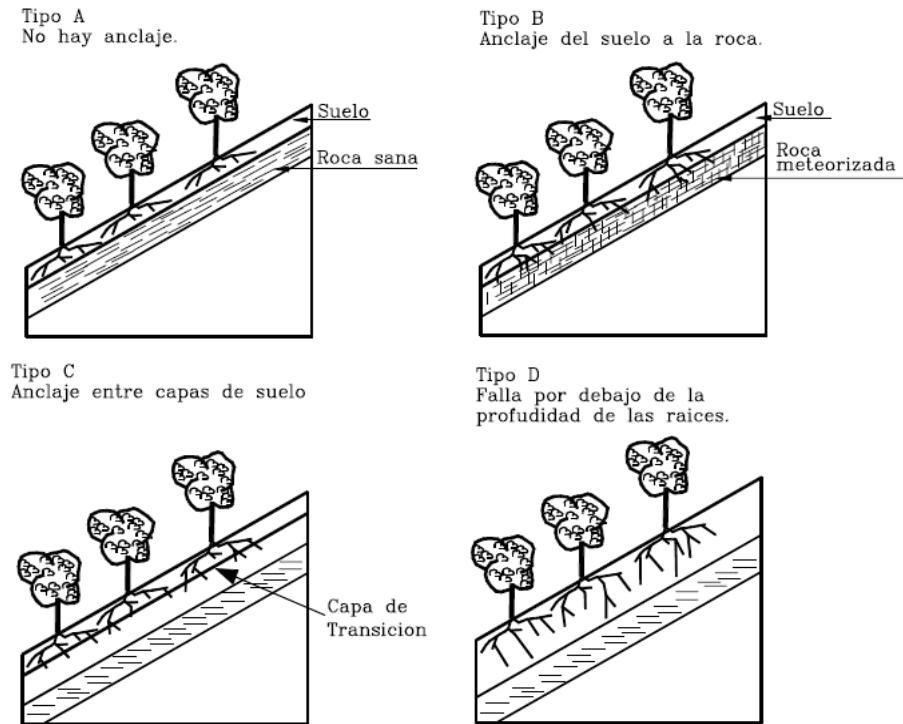
Tipo A: Taludes que poseen una capa muy delgada de suelo sobre roca masiva y sin defectos que permitan puntos de anclaje para las raíces y una superficie de falla potencial entre el suelo y la roca.

Tipo B: Una capa delgada de suelo sobre una roca con fracturas o defectos que permiten la entrada y anclaje de las raíces.

Tipo C: Varias capas de suelo y las raíces penetran normalmente las interfaces reforzando los contactos entre las diversas capas.

Tipo D: Taludes con una capa gruesa de suelo y raíces a profundidades superiores a las de las superficies potenciales de falla.

Figura 2. 14 Tipos de anclaje de la superficie de falla por acción de las raíces.



Fuente: Suárez Díaz. 1998.

La profundidad de las raíces es un factor muy importante. La profundidad de refuerzo de las raíces de los pastos es de solo 20 centímetros comúnmente, pero algunas especies tienen profundidades que permiten el anclaje a mantos de roca relativamente profundos.

➤ **Limitaciones de la protección vegetal**

El establecimiento exitoso de vegetación en un talud está determinado por muchos factores tales como: época de siembra, pendiente del talud, localización, y composición de los materiales del talud. Las épocas ideales de plantación son las semanas anteriores a la temporada de lluvias, sin embargo, se puede realizar el plantado en épocas secas disponiendo de un programa adecuado de riego.

La pendiente de los taludes tiene un efecto importante en el esfuerzo requerido para establecer la cobertura vegetal. Para taludes de pendiente alta se requiere colocar elementos de anclaje para los pastos y bermas para los árboles. En taludes de pendiente fuerte se aconseja no sembrar árboles, sino arbustos para disminuir las fuerzas del viento sobre ellos.

Si los materiales son muy duros se puede requerir la excavación de cajas profundas para la siembra de cada arbusto y deben utilizarse cantidades importantes de suelo orgánico o fertilizantes.

Con referencia a la localización del talud, los taludes que reciben la exposición directa del sol de la tarde presentan mayores dificultades para la vegetación, que los que reciben el sol de la mañana o poseen condiciones de sombra relativa.

Deben analizarse, además, los factores relacionados con la presencia del hombre como pisoteo, quemas, basuras, humo de los vehículos, etc.

➤ **Selección de especies vegetales**

Como no existen especies universales se debe acudir a los expertos forestales para escoger la especie de pasto, hierba, arbusto o árbol que se debe utilizar para cada

caso específico, teniendo muy en cuenta la experiencia local y las diferencias de tolerancias y hábitos de las diferentes especies.

El tipo de vegetación que cubre la superficie del talud tiene efecto sobre la estabilidad, por ejemplo, Campbell (1975) reportó que los deslizamientos de suelo eran 3 a 5 veces más frecuentes en aquellos taludes cubiertos por pastos que en aquellos cubiertos por maleza y arbustos. Los deslizamientos en taludes cubiertos por pasto eran más cortos y más anchos y ocurren a ángulos de inclinación menores que aquellos cubiertos por maleza.

La especie vegetal debe seleccionarse que sea compatible con las condiciones del suelo y el sitio, incluyendo disponibilidad de agua, nutrientes, PH, clima, regulaciones gubernamentales, etc.

Ciertos tipos de planta son intrínsecamente mejores que otras para objetivos de estabilización específicos. La vegetación maderable posee raíces más profundas y más resistentes que las plantas herbáceas y pastos, y provee un mejor refuerzo y efecto de arco.

Tabla 2. 8 Ventajas y desventajas de los diversos tipos de planta

Tipo	Ventajas	Desventajas
Pastos	Versátiles y baratos; variedades para escoger con diferentes tolerancias; fácil de establecer; buena densidad de cobertura.	Raíces poco profundas y se requiere mantenimiento permanente.
Juncos	Crecen rápidamente y son fáciles de establecer en las riberas de ríos.	Difíciles de obtener y el sistema de plantación no es sencillo.
Hierbas	Raíz relativamente profunda.	Algunas veces son difíciles de establecer y no se consiguen raíces.
Arbustos	Variedades para escoger. Existen especies que se reproducen por estaca. Raíz profunda, buena cobertura, bajo mantenimiento.	Algunas veces son difíciles de establecer.
Árboles	Raíces profundas, no requieren mantenimiento.	Es demorado su establecimiento y generalmente son más costosos.

Fuente: Suárez Díaz. 1998.

Tabla 2. 9 Ventajas y desventajas de la hidrosiembra

Ventajas	Desventajas
Ecológica y natural , mejora el paisaje.	Depende del clima (lluvia y temperatura) para germinar.
Ayuda a controlar la erosión superficial .	No brinda soporte estructural ni estabiliza fallas internas.
Bajo costo de instalación.	Tiempo prolongado para que la vegetación se establezca.
Mejora la infiltración y estabilidad del suelo con raíces.	Puede requerir riego y mantenimiento en etapas iniciales.

Fuente: Suárez Díaz. 1998

2.9.2.4. Estructuras ancladas (BULONES)

- **Definición de bulón.** -Los bulones son barras de acero instaladas en perforaciones en el talud, que se fijan con lechada de cemento o resinas. Existen dos tipos principales:

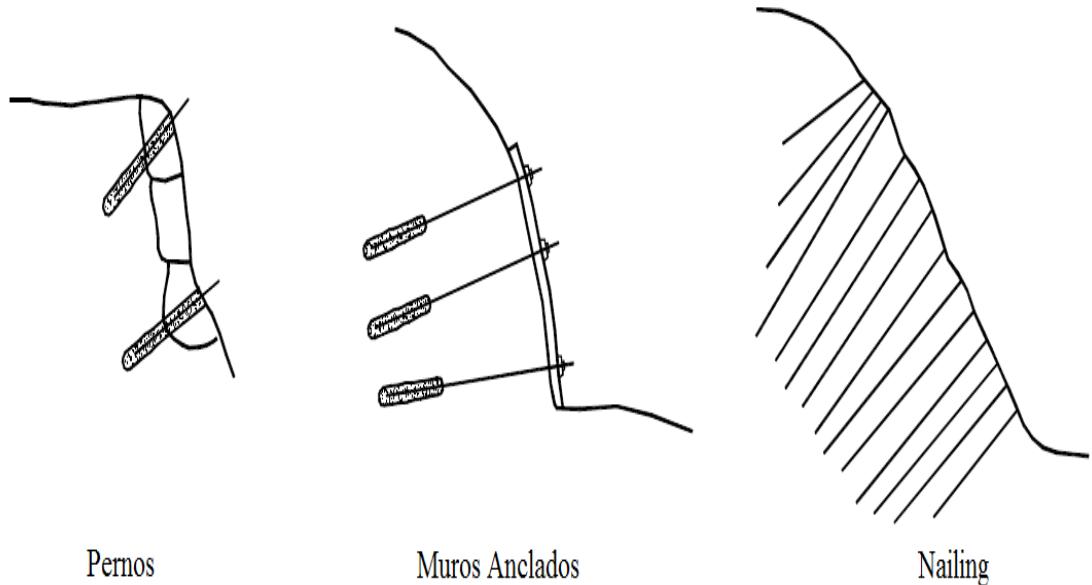
Tabla 2. 10 Características de los principales tipos de bulones

Tipo	Características	Aplicación
Pasivos	No se tensiona; trabaja por fricción	Suelos cohesivos, roca blanda
Activos	Se tensiona tras instalarse	Rocas duras, condiciones críticas

Fuente: Osebe Geotécnica – Estabilización de taludes con bulones

En las estructuras ancladas se colocan varillas o tendones generalmente de acero en perforaciones realizadas con taladro, posteriormente se inyectan con un cemento. Los anclajes pueden ser pretensados para colocar una carga sobre un bulbo cementado o pueden ser cementados simplemente sin colocarles carga activa.

Figura 2. 15 Esquema de estructuras ancladas.



Fuente: Suárez Díaz. 1998.

Tabla 2. 11 Ventajas y desventajas de los Bulones.

Ventajas	Desventajas
Refuerzan la masa interna del talud (tierra o roca).	Requiere perforación y equipos especializados .
Aumentan significativamente el factor de seguridad (FS) .	Necesita de un diseño geotécnico adecuado.
Pueden ser combinados con mallas y hormigón lanzado.	Riesgo de corrosión si no están bien protegidos.
Aptos para taludes verticales o muy inestables .	Difíciles de instalar en suelos blandos o saturados.

Fuente: Suárez Díaz. 1998.

2.9.2.5. Geomantas y para el control de erosión

Se entiende por erosión el proceso por el cual ocurre el desprendimiento, el transporte o la deposición de partículas de suelo (o sedimentos), que terminan causando grandes impactos ambientales, alcanzados los cursos de agua y taludes, provocando el erosionamiento.

Mientras tanto, la adopción de medidas efectivas de control preventivo y correctivo de estas erosiones desordenadas depende del entendimiento correcto de los procesos relacionados a la dinámica del funcionamiento hídrico sobre el terreno. Esos procesos erosivos son causados de forma natural, sea por la acción del agua de las lluvias, la corriente o incluso el efecto de las olas.

- **Amenazas graduales.** - No solo se debe considerar que un suelo inestable se erosiona solo por las tensiones de arrastre que se generan en canales y cursos de agua, sino que también se debe considerar la humedad ocasional, viento, lluvia e incluso la gravedad que ayudan en este proceso erosivo, y en los casos donde hay una pérdida significativa de la vegetación, las condiciones serias pueden intensificarse, como la pérdida de hábitat natural de la fauna y la flora.
- **Geosintéticos utilizados para prevención y control de erosiones superficiales.** Los geosintéticos utilizados para prevención y control de erosiones superficiales han experimentado un avance significativo desde la década de 1990, buscando proporcionar una protección adecuada de los suelos, aunque las condiciones locales (declividad, características geotécnicas, índice pluviométrico, uso y ocupación del terreno, etc.) se muestren adversas y potencialmente desencadenadoras de procesos erosivos. Básicamente, los geosintéticos deben actuar reteniendo los finos provenientes de los suelos subyacentes o materiales erosionables transportados, además de tener la función de resistir a las velocidades de esparcimiento y a los esfuerzos tangenciales provocados por el flujo de las aguas, y absorber la energía del impacto de las gotas de lluvia. Actualmente, la gama de geosintéticos para prevención y control de erosión superficiales es muy vasta y, a cada día, nuevas

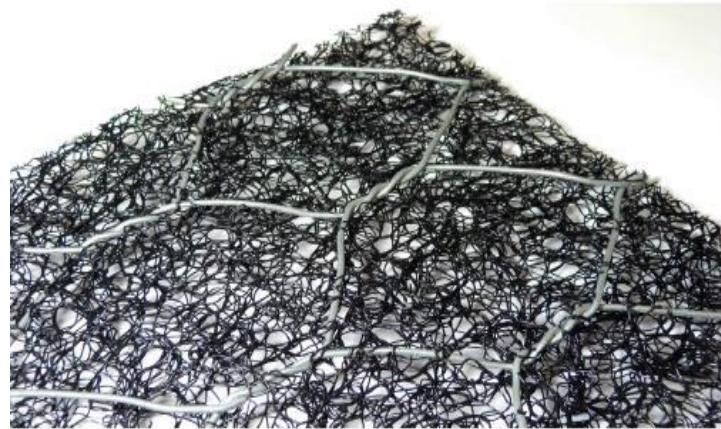
soluciones son desarrolladas. Cabe esclarecer que cualquier tipo de soluciones, con la finalidad de prevención y control de erosión constituida por materiales sintéticos, deben ser instaladas sobre taludes geotécnicamente estables.

Según Theisen (1990), los geosintéticos para prevención y control de erosión son clasificados como temporarios (TERM's, temporary erosion and vegetation materials), elementos parciales o totalmente degradables, con características de prevención y control de la erosión del sitio protegido hasta que la cobertura vegetal esté establecida. Además, deben promover la germinación de las semillas para el rápido desarrollo de la vegetación. Teóricamente, los TERM's son subdivididos en dos grupos: los ECMN's (erosion control meshes and nets), constituidos por geogretas o georedes orientadas biaxialmente, y los ECB's (erosion control blankets), constituidos por mantas de fibras vegetales biodegradables.

Un segundo grupo de geosintéticos con la misma función es nombrado permanente PERM's, (permanent erosion and revegetation materials), elementos poliméricos no degradables, con buena resistencia a la tracción y que actúan no solo como refuerzo de las raíces de la vegetación, pero auxilian su crecimiento. Los PERM's, a su vez, están subdivididos en dos categorías distintas: geosintéticos asociados a la vegetación, los TRM's (turf reinforcement mats), que son mantas de matriz tridimensional a base de fibras poliméricas utilizadas para reforzar la vegetación ya desarrollada contra la acción de la velocidad del agua y contra los esfuerzos de tracción arriba de lo máximo soportado por ella, además de ayudarla a crecer. A ese contexto se aplican las geomantas MacMat® (Figura 2.24), geomantas flexibles tridimensionales que presentan más de 90% de vacíos, fabricadas a partir de filamentos gruesos de polipropileno fundidos en los puntos de contacto. Conforme el concepto anterior están las ECRM's (erosion control and revegetation mats), mantas con las mismas características del material arriba citado, pero con adición de suelo para acelerar el desarrollo de la vegetación. La segunda categoría de los PERM's son los materiales biológicamente activos

asociados a elementos inertes como madera, gabiones, concreto, rocas o geocélulas.

Figura 2. 16 Geomantas MacMat®



Fuente: Folleto protección contra erosión Maccaferri

CAPÍTULO III

CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA Y GEOMÉTRICA DE LOS TALUDES

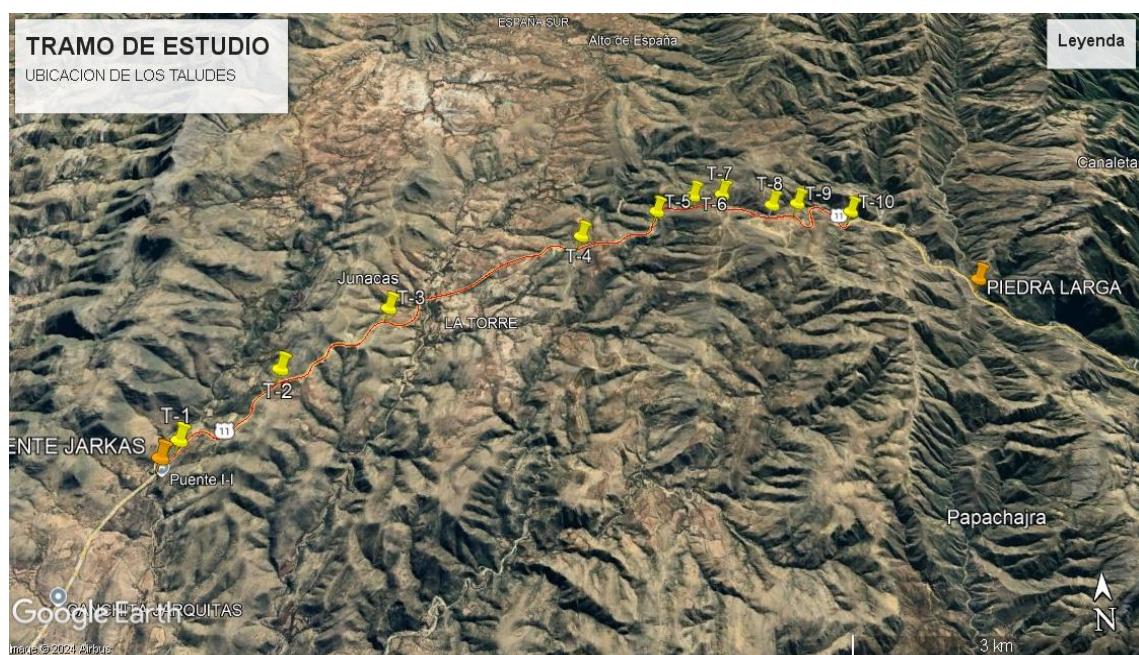
CAPÍTULO III

CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA Y GEOMÉTRICA DE LOS TALUDES

3.1. UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

El tramo en estudio, se realizó en la provincia O'Connor del departamento de Tarija – Bolivia. Dicho estudio inicia del Puente Jarcas en la progresiva 30+199 hasta la progresiva 42+368 del lugar llamado Piedra Larga.

Figura 3. 1 Ubicación geográfica de los taludes de estudio



Fuente: Google Earth Pro

3.2. CARACTERÍSTICAS DEL TRAMO EN ESTUDIO

El proyecto de estudio del tramo Puente Jarcas-Piedra Larga, se encuentra ubicado en el departamento de Tarija, y une a dos provincias Cercado y O'Connor, de los municipios de Tarija y Entre Ríos respectivamente.

El municipio de Tarija se encuentra ubicado en la parte central del departamento de Tarija, el cual está ubicado al sur de Bolivia, entre los paralelos $21^{\circ} 14' 30''$ y $21^{\circ} 46'$

54'' de latitud sur y entre los meridianos 64° 23' 54'' y los 64° 59' 11'' de longitud oeste. El municipio de Entre Ríos, se encuentra ubicado en la parte central del departamento de Tarija, entre las coordenadas 20° 51' 57'' y 21° 56' 51'' de latitud sud y 63° 40' 23'' y 64° 25' 6'' de latitud oeste. El área de influencia directa del proyecto está conformada por las comunidades de Junacas sud – Junacas Norte - Piedra Larga, España Sud, España Norte, Polla, Morro Gacho, Capilla Candelaria y el Condor.

3.3. CARACTERÍSTICAS DE LOS TALUDES EN ESTUDIO

En el tramo de construcción de carretera del Puente Jarcas - Piedra Larga trajo consigo importantes movimientos de tierra, lo que genera taludes de diferentes inclinaciones para mantener la estabilidad de los mismos. Los taludes en el tramo de estudio presentan deslizamientos importantes, con acumulación constante de material en la base del talud, calzada y cunetas.

Por lo que es necesario tomar medidas de refuerzos para contrarrestar estos efectos de manera que se puedan minimizar o hasta eliminar el problema, dando así mayor seguridad al tránsito de vehículos y disminuir el costo de mantenimiento de la carretera, asegurando así la vida útil de la misma.

Para realizar el presente estudio, es importante de inicio establecer las características de los materiales de los que están constituidos los taludes elegidos para esta investigación, elección que se realizó con el criterio de evaluar taludes de diferentes características, cuyos materiales constituyentes sean diferentes y que hipotéticamente puedan tener diferentes riesgos en cuanto a las amenazas de deslizamientos o desprendimientos de material.

De esta manera se seleccionó los 10 taludes de estudio con sus respectivas características que se menciona a continuación. (**ver anexo 1**)

3.3.1. Talud N° 1

Este talud se encuentra al inicio del tramo de estudio, continuación del Puente Jarcas en la progresiva 30+200 hasta 30+394.

- **Forma geométrica.** - Presenta un ángulo de inclinación de 1:0,56 (60,75 grados), una altura de 13,72 metros.

- **Material y condiciones geológicas.** – Se caracteriza por ser un suelo limo arcilloso en la parte de la base y en la parte del medio y corona presenta material granular.

3.3.2. Talud Nº 2

Este talud se encuentra próximo al lugar llamado Morrogacho en la progresiva 31+854 hasta 32+200.

- **Forma geométrica.** - Presenta un ángulo de inclinación de 1:0,25 (75,96 grados), una altura de 9,93 metros.
- **Material y condiciones geológicas.** – Se caracteriza por ser un suelo con presencia de suelo arcilloso parte de la base y gran parte de suelo granular.

3.3.3. Talud Nº 3

Este talud se encuentra por el lugar llegando a Junacas en la progresiva 33+782 hasta 33+998.

- **Forma geométrica.** - Presenta un ángulo de inclinación de 1:0,2 (78,69 grados), una altura de 15,2 metros.
- **Material y condiciones geológicas.** – Se caracteriza por ser un suelo con presencia de suelo limo arcilloso.

3.3.4. Talud Nº 4

Este talud se encuentra por el lugar de Junacas en la progresiva 37+000 hasta 37+206.

- **Forma geométrica.** - Presenta un ángulo de inclinación de 1:0,19 (79,24 grados), una altura de 13,33 metros.
- **Material y condiciones geológicas.** – Se caracteriza por ser un suelo con presencia de suelo granular en gran parte.

3.3.5. Talud Nº 5

Este talud se encuentra por el lugar de Junacas pasando el puesto de control de La Abra del Condor en la progresiva 38+332 hasta 38+446.

- **Forma geométrica.** - Presenta un ángulo de inclinación de 1:0,82 (50,65 grados), una altura de 8,05 metros.

- **Material y condiciones geológicas.** – Se caracteriza por ser un suelo con presencia de suelo granular arenoso en gran parte.

3.3.6. Talud Nº 6

Este talud se encuentra por el lugar de Junacas en la progresiva 39+040 hasta 39+275.

- **Forma geométrica.** - Presenta un ángulo de inclinación de 1:0,32 (72,26 grados), una altura de 16,51 metros.
- **Material y condiciones geológicas.** – Se caracteriza por ser un suelo con presencia de suelo granular.

3.3.7. Talud Nº 7

Este talud se encuentra por el lugar de La Abra del Condor en la progresiva 39+309 hasta 39+889.

- **Forma geométrica.** - Presenta un ángulo de inclinación de 1:0,26 (75,43 grados), una altura de 31,23 metros.
- **Material y condiciones geológicas.** – Se caracteriza por ser un suelo con presencia de suelo arcilloso y parte de suelo granular en el medio y corona

3.3.8. Talud Nº 8

Este talud se encuentra bajando el lugar de La Abra del Condor en la progresiva 40+316 hasta 40+416.

- **Forma geométrica.** - Presenta un ángulo de inclinación de 1:0,39 (68,69 grados), una altura de 7,53 metros.
- **Material y condiciones geológicas.** – Se caracteriza por ser un suelo con presencia de suelo granular en la base y arcilloso en el medio y corona

3.3.9. Talud Nº 9

Este talud se encuentra bajando el lugar de La Abra del Condor próximo al lugar llamado Piedra Larga en la progresiva 40+637 hasta 40+857.

- **Forma geométrica.** - Presenta un ángulo de inclinación de 1:0,25 (75,96 grados), una altura de 14,77 metros.
- **Material y condiciones geológicas.** – Se caracteriza por ser un suelo con presencia de suelo arcilloso y granular en la base.

3.3.10. Talud Nº 10

Este talud se encuentra en el lugar llamado Piedra Larga en la progresiva 42+239 hasta 42+368.

- **Forma geométrica.** - Presenta un ángulo de inclinación de 1:0,95 (46,47 grados), una altura de 54,99 metros.
- **Material y condiciones geológicas.** – Se caracteriza por ser un suelo con presencia de suelo granular en la base y arcilla en la parte superior.

Con el fin de que la investigación permita lograr los objetivos previstos se eligió taludes cuyos materiales constituyentes sean diferentes en su constitución, estratificación y comportamiento en la superficie del talud, mismos que presentan materiales granulares y finos que van desde un suelo A-1-a hasta un A-7 (según clasificación AASHTO) los taludes presentan suelos arenosos en su mayoría, clasificación que será mostrada más adelante.

3.4. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

Una vez definida la ubicación de los taludes inestables en el tramo “Puente Jarcas – Piedra Larga” se procedió al estudio de suelos que está dividido en dos etapas:

- Trabajo de campo.
- Trabajo de laboratorio.

A continuación, se describe el trabajo que se realizó en campo, laboratorio y gabinete.

3.4.1. Trabajo de campo

Esta fase incluyó el reconocimiento de los taludes con mayor inestabilidad aparente, con el objetivo de constatar su estado mediante observaciones directas, mediciones topográficas, y la recolección de muestras para ensayos de laboratorio. Estas actividades permitieron identificar el tipo de inestabilidad presente y los factores que la generan, con el fin de proponer posteriormente soluciones de refuerzo.

Para el desarrollo del proyecto de grado, enfocado en la investigación y análisis de alternativas técnicas para la estabilización de taludes, se realizó las visitas al tramo Puente Jarcas – Piedra Larga. Donde tuvo como propósito evaluar in situ el estado de los taludes más inestables, mediante inspecciones visuales, mediciones, y toma de

muestras representativas. Con esta información se pudo caracterizar la inestabilidad y sus causas, como base para plantear soluciones técnicas viables.

A continuación, se detalla el trabajo realizado en campo y laboratorio.

3.4.1.1. Levantamiento topográfico de ubicación de taludes y sus elementos

El levantamiento topográfico se realizó en 10 taludes de mayor riesgo de inestabilidad relevados anteriormente de acuerdo a la progresiva real de la vía y sus coordenadas, luego se procedió a determinar los parámetros básicos de la geometría, como la altura vertical (h), la longitud horizontal (L) y la pendiente del plano del talud.

Para el levantamiento se necesitó el apoyo de un equipo topográfico estación total marca Sokkia, un prisma, gps, etc. (ver anexo 2)

Tabla 3. 1 Levamiento topográfico

Talud Nº	Progresiva Km		Longitud de Proyección m		Pendiente	Coordenadas UTM		Área de corte m ²
	Inicio	Fin	Long.	Altura	°	Este	Norte	
1	30+199	30+394	195	10,904	60,75	345129,8	7626768,9	1929,74
2	31+845	32+200	354,9	10,322	75,96	346174,7	7627632,4	3181,72
3	33+782	33+998	216	10,056	78,69	347522,9	7628727,6	2146,64
4	37+000	37+206	206	6,92	79,24	350152,4	7629896,6	2814,48
5	38+332	38+446	114	10,609	50,65	351339,5	7630201,3	1246,38
6	39+040	39+275	234,9	12,749	72,26	351773,4	7630479,3	3728,53
7	39+309	39+889	579,6	11,662	75,43	352047,9	7630530,4	9462,21
8	40+316	40+416	99,9	7,332	68,69	352983,7	7630265,9	590,85
9	40+637	40+857	219,6	17,531	75,96	353317,5	7630340,8	3630,73
10	42+239	42+368	128,5	44,905	46,47	354153,5	7630166,8	7880,12

Fuente: Elaboración propia.

3.4.1.2. Recolección de muestras

Ya conociendo la topografía, para la caracterización de materiales en la fase de trabajo de campo, se procedió a realizar la recolección de las muestras representativas del material, se extrajo muestras de la base, medio y corona de cada uno de los diez taludes objeto de estudio. (ver anexo 3)

La toma de muestras se hizo de forma manual de la siguiente manera.

➤ **Materiales y herramientas:**

Se recomienda que los materiales y herramientas utilizadas en el muestreo se encuentren limpios y libres de contaminantes que afecten la muestra tomada.

1. Primero se localiza el lugar del cual se extraerá la muestra que se necesite, una vez, encontrado se procede con la limpieza para facilitar la excavación y la extracción de la muestra.
2. Se procede a iniciar la extracción de muestra donde se usará una pala, a medida que se avance se usará el pico y conforme se presente el suelo.
3. Donde se utilizará bolsas negras de nailon limpias o mejor las bolsas quintaleras de azúcar de nailon para la extracción.
4. Marcador de tinta de alcohol o masquin para identificar las muestras de suelo.

➤ **Instrucciones del muestro**

1. Extraer las muestras necesarias de la base, medio y corona del talud.
2. Con la picota se realizará una excavación de aproximadamente de 10 a 20 cm de profundidad para extraer la muestra.
3. Se recogerá la muestra con la pala sin contaminar con otro tipo de material, y se las depositaran en las bolsas.
4. Con cinta o masquin se identifican en la bolsa con la muestra extraída de cada parte del talud.

3.4.2. Trabajo de laboratorio

Para la caracterización de materiales de los diez taludes de estudio, las muestras obtenidas fueron analizadas en el laboratorio de suelos de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho (U.A.J.M.S).

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

➤ **Los ensayos realizados en laboratorio son los siguientes:**

- Distribución granulométrica de los materiales constitutivos del suelo, mediante la vía del tamizado según ASTM D 422-63 (método del lavado).
- Establecimiento de los límites de consistencia o los límites de Atterberg:
 - Límite líquido según ASTM D 423-66.
 - Límite plástico según ASTM D 424-59.
 - Índice de plasticidad.
- Clasificación de los suelos, adoptando el sistema internacional AASHTO y el Sistema de Clasificación Unificado SUCS.
- Determinación del peso específico relativo ASTM D 854-58.
- Determinación del ángulo de fricción y de la cohesión mediante el ensayo de corte directo según ASTM D 3080-72.

3.4.2.1. Granulometría

Se llama granulometría o análisis granulométrico a la determinación de la distribución de las partículas de un suelo en cuanto a su tamaño; se hace por proceso de tamizado (tamices) en suelos de grano grueso, y por un proceso de sedimentación en agua o por el método del lavado. (ver anexo 3)

➤ **Resultado de granulometría de los 10 taludes**

De la tabla 3.2 a la tabla 3.11 se muestra los resultados obtenidos a partir del ensayo de granulometría para cada talud

Tabla 3. 2 Granulometría Talud 1

Talud 1	Base	Cuerpo	Corona
Tamaño (mm)	% Que pasa del Total	% Que pasa del Total	% Que pasa del Total
75	100	100	100
50	100	100	100
37,50	100	100	100
25,00	100	97,82	98,14
19,00	100	91,2	96,9
12,50	97,7	90,64	91,78
9,50	97,22	89,66	91,18
4,75	94,86	88,02	86,84
2,00	91,88	85,44	81,18
0,425	86,32	71,88	71,78
0,075	74,18	49,54	58,4

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. 3 Granulometría Talud 2

Talud 2	Base	Cuerpo	Corona
Tamaño (mm)	% Que pasa del Total	% Que pasa del Total	% Que pasa del Total
75	100	100	100
50	100	100	100
37,50	100	100	100
25,00	100	100	100
19,00	100	100	100
12,50	99,14	99,56	99,52
9,50	98,82	98,48	98,62
4,75	97,14	93,8	91,5
2,00	92,04	85,52	83,88
0,425	80,96	73	66,76
0,075	55,2	47,26	50

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. 4 Granulometría Talud 3

Talud 3	Base	Cuerpo	Corona
Tamaño (mm)	% Que pasa del Total	% Que pasa del Total	% Que pasa del Total
75	100	100	100
50	100	100	100
37,50	100	100	100
25,00	100	100	100
19,00	98,76	100	100
12,50	99,6	99,08	100
9,50	98,76	98,8	98,04
4,75	91,84	93,44	93,46
2,00	82,44	82,08	85,3
0,425	74,8	65,66	76,68
0,075	60,74	50,6	53,96

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. 5 Granulometría Talud 4

Talud 4	Base	Cuerpo	Corona
Tamaño (mm)	% Que pasa del Total	% Que pasa del Total	% Que pasa del Total
75	100	100	100
50	100	100	100
37,50	100	100	100
25,00	100	100	100
19,00	100	100	100
12,50	98,58	100	99,28
9,50	95,94	99,24	98,44
4,75	85,82	94,7	95,78
2,00	76,54	86,7	92,48
0,425	61,28	73,28	84,02
0,075	27,7	45,86	54,4

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. 6 Granulometría Talud 5

Talud 5	Base	Cuerpo	Corona
Tamaño (mm)	% Que pasa del Total	% Que pasa del Total	% Que pasa del Total
75	100	100	100
50	100	100	100
37,50	100	100	100
25,00	100	100	100
19,00	99,54	100	96,62
12,50	91,36	94,58	93,74
9,50	82,16	90,32	89,68
4,75	63,78	76,7	79,74
2,00	48,5	58,66	67,96
0,425	32,26	39,38	47,7
0,075	18,84	18,94	23,26

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. 7 Granulometría Talud 6

Talud 6	Base	Cuerpo	Corona
Tamaño (mm)	% Que pasa del Total	% Que pasa del Total	% Que pasa del Total
75	100	100	100
50	100	100	100
37,50	100	100	100
25,00	95,26	95,48	96,76
19,00	95,26	94,14	94,98
12,50	93,06	92,34	92,06
9,50	89,24	89,38	88,04
4,75	81,3	82,1	80,74
2,00	58,6	57,34	58,58
0,425	35,28	36,2	32,96
0,075	18,06	19,98	17,72

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. 8 Granulometría Talud 7

Talud 7	Base	Cuerpo	Corona
Tamaño (mm)	% Que pasa del Total	% Que pasa del Total	% Que pasa del Total
75	100	100	100
50	100	100	100
37,50	100	100	100
25,00	100	100	100
19,00	96,92	100	100
12,50	96,1	100	100
9,50	95,4	99,48	99,56
4,75	92,28	98,6	96,92
2,00	88,56	95,5	93,42
0,425	82,56	89,4	86,1
0,075	51,92	62,82	55,28

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. 9 Granulometría Talud 8

Talud 8	Base	Cuerpo	Corona
Tamaño (mm)	% Que pasa del Total	% Que pasa del Total	% Que pasa del Total
75	100	100	100
50	100	100	100
37,50	100	100	100
25,00	94,74	100	96,28
19,00	90,4	100	95,24
12,50	86,9	100	92,12
9,50	84,64	98,92	90,5
4,75	75,98	94,56	86,38
2,00	64,86	87,68	81,82
0,425	55,76	82,24	75,4
0,075	32,96	69,72	48,44

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. 10 Granulometría Talud 9

Talud 9	Base	Cuerpo	Corona
Tamaño (mm)	% Que pasa del Total	% Que pasa del Total	% Que pasa del Total
75	100	100	100
50	100	100	100
37,50	100	100	100
25,00	100	100	100
19,00	98,64	100	100
12,50	95,9	99,24	99,38
9,50	92,06	91,44	98
4,75	81,24	89,36	93,78
2,00	69,72	78,84	86,8
0,425	59,76	64,7	76,16
0,075	36,52	39,64	46,34

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. 11 Granulometría Talud 10

Talud 10	Base	Cuerpo	Corona
Tamaño (mm)	% Que pasa del Total	% Que pasa del Total	% Que pasa del Total
75	100	100	100
50	100	100	100
37,50	100	100	100
25,00	100	100	93,68
19,00	98,72	95,04	91,98
12,50	96,82	91,78	89,76
9,50	82,9	87,86	87,5
4,75	50,3	75,64	79,14
2,00	20,96	60,08	68,88
0,425	14,02	44,98	53,54
0,075	9	26,3	38,06

Fuente: Elaboración propia.

3.4.2.2. Límites de Atterberg

El límite líquido

(LL) de un suelo se define como el contenido máximo de humedad a partir del cual dicho suelo deja de comportarse plásticamente y pasa a comportarse como un líquido. Es el contenido de agua del material en el límite superior de su estado plástico. Para este ensayo se utiliza la cuchara de Casagrande. Se mezclo la muestra de suelo con agua hasta homogenizarla, con la ayuda de una espátula se colocó una porción de la masa en la copa de Casagrande, con la ayuda de un ranurador se realizó un corte al centro de la muestra para dividirla en dos partes y proceder al conteo de golpes con una frecuencia de dos golpes por segundo. (ver anexo 3)

3.4.2.3. El límite plástico

(LP) El límite plástico de un suelo es el contenido de humedad correspondiente a un límite convencional entre los estados de consistencia plástico y semisólido. Es el contenido de agua del material, en el límite inferior de su estado plástico. Del suelo ya consistente se extrajo 3 porciones pequeñas que fueron amasadas con la mano, con la ayuda de una base de vidrio se moldeo cada muestra en pequeños rollitos de aproximadamente 3 mm. hasta que se produjo agrietamiento o rotura por la pérdida de humedad. (ver anexo 3)

➤ Resultado de límites de los 10 taludes

Tabla 3. 12 Resultado de límites

Taludes		Límite líquido	Límite plástico	Índice de plasticidad	Taludes		Límite líquido	Límite plástico	Índice de plasticidad
1	Base	46	27	19	6	Base	NP	NP	NP
	Medio	44	25	20		Medio	NP	NP	NP
	Corona	47	24	23		Corona	NP	NP	NP
2	Base	26	17	9	7	Base	20	16	3
	Medio	25	15	10		Medio	24	19	6
	Corona	47	24	23		Corona	26	19	7
3	Base	39	17	22	8	Base	25	19	6
	Medio	40	17	24		Medio	29	19	11
	Corona	43	17	26		Corona	37	25	12
4	Base	24	18	6	9	Base	23	17	5
	Medio	27	19	8		Medio	24	17	6
	Corona	30	19	11		Corona	32	27	6

5	Base	27	25	2	10	Base	25	23	2
	Medio	30	27	3		Medio	23	22	1
	Corona	24	22	2		Corona	40	32	8

Fuente: Elaboración propia.

3.4.2.4. Clasificación de suelos

La clasificación de suelos es una categorización del suelo basado en características distintivas y en criterios de uso. Una clasificación de suelos es muy dinámica, en sí misma, de la estructura, del sistema, las definiciones de clases, y finalmente en la aplicación en el campo. (ver anexo 3)

➤ **Objetivo. -**

Clasificar los suelos en grupos de comportamientos semejantes, con propiedades geométricas similares.

Los materiales que se usaron son los siguientes:

- Granulometría del suelo
- Plasticidad del suelo
- Tabla de clasificación del AASTHO
- Tabla de clasificación del SUCS
- Carta de plasticidad Para dar a conocer las propiedades de un suelo determinado, y adoptando los principios de la mecánica de suelo, se vio la necesidad de concretar una clasificación científica, basada en la granulometría y en la plasticidad.

Los dos sistemas principales de clasificación científica de suelos actualmente en uso son

El sistema AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) y el S.U.C.S (Unified Soil Classification System). El primero se usa principalmente para la evaluación cualitativa de la conveniencia de un suelo como material para la construcción cualitativa de explanadas de carreteras y el segundo es de uso general en cualquier estudio geotécnico.

➤ **Sistema de clasificación S.U.C.S (Unified Soil Classification System)**

El sistema de S.U.C.S clasifica los suelos en base a su granulometría y los límites de Atterberg. A continuación, se muestra dicha clasificación, junto con los símbolos empleados en la misma, así como una descripción de las propiedades esperables de los grupos diferenciados.

Tabla 3. 13 Clasificación, símbolos y descripción

SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN
G	Grava o suelo gravoso
S	Arena o suelo arenoso
W	Bien graduado
C	Arcilla inorgánica
P	Mal graduado
M	Limo inorgánico o arena fina
O	Limos, arcillas mezclas con alto contenido de material orgánico
L	Baja a mediana comprensibilidad (LL <50%)
H	Alta comprensibilidad (LL>50%)

Fuente: Texto guía para el laboratorio (Mecánica de suelos I y laboratorio).

Suelos que contienen arcillas que se consideran de media a alta plasticidad

➤ **Sistema de clasificación AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials)**

El tipo d suelo se clasifica en siete grupos mayores: A-1 al A-7. Los suelos clasificados en los grupos A-1, A-2 Y A-3 son materiales granulares, donde 35% o menos de las partículas pasan por la malla Nro. 200. Los suelos de los que más del 35% pasan por la malla Nro. 200 son clasificados en los grupos A-4, A-5, A-6 Y A-7.

- **Índice de grupo.**

Es un factor de evaluación, que determina la calidad del suelo a través de características similares en grupos de suelos, el índice de grupo es muy importante en el diseño de espesores, inclusive un método lleva el mismo nombre. Condicionando que cualquier factor que pudiere salir negativo, este se asume con el valor de cero.

➤ **Resultado clasificación de suelos**

Tabla 3. 14 Resultado de clasificación de suelos

Talud N°		Clasif. ASSHTO	Clasif. SUCS (Símbolo)	Talud N°		Clasif. ASSHTO	Clasif. SUCS (Símbolo)
1	Base	A-7-5 (13)	CL	6	Base	A-1-b (0)	SM
	Cuerpo	A-7-5 (7)	SC		Cuerpo	A-1-b (0)	SM
	Corona	A-7-5 (11)	CL		Corona	A-1-b (0)	SM
2	Base	A-4 (4)	CL	7	Base	A-4 (3)	ML
	Cuerpo	A-4 (2)	SC		Cuerpo	A-4 (6)	ML-CL
	Corona	A-7-5 (8)	CL		Corona	A-4 (4)	ML-CL
3	Base	A-6 (10)	CL	8	Base	A-2-4 (0)	SM-SC
	Cuerpo	A-7-5 (8)	CL		Cuerpo	A-6 (7)	CL
	Corona	A-7-6 (10)	CL		Corona	A-6 (3)	SC
4	Base	A-2-4 (0)	SM-SC	9	Base	A-4 (0)	SM-SC
	Cuerpo	A-2-4 (2)	SC		Cuerpo	A-4 (1)	SM-SC
	Corona	A-6 (4)	CL		Corona	A-4 (2)	SM-SC
5	Base	A-1-b (0)	SM	10	Base	A-1-a (0)	SP-SM
	Cuerpo	A-1-b (0)	SM		Cuerpo	A-2-4 (0)	SM
	Corona	A-1-b (0)	SM		Corona	A-4 (1)	SC

Fuente: Elaboración propia.

3.4.2.5. Peso específico

El peso específico de los sólidos es una propiedad índice que debe determinarse a todos los suelos, debido a que este valor interviene en la mayor parte de los cálculos relacionados con la mecánica de suelos, en forma relativa, con los diversos valores determinados en el laboratorio pueden clasificarse algunos materiales.

Para este ensayo se realizó la preparación del suelo donde se pasó el material por el tamiz N° 10. y secarlo en un horno durante 24 horas para así obtener una muestra de 80 g.

Se calibro un frasco volumétrico con marca de enrascado donde se introdujo la muestra de suelo para luego añadir agua destilada hasta el 50 % del frasco volumétrico y a baño maría llegar a una temperatura de 60 °C. Se completo la capacidad del frasco con agua destilada y se con la ayuda de hielo re redujo la temperatura para tomar la medida de peso y temperatura a diferentes intervalos que estuvieron dentro del rango de 15 – 30 ° C. (ver ANEXO 3)

➤ Resultado del peso específico de los 10 taludes

Tabla 3. 15 Resultado de los pesos específicos

Taludes		Peso específico (gr/cm3)	Taludes		Peso específico (gr/cm3)
1	Base	2,54	6	Base	2,742
	Cuerpo	2,709		Cuerpo	2,673
	Corona	2,581		Corona	2,735
2	Base	2,592	7	Base	2,205
	Cuerpo	2,667		Cuerpo	2,604
	Corona	2,605		Corona	2,593
3	Base	2,593	8	Base	2,551
	Cuerpo	2,647		Cuerpo	2,604
	Corona	2,684		Corona	2,636
4	Base	2,782	9	Base	2,615
	Cuerpo	2,6		Cuerpo	2,644
	Corona	2,598		Corona	2,717
5	Base	2,682	10	Base	2,775
	Cuerpo	2,736		Cuerpo	2,638
	Corona	2,77		Corona	2,668

Fuente: Elaboración propia.

3.4.2.6. Ensayo de corte directo

Es un método de prueba desarrollado para la determinación de la resistencia al corte de un suelo. Esta prueba es realizada mediante la deformación de un espécimen en un rango de deformación controlada. Generalmente se realizan un mínimo de 3 pruebas, cada una bajo una diferente carga normal para determinar el efecto sobre la resistencia y desplazamiento y las propiedades resistentes. De esta manera se determinan los parámetros de corte, ángulo de fricción interna (ϕ) y la cohesión (c) del suelo. (ver ANEXO 3)

Tabla 3. 16 Resultado de corte directo

Taludes		Cohesión (kg/cm ²)	Angulo de fricción interna (°)	Taludes		Cohesión (kg/cm ²)	Angulo de fricción interna (°)
1	Base	0,1	21,07	6	Base	0,1	30,8
	Cuerpo	0,1	21,07		Cuerpo	0,09	32,79
	Corona	0,11	23,58		Corona	0,1	32,3
2	Base	0,11	30,8	7	Base	0,11	29,51
	Cuerpo	0,12	24,59		Cuerpo	0,12	24,02
	Corona	0,11	22,86		Corona	0,12	24,87
3	Base	0,11	20,92	8	Base	0,11	27,92
	Cuerpo	0,1	23,73		Cuerpo	0,13	25,58
	Corona	0,1	20,47		Corona	0,11	27,38
4	Base	0,11	33,28	9	Base	0,11	30,42
	Cuerpo	0,1	32,06		Cuerpo	0,11	28,72
	Corona	0,11	27,38		Corona	0,12	25,72
5	Base	0,09	25,16	10	Base	0,11	35,85
	Cuerpo	0,09	31,81		Cuerpo	0,1	32,3
	Corona	0,11	26,83		Corona	0,11	27,78

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO IV

INGENIERÍA DEL

PROYECTO

CAPÍTULO IV

INGENIERÍA DEL PROYECTO

4.1. ECUACIONES DE CADA MÉTODO QUE USA EL SOFTWARE SLIDE PARA EL CÁLCULO MATEMÁTICO DE (FS).

4.1.2 CRITERIO DE MOHR-COULOMB

Este criterio describe la resistencia al corte de un suelo o roca:

$$\tau = c + \sigma' \cdot \tan\theta$$

Donde:

- τ : resistencia al corte (kPa)
- c : cohesión (kPa)
- σ' : tensión normal efectiva
- θ : ángulo de fricción interna ($^{\circ}$)

4.2.3. DEFINICIÓN GENERAL DEL FACTOR DE SEGURIDAD (FS)

En todos los métodos del software Slide, el Factor de Seguridad se define como:

$$FS = \frac{\text{Resistencia al corte disponible}}{\text{Esfuerzo cortante requerido para el equilibrio}}$$

Aplicando el criterio de Mohr-Coulomb:

$$FS = \frac{C' \cdot L + (W \cdot \alpha - u \cdot L) \cdot \tan \theta'}{W \cdot \sin \alpha}$$

Donde:

- W : peso del segmento
- α : ángulo de la base del segmento

- u : presión de poros
- L : longitud de la base
- c' , θ' : cohesión y ángulo de fricción efectivos

Este cálculo puede variar según el método que se use.

4.2.4 MÉTODOS DE CÁLCULO EN SLIDE (todos basados en Mohr-Coulomb)

los principales métodos que usa Slide, con su ecuación característica para el cálculo del FS:

4.2.4.1. Método de Bishop Simplificado

Asume equilibrio de momentos, pero ignora fuerzas intersegmentales horizontales.

$$FS = \frac{\sum [(c' \cdot Li + (Wi - ui \cdot Li) \cdot \tan\theta') \cdot \frac{1}{cos\alpha_i}]}{\sum [Wi \cdot \tan\alpha_i]}$$

Se resuelve iterativamente, ya que FS aparece en ambos lados.

4.2.4.2. Método de Janbu Simplificado

Asume equilibrio horizontal. No considera momentos.

$$FS = \frac{\sum (c' \cdot Li + (Ni') \cdot \tan\theta')}{\sum Si}$$

$$Ni' = Wi \cdot cos\alpha_i - ui \cdot Li$$

Si: fuerza cortante necesaria para el equilibrio

4.2.4.3. Método de Spencer

Asume equilibrio de fuerzas y momentos y fuerza resultante constante con un mismo ángulo λ entre todos los segmentos.

$$FS = \frac{\sum (c' \cdot Li + (Ni') \cdot \tan\theta')}{\sum Si}$$

- Se resuelve iterativamente encontrando un ángulo λ y un FS común.
- Es considerado uno de los más rigurosos.

4.2.4.4. Método de Morgenstern-Price

Generaliza Spencer, usando una función arbitraria de relación entre fuerzas intersegmentales:

$$FS = \frac{\sum(c' \cdot Li + (Ni') \cdot \tan \theta')}{\sum[Si]}$$

- Aplica equilibrio de fuerzas y momentos.
- Usa una función de inclinación de fuerza ($f(x)$) como lineal, constante, parabólica, etc.

4.2.4.5. GLE (General Limit Equilibrium)

Este método permite ajustar la función de relación de fuerza intersegmental y aplicar el equilibrio completo (fuerzas + momentos), por lo que engloba métodos como Spencer y Morgenstern-Price

4.2.5. APLICANDO REFUERZOS DE HORMIGON LANZADO HIDROSIEMBRA Y BULONES PARA CADA MÉTODO

➤ Hormigón Lanzado (Shotcrete)

Se modela como una capa superficial resistente. No se introduce como fuerza, sino como aumento de la cohesión superficial y/o como revestimiento estructural con peso propio.

Efecto en las ecuaciones:

- Se aumenta el valor de c' en los segmentos donde se aplica.
- También puede agregarse su peso propio en el cálculo de Wi .

$$ci' = Csuelo + C shotcrete$$

Entonces, el numerador del FS se ve incrementado:

$$FS = \frac{\sum([Csuelo + C shotcrete] \cdot Li + (Ni') \cdot \tan \theta')}{\sum Si}$$

➤ Hidrosiembra

Es un refuerzo indirecto, que no entra directamente en el cálculo estructural del FS. Mejora la resistencia superficial contra erosión e infiltración de agua, lo cual:

- Disminuye presión de poros (u)
- Disminuye posibilidad de deslizamiento superficial

Efecto en las ecuaciones:

- Reducción de ui, por tanto, se incrementa la resistencia efectiva:

$$Ni' = Wi \cdot \cos ai - ui \cdot Li \text{ (menor presión de poro)}$$

$$FS = \frac{\sum(c' \cdot Li + (Ni') \cdot \tan \theta')}{\sum Si}$$

➤ Bulones (Anclajes activos y pasivos)

Los bulones se modelan como fuerzas adicionales externas de refuerzo. En Slide, se agregan como fuerzas de resistencia Ti aplicadas a lo largo del talud.

Efecto en las ecuaciones:

- Se suma su contribución directa a la resistencia movilizada.

$$FS = \frac{\sum[(c' \cdot Li + (Ni') \cdot \tan \theta') + Ti \cdot \cos(\theta i)]}{\sum Si}$$

T_i : componente de fuerza del bulón (depende si es activo o pasivo)

θ_i : ángulo entre el bulón y la base del segmento

En el software:

- Los bulones activos tienen fuerza de tensión predefinida
- Los bulones pasivos desarrollan fuerza en función del desplazamiento (Slide usa modelos elásticos o bilineales)

4.2.PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO DEL FACTOR DE SEGURIDAD CON PROGRAMA SLIDE 6.0

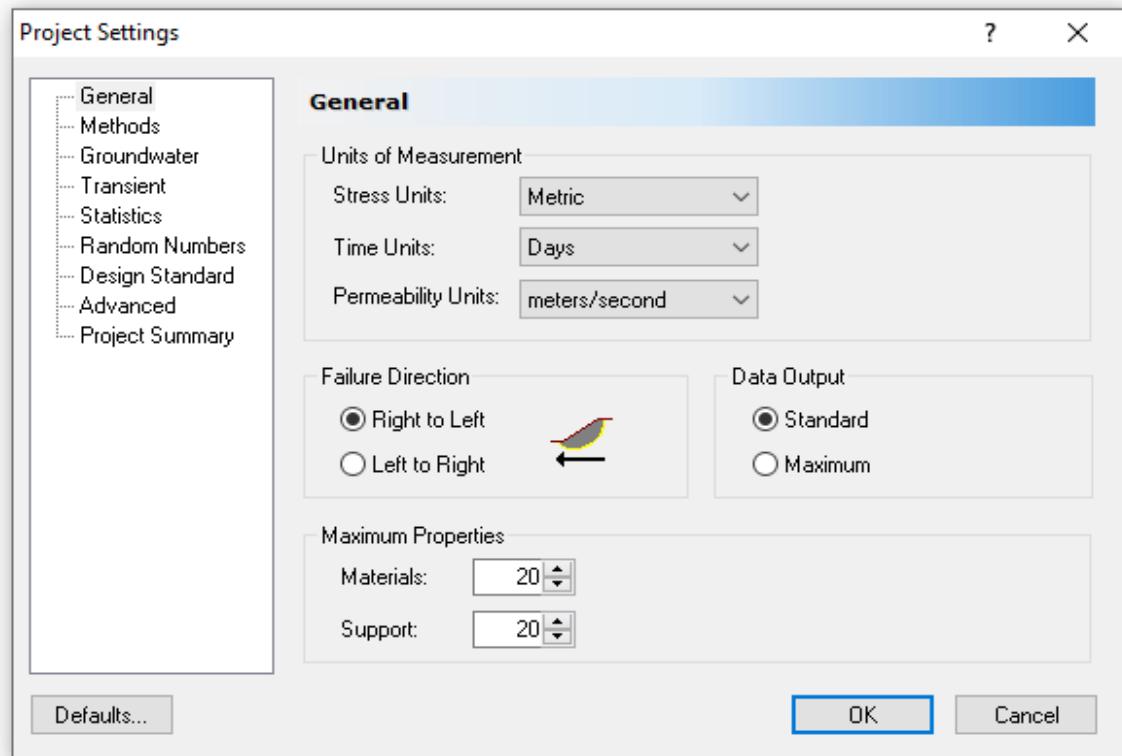
➤ Paso 1: Definición de las características del proyecto

Al iniciar el programa, dirigirse a la pestaña “**Análisis**”. En esta sección se deben definir los parámetros generales del proyecto, que incluyen:

- **Unidades de trabajo:** Seleccionar el sistema de unidades adecuado, por ejemplo, kN/m, de acuerdo con los requerimientos del proyecto.
- **Sentido de la falla:** Indicar si la falla potencial se analiza hacia la izquierda, hacia la derecha o en ambos sentidos.
- **Métodos de análisis:** Escoger uno o varios métodos de equilibrio límite a utilizar (por ejemplo, Bishop simplificado, Janbu, Morgenstern-Price, Fellenius, Spencer, etc.).
- **Cantidad de dovelas (o segmentos):** Definir cuántas divisiones tendrá la superficie de falla para el análisis. Este valor afecta la precisión de los cálculos.

Una vez configurados estos parámetros, se puede proceder a la modelación del perfil geotécnico o importar geometrías y datos del terreno si el software lo permite.

Figura 4. 1 Configuración general del proyecto



Fuente: Elaboración propia

➤ Paso 2: Ingreso del perfil del talud

Una vez definidas las características generales del proyecto, se procede a introducir el **perfil del talud**. Para ello, seguir los siguientes pasos:

- Presionar el comando rápido “**Ctrl + 1**” para activar la herramienta de definición del perfil.
- Dirigirse a la **esquina inferior derecha** de la interfaz, donde se encuentra la pestaña correspondiente al ingreso de coordenadas.
- Abrir dicha pestaña para desplegar el panel de edición.
- Introducir manualmente las **coordenadas (X, Y)** que definen el contorno del perfil del talud. Cada punto debe ingresarse en el orden adecuado para representar correctamente la geometría del terreno.
- Verificar que la geometría trazada sea coherente con las condiciones del sitio.

Este paso es fundamental, ya que la precisión en la representación del perfil influye directamente en los resultados del análisis de estabilidad.

Figura 4. 2 Introducción de coordenadas del perfil del talud

The screenshot shows a software dialog titled "Coordinate Table". It contains a table with columns for "Point", "X", and "Y". There are 9 rows labeled 1 through 9. Row 1 has its X value selected. At the bottom are buttons for "Import...", "OK", "Export...", and "Cancel".

Point	X	Y
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		

Fuente: Elaboración propia

➤ **Paso 3: Definición de capas de material y propiedades geotécnicas**

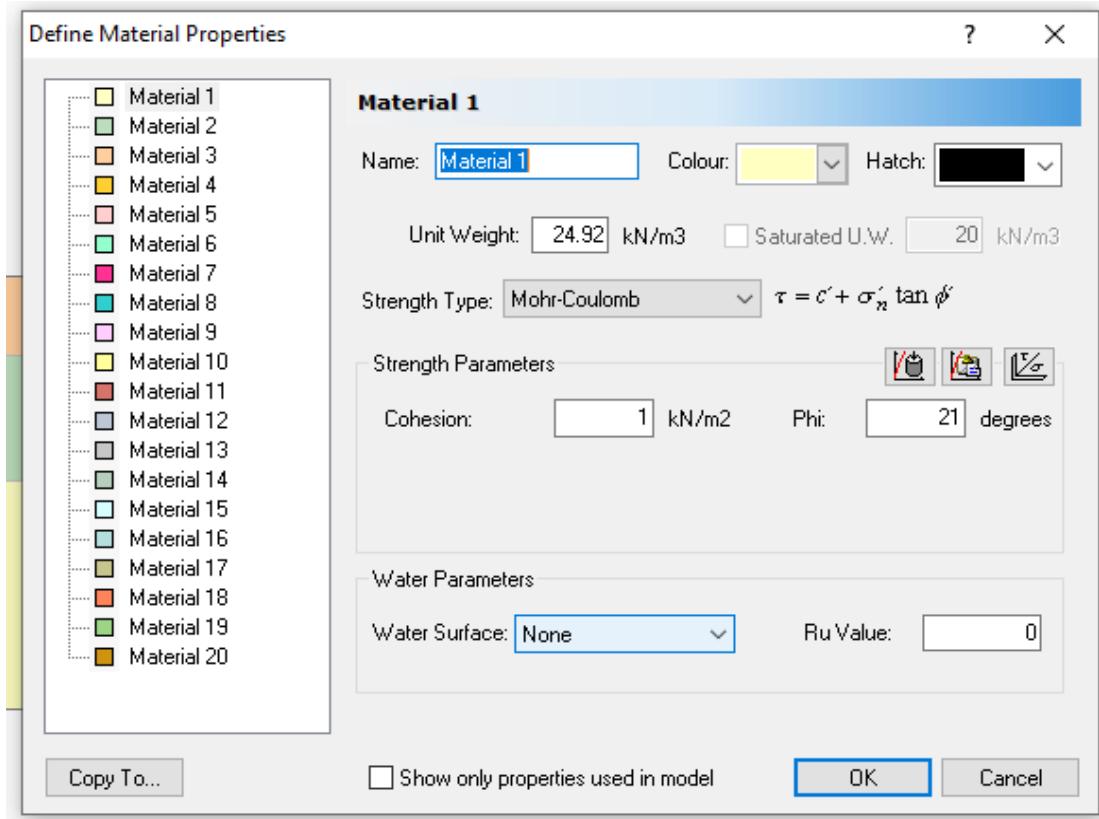
Con el perfil del talud ya trazado, el siguiente paso consiste en definir las diferentes **capas de suelo o material** que lo componen, así como asignarles sus propiedades geotécnicas. Para ello, realizar lo siguiente:

- **Delimitar los límites de cada capa** dentro del perfil, utilizando las herramientas de edición disponibles en el área de trabajo.
- Acceder a la ventana de propiedades mediante la pestaña “**Propiedades**” y seleccionar la opción “**Definir propiedades de los materiales**”.
- En esta ventana, crear y nombrar cada uno de los materiales que serán utilizados en el modelo (por ejemplo: arcilla, arena, roca, etc.).
- Asignar las propiedades geotécnicas correspondientes a cada material, tales como:
 - Peso específico (γ)
 - Cohesión (c)

- Ángulo de fricción interna (ϕ)
- Permeabilidad (si aplica)
- Asignar cada material a su respectiva capa dentro del perfil mediante el panel gráfico o mediante asignación directa en el menú.

Es importante verificar que las propiedades ingresadas sean consistentes con los resultados de laboratorio o los estudios geotécnicos disponibles.

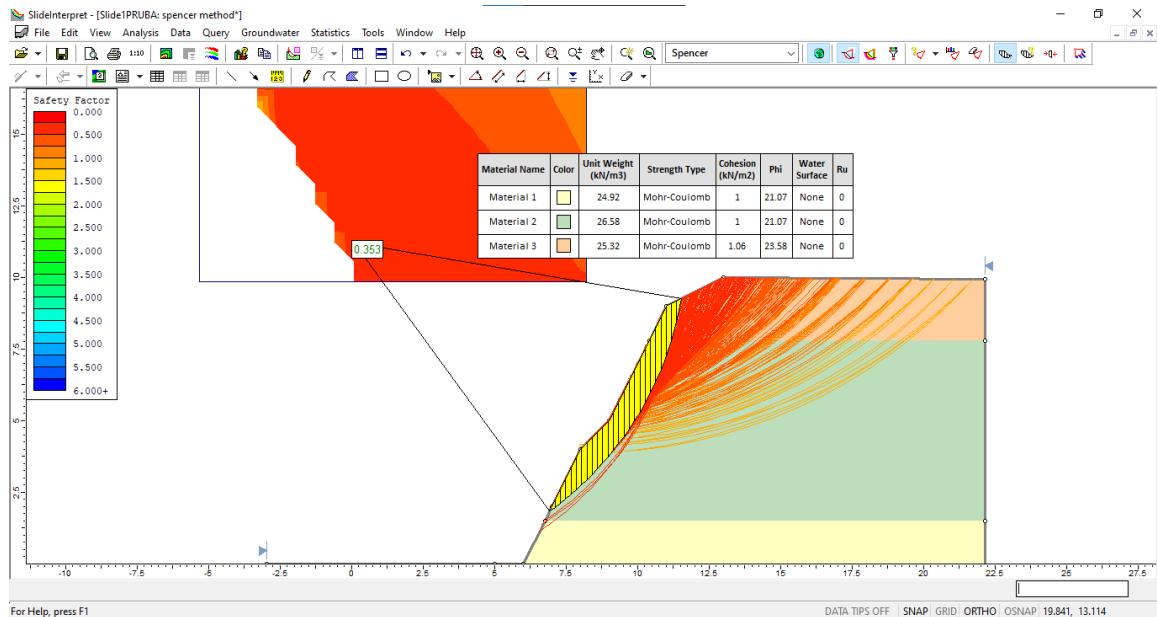
Figura 4. 3 Propiedades de los materiales



Fuente: Elaboración propia

- **Paso 4:** Cálculo del análisis de estabilidad e interpretación de resultados. Luego se procede analizar el talud yendo a la pestaña “análisis” opción calcular y posterior la pestaña de interpretación.

Figura 4. 4 Interpretación de los resultados



Fuente: Elaboración propia

4.3. RESULTADOS DE FACTOR DE SEGURIDAD SIN REFUERZO

Tabla 4. 1 Factor de seguridad más desfavorable

Talud N°	Fellenius	Bishop simplified	Jambu	Spencer	Morgenstern-Prince	Observaciones
1	0,328	0,355	0,326	0,349	0,349	Muy inestable
2	0,266	0,293	0,264	0,292	0,289	Muy inestable
3	0,263	0,282	0,259	0,285	0,279	Muy inestable
4	0,428	0,446	0,42	0,446	0,446	Muy inestable
5	0,502	0,511	0,495	0,511	0,513	Inestable
6	0,323	0,348	0,323	0,363	0,359	Muy inestable
7	0,297	0,32	0,299	0,311	0,314	Muy inestable
8	0,326	0,349	0,327	0,341	0,341	Muy inestable
9	0,334	0,349	0,334	0,351	0,348	Muy inestable
10	0,597	0,606	0,597	0,602	0,602	Inestable

Fuente: Elaboración propia

4.3. ANÁLISIS DE LAS ALTERNATIVAS DE LOS REFUERZOS

4.3.1. CONSIDERACIONES DE DISEÑO CON BULONES.

Las consideraciones de diseño con bulones para refuerzo de taludes son fundamentales para garantizar la estabilidad, durabilidad y eficiencia del sistema. Aquí se presentará una guía estructurada en secciones clave, basada en estándares internacionales y experiencias de ingeniería geotécnica.

Tabla 4. 2 Parámetros de diseño con Bulones

Parámetro	Rango típico
Longitud total	3 – 15 m (según talud y tipo de falla)
Diámetro del bulón	20 – 40 mm
Separación entre bulones	1 – 3 m
Inclinación	10° – 30° desde la horizontal
Resistencia del acero	399 – 1,000 MPa
Lechada	Cemento puro o mezclas con bentonita/aditivos

Fuente: Revista Ingeniería – UMSA (Universidad Mayor de San Andrés)

4.3.1.1. Cálculo de FS con refuerzo de bulones

Mediante el programa Slide para las alternativas de solución se puede editar el perfil del talud partiendo anteriormente del paso 2 con “clic derecho editar coordenadas” y para añadir refuerzos al talud debemos ir a la pestaña de “propiedades” opción “definir propiedades de soportes”.

Tabla 4. 3 Datos para el cálculo de FS con bulones

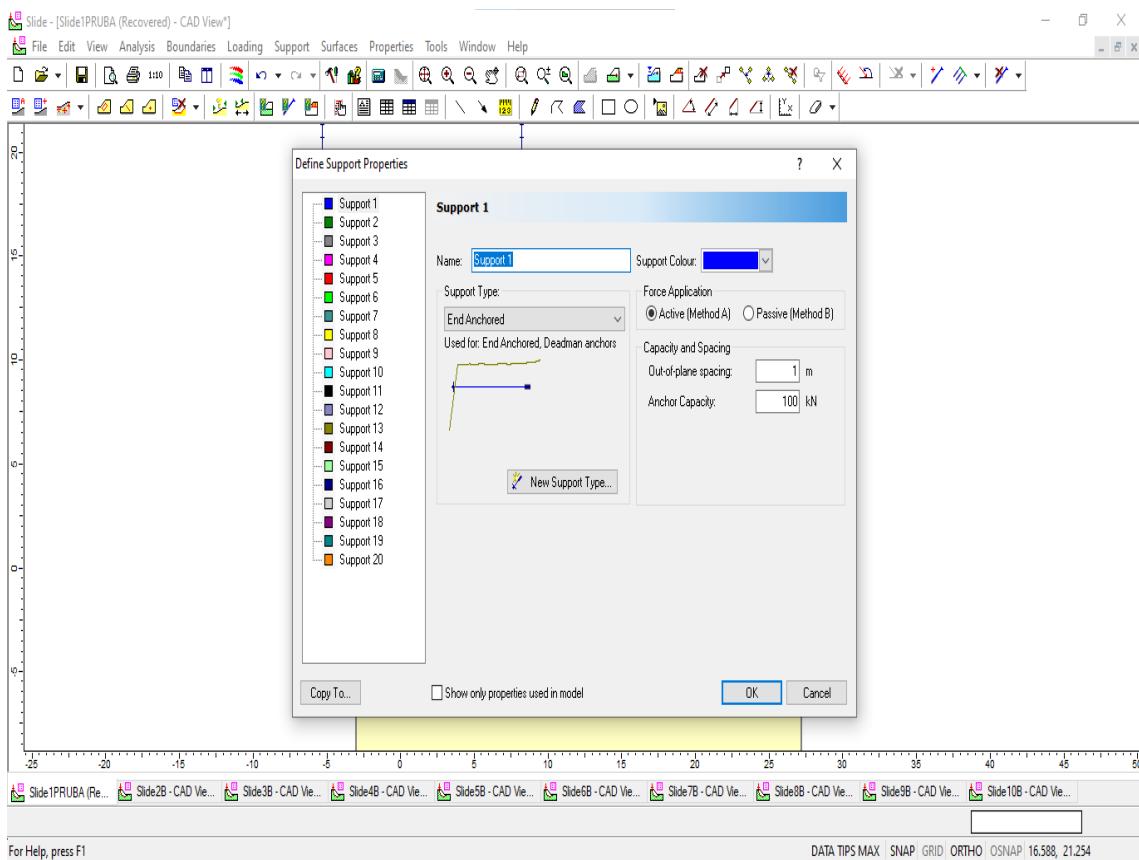
Talud N°	Capacidad de anclaje (kN)	Angulo (°)	Separación (m)	Longitud (m)
1	150	-30,00	1x1	8,00
2	150	-30,00	1x1	5,00
3	150	-30,00	1x1	4,80
4	150	-30,00	1x1	4,50
5	200	-30,00	1x1	5,00
6	200	-30,00	1x1	5,50
7	150	-30,00	1x1	6,00
8	150	-30,00	1x1	4,00
9	200	-30,00	1x1	4,00
10	200	-30,00	1x1	13,00
Longitud Promedio				6,0

Fuente: Elaboración propia

- **Paso 5: Propiedades de los refuerzos**

Mediante el programa Slide para las alternativas de solución se puede editar el perfil del talud partiendo anteriormente del paso 2 con “clic derecho editar coordenadas” y para añadir refuerzos al talud debemos ir a la pestaña de “propiedades” opción “definir propiedades de soportes”.

Figura 4. 5 Propiedades de soportes



Fuente: Elaboración propia

- **Paso 6: Inserción de soportes en el modelo**

Una vez definidas las propiedades de los elementos de soporte (ver Paso 5), se procede a **añadirlos al perfil del talud** siguiendo estos pasos:

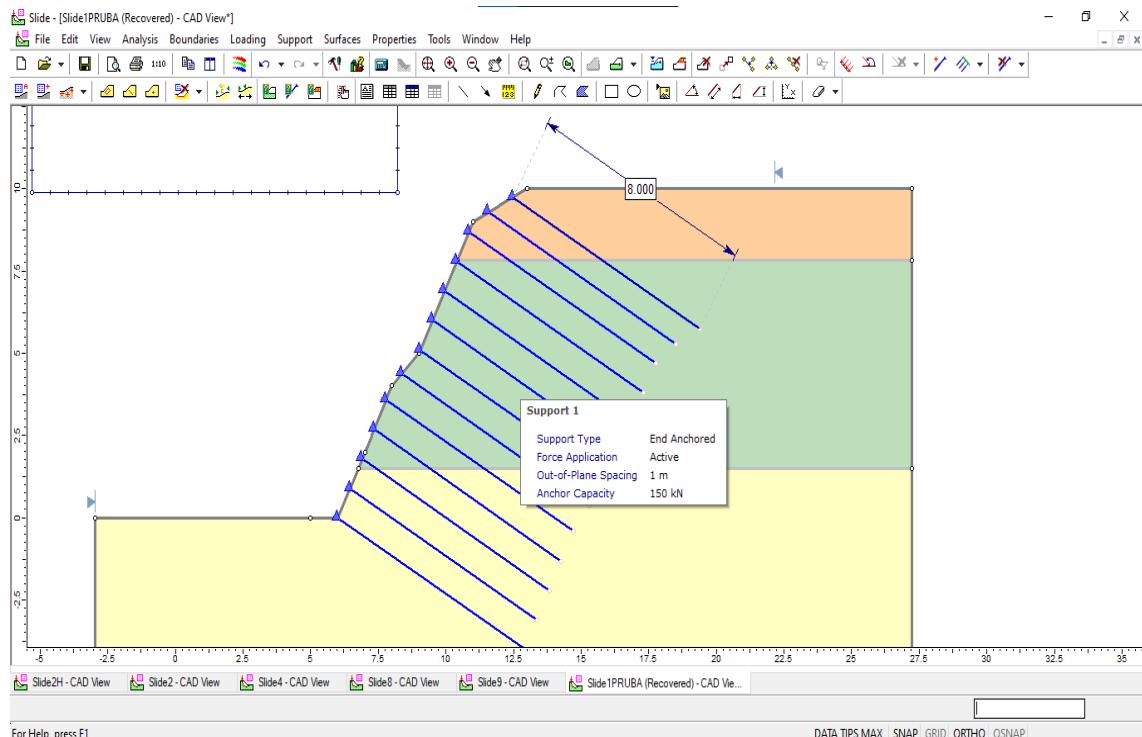
- Ir a la ventana “**Support**” (o su equivalente en la interfaz del software).
- Seleccionar la opción “**Add support**”.

- Hacer clic sobre el perfil del talud en las posiciones donde se desee insertar el refuerzo.
- Repetir el procedimiento para cada tipo o tramo de soporte que se requiera los bulones.
- Verificar la correcta ubicación, orientación y profundidad de cada soporte, ajustándolos según sea necesario.

Una vez insertados los soportes,

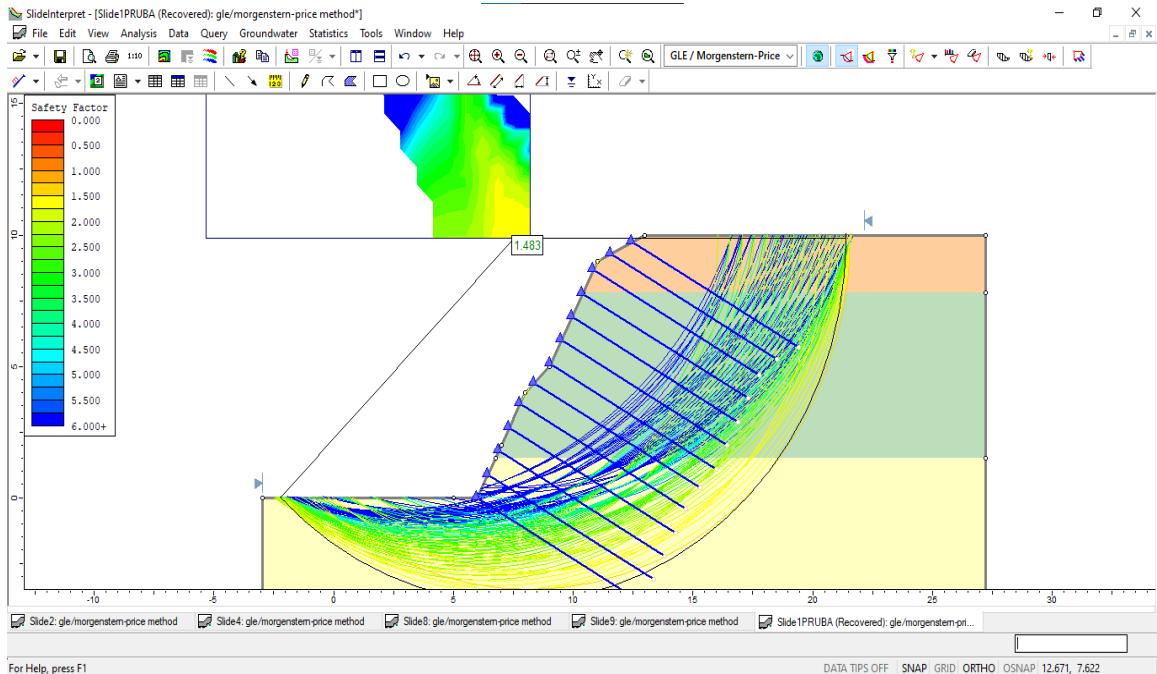
Ejecutar nuevamente el análisis y cálculo de estabilidad desde la pestaña “**Análisis**” → “**Calcular**”, para obtener el nuevo **factor de seguridad** considerando los refuerzos incorporados.

Figura 4. 6 Colocado de soportes de refuerzos



Fuente: Elaboración propia

Figura 4. 7 Análisis de resultados con refuerzos



Fuente: Elaboración propia

4.3.1.2. Resultados de cálculo de FS con refuerzo de bulones

Tabla 4. 4 FS con refuerzo de bulones

Talud N°	Fellenius	Bishop simplified	Jambu	Spencer	Morgenstern-Prince	Promedio	% De incremento
1	1,21	1,49	1,16	1,48	1,48	1,36	299
2	1,12	1,20	1,25	1,55	1,55	1,33	375
3	1,23	1,41	1,14	1,48	1,49	1,35	393
4	1,16	1,29	1,26	1,51	1,52	1,35	208
5	1,17	1,47	1,24	1,46	1,47	1,36	169
6	1,25	1,44	1,29	1,52	1,53	1,40	309
7	1,24	1,49	1,21	1,50	1,51	1,39	351
8	1,20	1,48	1,22	1,49	1,49	1,37	308
9	1,20	1,47	1,23	1,48	1,49	1,37	300
10	1,25	1,48	1,20	1,48	1,49	1,38	129

Fuente: Elaboración propia

4.3.1.3. Costo de los bulones en los taludes

Tabla 4. 5 Precio unitario de m² de refuerzo por bulones

Talud Nº	Precio de bulón por (ml)	Longitud de bulón (m)	T. de B. estándar (m)	P. T. bulón (Bs)	Precio unitario (Bs/m2)	Área de refuerzo (m2)	Precio total por talud (Bs)
1	26,65	8	8	213,22	1087	720,3	782966,1
2	26,65	5	5	133,2625	996	2321,095	2311810,62
3	26,65	4,8	5	133,2625	996	1678,95	1672234,2
4	26,65	4,5	5	133,2625	996	1784,31	1777172,76
5	26,65	5	5	133,2625	996	912,49	908840,04
6	26,65	5,5	6	159,915	1026	2749,55	2821038,3
7	26,65	6	6	159,915	1026	3069,318	3149120,27
8	26,65	4	4	106,61	966	426,29	411796,14
9	26,65	4	4	106,61	966	3808,54	3679049,64
10	26,65	13	13	346,4825	1238	7880,12	9755588,56

Fuente: Elaboración propia

Costo estimado por metro cuadrado: 1026 Bs/m² para una longitud de 6 m con Ø25 mm y separación de 1x1m para bulones activos. El análisis de precios unitarios por metro cuadrado (m²) para la estabilización de taludes con bulones en Bolivia, basado en datos del Generador de Precios de CYPE Bolivia, Insocons y el desarrollo del precio unitario de cada uno está en anexo 5.

4.3.2. CONSIDERACIONES DE DISEÑO CON HIDROSIEMBRA

4.3.2.1 Cálculo del FS con refuerzo de hidrosiembra

El uso de técnicas de bioingeniería, como la hidrosiembra, contribuye significativamente a la estabilidad superficial de taludes mediante el refuerzo del suelo por la acción de las raíces. Este refuerzo puede ser cuantificado como un aumento en

la cohesión aparente del suelo, lo cual se incorpora directamente en el análisis del Factor de Seguridad (FS) mediante los criterios clásicos de estabilidad de taludes.

Tabla 4. 6 Propiedades geotécnicas de la hidrosiembra

Parámetro geotécnico	Valor recomendado	Fuente y justificación
Espesor efectivo radicular	0.20 a 0.30 m	Gray & Sotir (1996), Biotechnical and Soil Bioengineering Slope Stabilization, Cap. 5, pág. 142
Cohesión inducida por raíces	5 a 10 kPa	Gray & Leiser (1982), Biotechnical Slope Protection, Cap. 4, pág. 86
Ángulo de fricción	30° a 36°	FHWA (2007), Green Stabilization of Slopes, Cap. 3, pág. 24
Peso específico húmedo	11.5 a 13 kN/m ³	USDA Forest Service, Hydroseeding Manual, 2005, pág. 46

Fuente: Elaboración propia

Para el cálculo de estabilidad con el refuerzo de hidrosiembra con el programa asumimos en base a unas semillas de raíces profundas y de alta cohesión para poder obtener mayores resultados de FS.

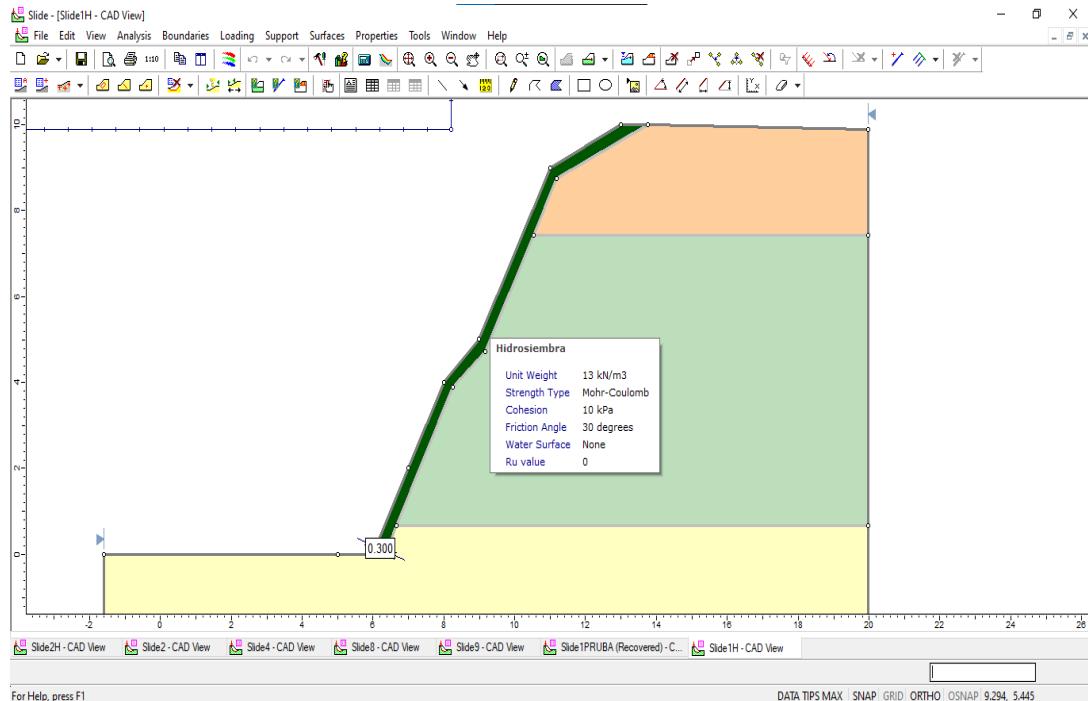
$$Y = 13,00 \text{ kN/m}^3$$

$$\text{Cohesión} = 10,00 \text{ kPa}$$

$$\text{Fricción} = 30,00 {}^\circ$$

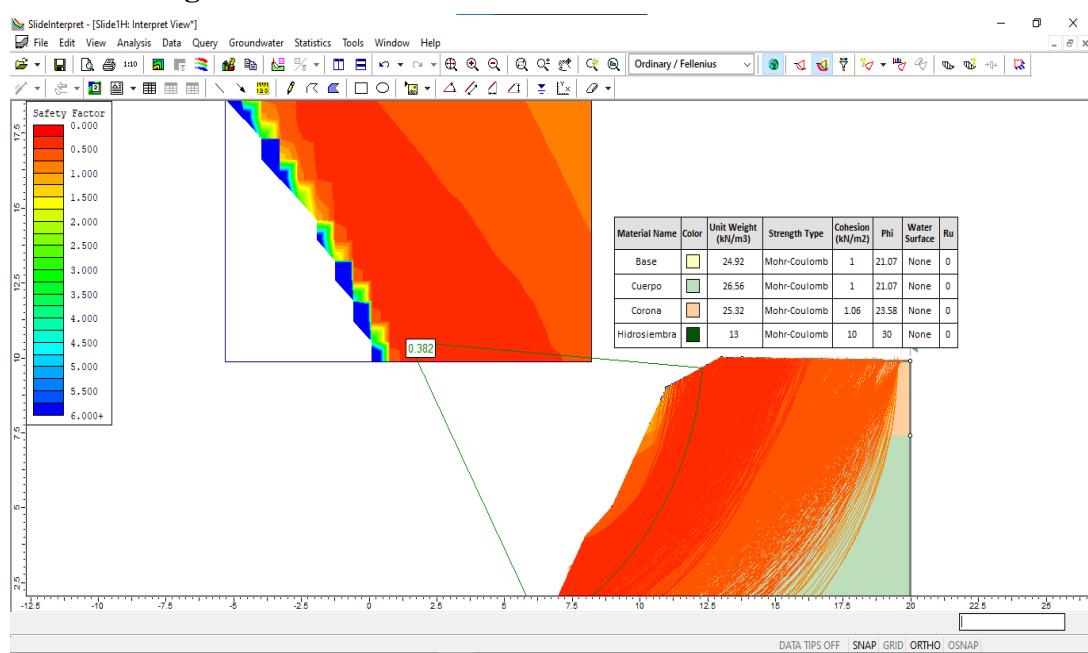
$$t = 0,30 \text{ m}$$

Figura 4.8 Análisis de estabilidad con refuerzo de Hidrosiembra



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.9 Resultados de FS con refuerzo de Hidrosiembra



Fuente: Elaboración propia

4.3.2.2 Resultados de cálculo de FS con refuerzo Hidrosiembra

Tabla 4. 7 FS con refuerzo de Hidrosiembra

Talud N°	Fellenius	Bishop simplified	Jambu	Spencer	Morgenstern-Prince	Promedio	% De incremento
1	0,38	0,41	0,38	0,41	0,40	0,40	16
2	0,31	0,34	0,30	0,35	0,34	0,33	17
3	0,31	0,34	0,30	0,34	0,34	0,33	19
4	0,50	0,57	0,50	0,56	0,57	0,54	24
5	0,49	0,54	0,49	0,54	0,54	0,52	2
6	0,42	0,46	0,43	0,48	0,45	0,45	30
7	0,35	0,37	0,35	0,38	0,37	0,36	18
8	0,40	0,44	0,39	0,44	0,35	0,40	19
9	0,37	0,39	0,37	0,39	0,39	0,38	11
10	0,60	0,62	0,60	0,62	0,61	0,61	1

Fuente: Elaboración propia

4.3.2.3 Costo de hidrosiembra en los taludes

Tabla 4. 8 Precio unitario por m² de refuerzo por hidrosiembra

Talud N°	Precio unitario (Bs/m ²)	Área de refuerzo (m ²)	Precio total por talud (Bs)
1	30	720,3	21609
2	30	2321,095	69632,85
3	30	1678,95	50368,5
4	30	1784,31	53529,3
5	30	912,49	27374,7
6	30	2749,55	82486,5
7	30	3069,318	92079,54
8	30	426,29	12788,7
9	30	3808,54	114256,2
10	30	7880,12	236403,6

Fuente: Elaboración propia

Precio total por m² (estimado) de refuerzo por hidrosiembra es de 30 Bs/m² según datos referenciales generados por:

- CYPE Bolivia – Estabilización de taludes
- Estimaciones del Plan de Manejo de Cuencas (Bolivia – MMAyA)

El desarrollo del precio unitario se encuentra en anexo 5.

4.3.3. CONSIDERACIONES DE DISEÑO CON HORMIGON LANZADO

El refuerzo de taludes con hormigón lanzado (shotcrete) es una técnica ampliamente utilizada en Bolivia y otros países andinos para estabilizar superficies inestables o erosionadas. Aquí se tiene una explicación técnica completa.

Tabla 4. 9 Propiedades del Hormigón Lanzado y Fuentes Técnicas

Propiedad	Valor típico / Rango	Fuente técnica
Resistencia a compresión (28d)	25 – 40 MPa (puede llegar a 50 MPa)	ACI 506R-16, EFNARC (Specification for Sprayed Concrete, 2009)
Resistencia a tracción	2 – 7 MPa (según uso de fibras)	ACI 506R-16, López Jimeno (2003)
Módulo de elasticidad (E)	15 – 30 GPa	EN 14487-1:2005, EFNARC
Cohesión con fibras/mallas	100 -150 kPa	Geosynthetics in Civil Engineering, R. W. Sarsby, Cap. 12, pág. 283
Ángulo de fricción (ϕ)	25° a 35°	Gray & Sotir (1996), Biotechnical Slope Stabilization, Cap. 5, pág. 143
Peso específico (γ)	22 – 24 kN/m ³	ACI 506R-16; EN 12390-7; López Jimeno (2003)
Absorción de agua	< 6% (con aditivos)	EFNARC, ACI 506R-16
Espesor recomendado en taludes	0.10 a 0.15 m	Geocisa; Hoek & Bray (2007)
Ductilidad (con fibras)	Alta	EFNARC; ASTM C1609 (ensayo con fibras)
Adherencia al sustrato	0.5 – 1.0 MPa	EFNARC; Prácticas de campo (Geocisa, Ferrovial)
Relación agua/cemento (a/c)	0.35 – 0.45	EM 1110-2-2005, FHWA Soil Nail Manual

Fuente: Elaboración propia

4.3.3.1. Cálculo del FS con refuerzo de hormigón lanzado

El cálculo de la estabilidad de un talud con refuerzo de hormigón lanzado (shotcrete) implica evaluar el factor de seguridad (FS) mediante métodos de equilibrio límite.

El efecto del hormigón lanzado se introduce aumentando la cohesión efectiva y el peso propio del talud.

➤ Datos para cálculo de los demás taludes

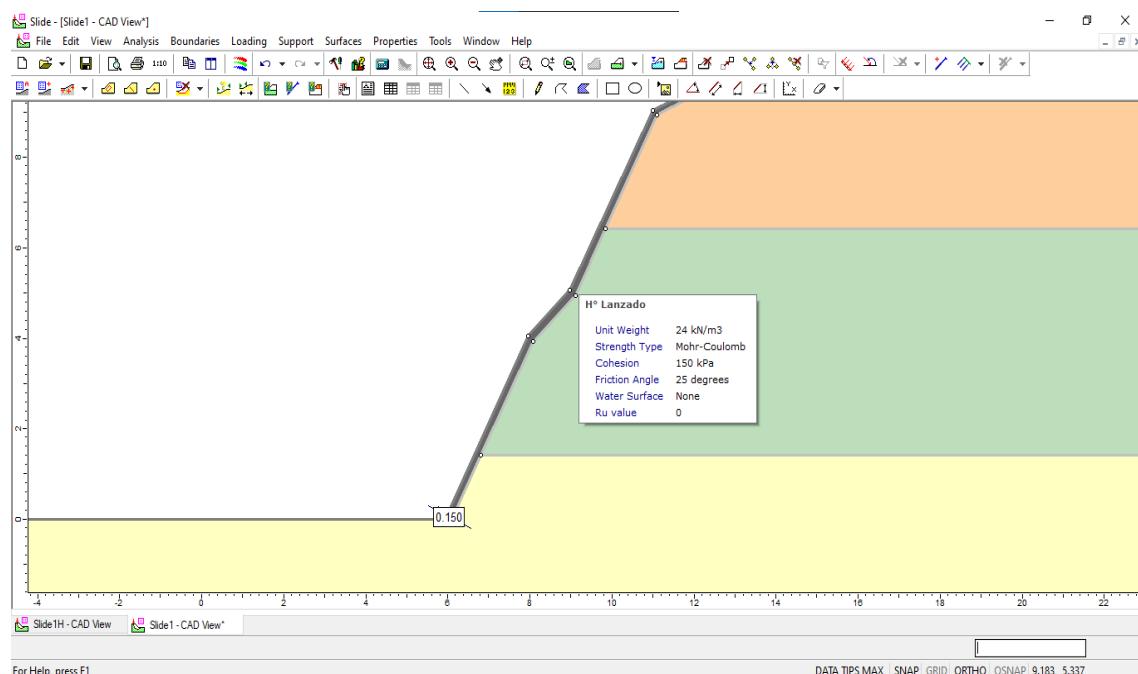
Para mayor eficiencia y estabilidad se asumió los siguientes datos con espesor t de 0,10 m para los taludes 2,4,6,8,9 dados que son suelos compactos y presencia de roca y los demás con un espesor t de 0,15 m.

$$Y = 24,00 \text{ kN/m}^3$$

$$\text{Cohesión} = 150,00 \text{ kPa}$$

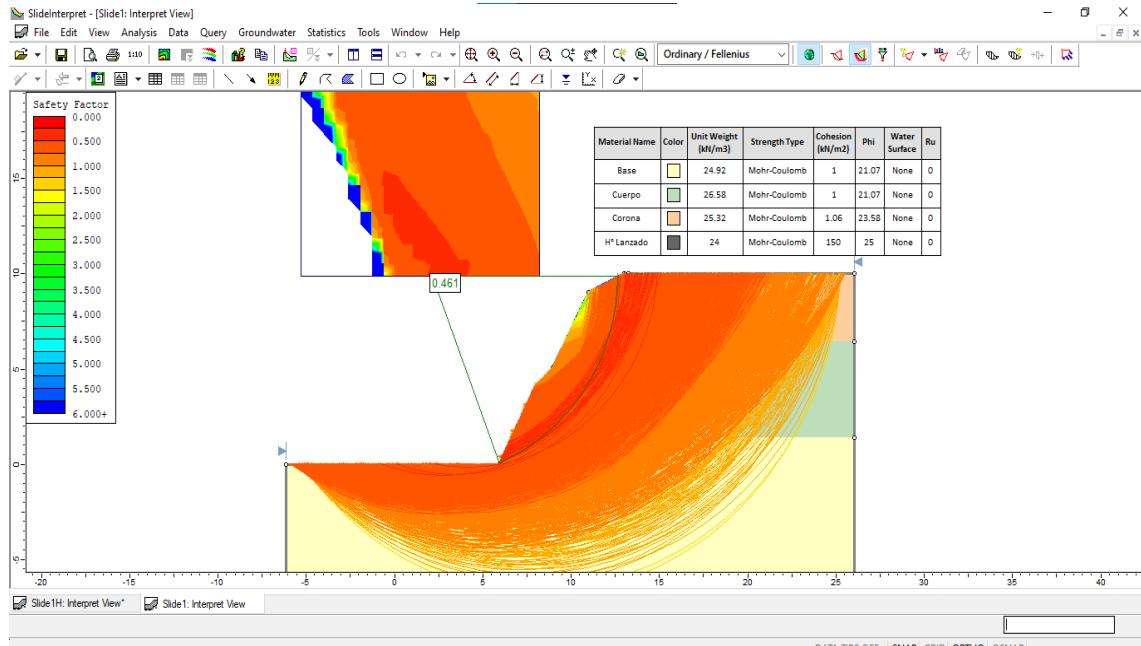
$$\text{Fricción} = 25,00^\circ$$

Figura 4. 10 Análisis de FS con refuerzo de Hormigón Lanzado



Fuente: Elaboración propia

Figura 4. 11 Resultados de FS con refuerzo de Hormigón Lanzado



Fuente: Elaboración propia

4.3.3.2. Resultados de cálculo de FS con refuerzo de hormigón lanzado

Tabla 4. 10 FS con refuerzo de Hormigón Lanzado

Talud N°	Fellenius	Bishop simplificado	Jambu	Spence r	Morgenstern -Prince	Promedio	% De incremento
1	0,46	0,52	0,45	0,53	0,52	0,50	45
2	0,43	0,50	0,42	0,50	0,49	0,47	66
3	0,41	0,48	0,40	0,48	0,46	0,45	63
4	0,71	0,83	0,71	0,84	0,85	0,79	80
5	0,67	0,77	0,67	0,78	0,75	0,73	44
6	0,52	0,59	0,52	0,56	0,58	0,55	62
7	0,44	0,50	0,43	0,50	0,49	0,47	53
8	0,56	0,64	0,55	0,62	0,62	0,60	78
9	0,47	0,52	0,47	0,50	0,51	0,49	44
10	0,69	0,73	0,68	0,73	0,73	0,71	18

Fuente: Elaboración propia

4.3.3.3. Costo de Hormigón Lanzado en los taludes

Tabla 4. 11 Precio unitario por m² de refuerzo por Hormigón lanzado

Talud N°	Espesor t (m)	Precio unitario (Bs/m ²)	Área de refuerzo (m ²)	Precio total por talud (Bs)
1	0,15	215	720,3	154864,5
2	0,10	195	2321,095	452613,525
3	0,15	215	1678,95	360974,25
4	0,10	195	1784,31	347940,45
5	0,15	215	912,49	196185,35
6	0,10	195	2749,55	536162,25
7	0,15	215	3069,318	659903,37
8	0,10	195	426,29	83126,55
9	0,10	195	3808,54	742665,3
10	0,15	215	7880,12	1694225,8

Fuente: Elaboración propia

El costo total estimado por m² del refuerzo de hormigón lanzado de un espesor de 15 cm es de 215 Bs/m² y para de 10 cm es de 195 Bs/m².

Según las Fuentes Técnicas de precios que se mencionara a continuación:

- **Generador de Precios de la Construcción – CYPE Bolivia**
Ofrece precios unitarios actualizados para diversas actividades de construcción en Bolivia.
- **Insucons Bolivia**
Herramienta para consulta de costos, análisis de precios unitarios y elaboración de presupuestos en la industria de la construcción en Bolivia.

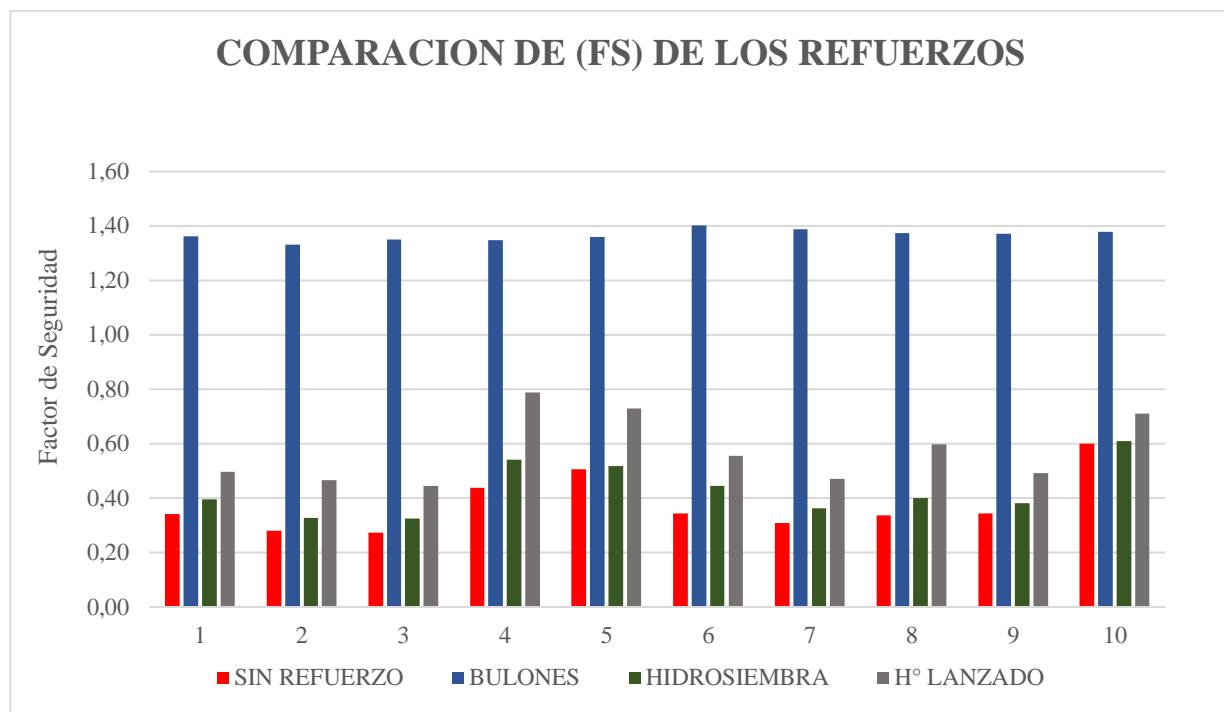
El desarrollo del precio unitario se encuentra en (anexo 5).

4.4. ANÁLISIS TECNICO Y ECONOMICO DE LOS RFUERZOS

4.4.1. ANÁLISIS TÉCNICO

El análisis técnico de los taludes se refiere al proceso de evaluación geotécnica, estructural es la que determino si el talud es estable o inestable, con base y propiedades del suelo para el modelando y cálculo de factor de seguridad.

Figura 4. 12 Factor de seguridad de taludes con refuerzo (Bulones, Hidrosiembra y H° Lanzado)

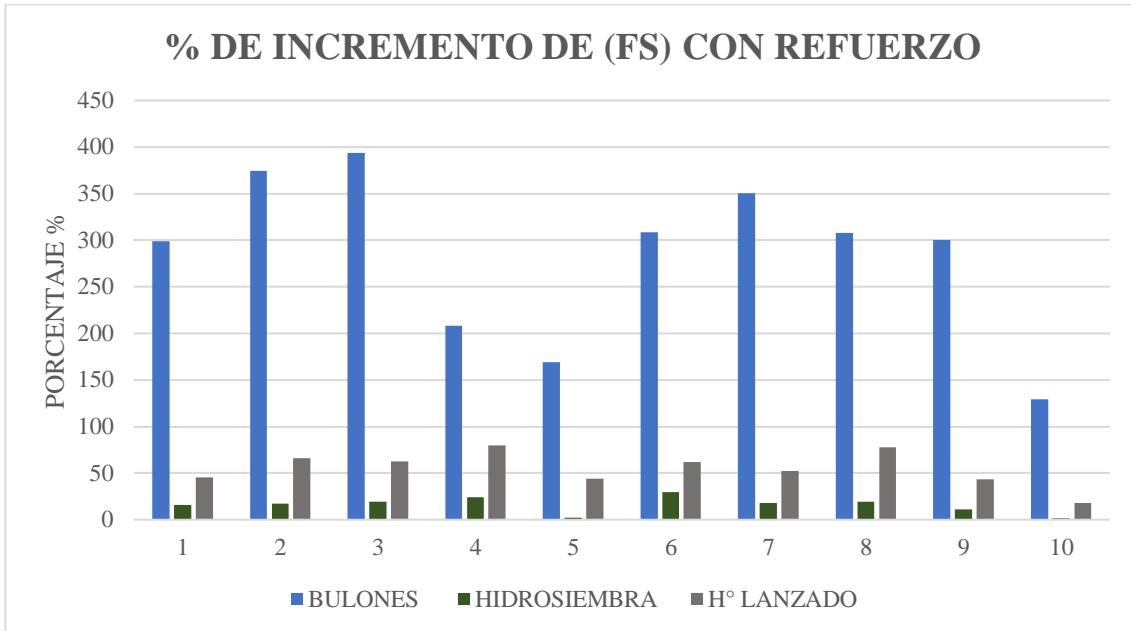


Fuente: Elaboración propia

La **figura 4.13** Los resultados obtenidos muestran que el refuerzo mediante bulones proporciona los valores más favorables de factor de seguridad (FS), alcanzando niveles superiores a 1.5, conforme a los criterios de estabilidad establecidos por la Norma Boliviana NB-1225001 y la Administradora Boliviana de Carreteras (ABC). Estos resultados se obtuvieron utilizando los métodos más precisos y rigurosos de análisis, como Spencer y Morgenstern-Price, los cuales ofrecen mayor exactitud en el modelado del equilibrio límite. En contraste, los refuerzos con H° lanzado e Hidrosiembra arrojaron factores de seguridad inferiores a 1.0, lo cual indica una condición inestable

del talud, principalmente debido a la inadecuada compatibilidad del tipo de refuerzo con las características del suelo. La discretización comparativa técnica detallada de estos resultados se encuentra disponible en el (**Anexo 6**.)

Figura 4. 13 Porcentaje de incremento del FS de los taludes con refuerzo



Fuente: Elaboración propia

La figura 4.14 Se observa que el refuerzo mediante bulones demuestra ser la opción más eficiente para la estabilización de taludes, evidenciado por un incremento máximo en el factor de seguridad (FS) de aproximadamente 393 % en comparación con la condición sin refuerzo. En segundo lugar, el H° lanzado presenta un incremento del 80 %, mientras que la Hidrosiembra, al depender principalmente del desarrollo radicular y ser menos efectiva en pendientes pronunciadas, alcanza solo un 30 % de mejora. Estos resultados reflejan la superioridad técnica de los bulones en términos de efectividad estructural, especialmente en condiciones geotécnicas críticas. Los valores detallados y la metodología de cálculo de cada refuerzo se presentan en el **Anexo 6**.

Desde el punto de vista técnico, los bulones presentan una alta efectividad como sistema de refuerzo, ya que se adaptan a distintos tipos de suelo, proporcionando soporte interno que mejora significativamente la estabilidad del talud. En segundo

lugar, el H° lanzado resulta más adecuado en suelos compactos o formaciones rocosas, actuando como un revestimiento superficial que protege frente a la erosión y aporta rigidez estructural. Finalmente, la hidrosiembra es más recomendable en suelos granulares y taludes de baja pendiente, donde las raíces profundas de las especies vegetales utilizadas pueden anclarse eficazmente. Sin embargo, en pendientes pronunciadas, su contribución al factor de seguridad (FS) es limitada, arrojando generalmente valores bajos debido a su menor capacidad de reforzamiento estructural directo.

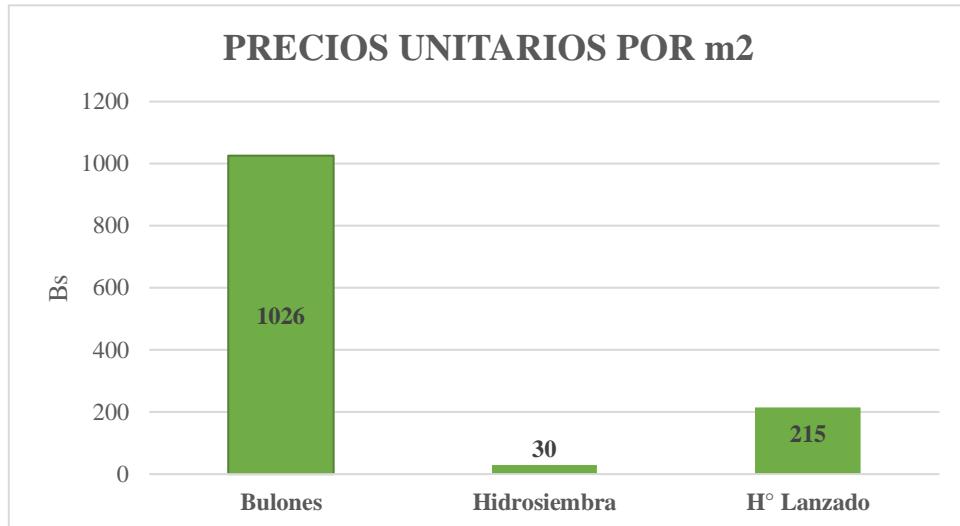
4.4.2. ANALIS ECONÓMICO

Tabla 4. 12 Precio unitario de los refuerzos de taludes

REFUERZO	PRECIO UNITARIO Bs/m ²
Bulones	1026
Hidrosiembra	30
H° Lanzado	215

Fuente: Elaboración propia

Figura 4. 14 Grafica de precios unitarios de los refuerzos de taludes



Fuente: Elaboración propia

La figura 4.14 Nos muestra la comparación económica entre los diferentes métodos de refuerzo aplicados en los taludes analizados. El refuerzo mediante bulones representa la alternativa de mayor costo, alcanzando aproximadamente 1.026 Bs/m² considerando una longitud promedio de 6 metros por bulón. En segundo lugar, se encuentra el H° Lanzado, con un costo estimado de 215 Bs/m² para un espesor de 15 cm. Finalmente, la Hidrosiembra resulta ser la opción más económica, con un costo aproximado de 30 Bs/m². Cabe destacar que la discretización económica específica de cada talud se detalla en el **Anexo 5.** "Cabe recalcar que los precios actuales en nuestro país son variables debido a la inestabilidad del dólar, lo cual puede influir significativamente en los costos de los materiales y servicios utilizados en el presente análisis."

4.4.3 COMPARACION TECNICA Y ECONOMICA DE APLICACIÓN DE REFUERZO EN CADA TALUD DE ESTUDIO.

Tabla 4. 13 Elección de refuerzo aplicado en cada talud

TALUD N°	PROGRESIVA	ELECCION DE REFUERZO	JUSTIFICACIÓN TÉCNICA Y ECONOMICA
1	30+220 a 30+310 (Izquierda)	H° LANZADO	Dado que el terreno presenta características de un suelo arcilloso de baja plasticidad, se recomienda el uso de bulones como sistema de refuerzo. Sin embargo, debido al elevado costo de estos, se optó por emplear hormigón lanzado como alternativa más económica.
2	31+950 a 32+160 (Izquierda)	H° LANZADO	Debido a que predomina en gran parte un suelo con presencia de roca, se recomienda la aplicación de hormigón lanzado como sistema de refuerzo.
3	33+782 a 33+990 (Derecha)	BULONES	Al tratarse de un suelo arcilloso de baja plasticidad, al igual que el primer talud en análisis, se recomienda el uso de bulones como refuerzo permanente, considerando las dimensiones y características geométricas del talud.

4	37+010 a 37+170 (Derecha)	BULONES	Debido a que se trata de un suelo arenoso con presencia de limo y arcilla, podría considerarse el uso de hidrosiembra como método de estabilización superficial. Sin embargo, debido a la pronunciada pendiente del talud, el refuerzo más adecuado es la instalación de bulones.
5	38+340 a 38+440 (Derecha)	HIDROSIEMBRA	La hidrosiembra cumple con las condiciones geométricas de pendiente, así como con las características del tipo de suelo, por lo que se considera una opción viable para el refuerzo superficial del talud.
6	39+050 a 39+250 (Derecha)	H° LANZADO	Debido a las características del suelo, al tratarse de un material granular con alta presencia de roca, se recomienda y se opta por la aplicación de hormigón lanzado, tanto por criterios técnicos como económicos.
7	39+640 a 39+820 (Izquierda)	H° LANZADO	Aunque las características y propiedades del suelo son compatibles con la aplicación de hidrosiembra, debido a que la pendiente es pronunciada, se recomienda emplear hormigón lanzado como método de estabilización más adecuado.
8	40+330 a 40+400 (Derecha)	H° LANZADO	Dadas las condiciones del suelo, el uso de bulones es técnicamente viable; sin embargo, considerando el aspecto económico, también se cumple con los requerimientos mediante hormigón lanzado, por lo que se opta por esta alternativa.
9	40+637 a 40+840 (Izquierda)	H° LANZADO	Dadas las mismas condiciones de suelo que el talud anterior (Nº 8), también se opta por la aplicación de hormigón lanzado como método de estabilización.
10	42+239 a 42+368 (Derecha)	HIDROSIEMBRA	Debido a las condiciones geométricas del talud y al tipo de suelo granular, la hidrosiembra resulta totalmente recomendable como método de estabilización superficial.

Fuente: Elaboración propia

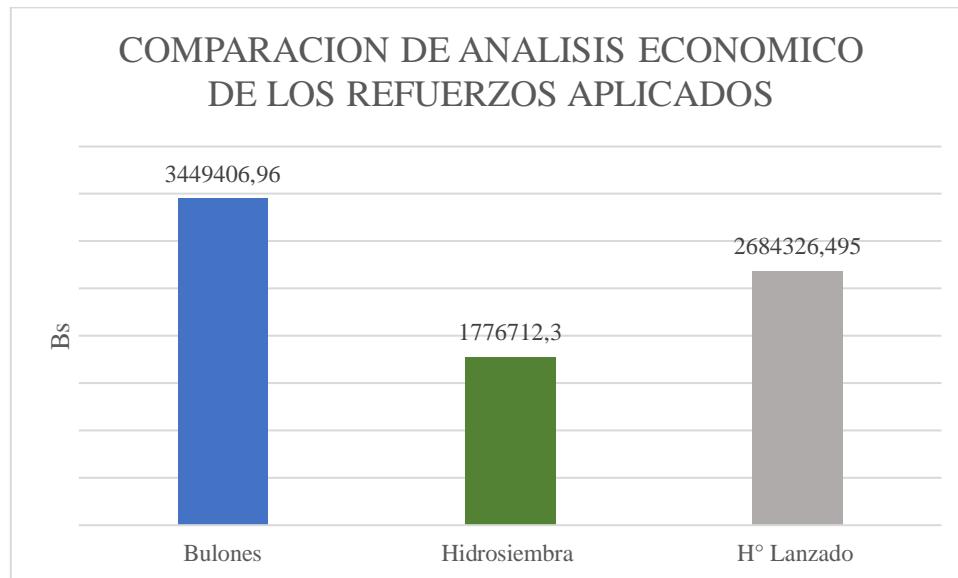
4.4.4 COMPARACION ECONOMICA TOTAL DE REFUERZOS SELECCIONADOS PARA CADA TALUD ESTUDIADO.

Tabla 4. 14 Comparación económica de los refuerzos seleccionados

Talud N°	Bulones	Hidrosiembra	H° Lanzado
1			154864,5
2			452613,525
3	1672234,2		
4	1777172,76		
5		82486,5	
6			591153,25
7			659903,37
8			83126,55
9			742665,3
10		1694225,8	
TOTAL Bs	3449406,96	1776712,3	2684326,495

Fuente: Elaboración propia

Figura 4. 15 Grafica de comparación de costo total de inversión del proyecto de los refuerzos de taludes



Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y

RECOMENDACIONES

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- El análisis detallado de la geometría y los materiales que constituyen los taludes permitió identificar que son de pendientes pronunciadas mayor a 45° con la susceptibilidad de riesgo de deslizamiento, asociadas principalmente a suelos de baja cohesión de 1 kPa la mayoría.
- El dimensionamiento de las alternativas de refuerzo permitió definir criterios específicos para cada técnica. El H° Lanzado se aplicó con un espesor de 15 cm y 10 cm como capa de recubrimiento superficial. La Hidrosiembra se diseñó como cobertura vegetal de raíces profundas en taludes, con un espesor de 30 cm. Por su parte, los Bulones se dimensionaron con longitudes promedio de 6 metros y espaciamiento de 1x1 m, orientados a estabilizar taludes con un ángulo de 30° y capacidad de anclaje de 150 kN para suelo firme y 200 kN para suelos blandos.
- Se determinaron los parámetros geotécnicos necesarios para el dimensionamiento de cada alternativa, como cohesión más alta de 150 kPa para el H° Lanzado, ángulo de fricción bajo de 25° y peso específico de 24 Kn/m^2 y para la hidrosiembra con una cohesión de 30 kPa, ángulo de fricción de 30° y con peso específico de 13 kN/m^2 . Estos parámetros fueron esenciales para modelar el comportamiento de los taludes en el programa Slide.
- El hormigón lanzado es más adecuado para suelos cohesivos moderados (como arcillas duras o limos compactos) y roca meteorizada, donde existe presencia de erosión superficial o necesidad de una cobertura inmediata. Si bien proporciona rigidez y protección superficial, su aporte estructural es limitado en suelos blandos o de baja cohesión, ya que no logra mejorar significativamente. La hidrosiembra se recomienda en taludes de baja pendiente y en suelos granulares y erosionables, como arenas limosas o taludes alterados por escorrentimientos donde el objetivo principal es el control de la erosión.

superficial y la recuperación vegetal. Los bulones resultan ser la opción más eficaz en taludes dando resultados mayores que 1,5 garantizando totalmente la seguridad.

- En cuanto al aspecto económico, el refuerzo con bulones representa la alternativa de mayor costo estimado promedio de 1026 Bs/m²; sin embargo, es también la más eficiente, ya que proporciona estabilidad estructural a largo plazo de hasta 75 años. En segundo lugar, el hormigón lanzado con 215 Bs/m² ofrece soporte estructural superficial, de hasta 50 años de vida útil, pero, dadas las características y propiedades del talud evaluado, pero resultó ser la segunda alternativa no tan eficiente a comparación de los bulones, pero es la opción más viable en lo económico. En último lugar con un precio estimado de 30 Bs/m² se encuentra la hidrosiembra, que, siendo la más económica no es adecuada para todos los taludes estudiado por las condiciones del lugar como también las características y propiedades de los taludes de igual manera la geometría.

5.2. RECOMENDACIONES

- Se recomienda a la ABC considerar a la brevedad posible la opción de protección que es la más favorable que ofrezca mayor seguridad a largo plazo, con el fin de evitar futuras obstrucciones vehiculares y prevenir accidentes, especialmente durante la época de lluvias.
- Se recomienda realizar estudios detallados, considerando nuevas alternativas más accesibles o combinaciones de las mismas respecto a la geometría y la caracterización geotécnica de los suelos en los tramos donde se ejecutarán las obras viales, con el objetivo de identificar y mitigar posibles zonas con riesgo de deslizamiento.
- Debido a la presencia constante de lluvias, se recomienda implementar de forma permanente y preventiva mejoras en los sistemas de drenaje superficial en los taludes, con el fin de reducir el riesgo de movimientos de masa provocados por la acumulación de agua en las superficies de los taludes.